



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STAVEBNÍ

CENTRUM EXPERIMENTÁLNÍ GEOTECHNIKY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

„Vliv nehomogenity bentonitu na vybrané geotechnické vlastnosti
těsnících vrstev“

„The influence of Inhomogeneous Bentonite on Geotechnical Properties
of Sealing Layer“

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby

Vedoucí práce: Ing. Jiří Svoboda, Ph.D.

Bc. MICHAEL TŮMA

2018



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební
Thákurova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: <u>Tůma</u>	Jméno: <u>Michael</u>	Osobní číslo: <u>410 954</u>
Zadávající katedra: <u>Centrum experimentální geotechniky</u>		
Studijní program: <u>Stavební inženýrství</u>		
Studijní obor: <u>Konstrukce a dopravní stavby</u>		

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: <u>Vliv nehomogenity bentonitu na vybrané geotechnické vlastnosti těsnicích vrstev</u>	
Název diplomové práce anglicky: <u>The influence of Inhomogeneous Bentonite on Geotechnical Properties of Sealing Layer</u>	
Pokyny pro vypracování: - seznámení s bobtnavými jíly a postupy jejich zkoušení v laboratoři - provedení geotechnických zkoušek na vzorcích bentonitu - modifikace laboratorního měřicího zařízení pro vícebodové měření bobtnacího tlaku - zjištění vlivu (ne)homogenity vstupního materiálu na vybrané geotechnické vlastnosti	
Seznam doporučené literatury:	
Jméno vedoucího diplomové práce: <u>Ing. Jiří Svoboda Ph.D.</u>	
Datum zadání diplomové práce: <u>4.10.2018</u>	Termín odevzdání diplomové práce: <u>6.1.2019</u> <i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i>
_____	_____
Podpis vedoucího práce	Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

<i>Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutně uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.</i>	
_____	_____
Datum převzetí zadání	Podpis studenta(ky)

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „Vliv nehomogenity bentonitu na vybrané geotechnické vlastnosti těsnících vrstev“ vypracoval samostatně s přispěním vedoucího diplomové práce, poskytnutých konzultací a s použitím uvedené literatury v závěru této práce.

V Praze, dne

podpis

MICHAEL TŮMA

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval panu Ing. Jiřímu Svobodovi, Ph.D. za vedení při zpracování této diplomové práce. Další poděkování patří Ing. Radku Vašíčkovi, Ph.D. a Ing. Jiřímu Štástkovi, Ph.D. za poskytnuté konzultace. Všem velice děkuji za jejich cenné rady a zkušenosti, které mi předali při vypracování této práce. Rád bych poděkoval celé své rodině a přátelům za pevné nervy a podporu při zpracování diplomové práce. Poslední poděkování patří Centru experimentální geotechniky a jeho pracovníkům. Toto místo bylo nedílnou součástí pro vypracování experimentální části této práce.

ABSTRAKT

Tato práce řeší experimentálně vliv nehomogenity bentonitu na vybrané geotechnické vlastnosti. Cílem této práce je ověřit, zda nehomogenita má vliv na geotechnické vlastnosti bentonitu a zjistit, jakým způsobem ovlivňuje tyto vlastnosti - zda tento vliv je pozitivní nebo negativní. Tato práce dále zkoumá způsob měření bobtnacího tlaku a zkoumá, zda měřený tlak bude odlišný při měření na spodní a horní části vzorku.

V práci byly provedeny laboratorní zkoušky na stanovení vybraných geotechnických vlastností bentonitu. Zkoušky probíhaly zejména na edometru s pákovým mechanismem a na propustoměru s konstantním spádem. Pro zkoumání vlivu měření bobtnacího tlaku na vzorku bentonitu shora a zdola, byl v rámci práce sestaven nový měřicí aparát, který umožnil vícebodové měření tlaku. Na základě zkušeností s aparátem bylo v práci navrženo nové zařízení pro vícebodové měření.

Pro účely výzkumu v této práci byl použit český bentonit BCV (Bentonit Černý Vrch). Materiál je komerčním produktem od firmy Keramost, a. s. V experimentální části byly zkoumány dva typy bentonitu BCV. Pro homogenní vzorek byl zvolen jemně mletý bentonit BCV z roku 2017. Pro nehomogenní vzorek byla zvolena bentonitová drť BCV z roku 2018.

Výsledky ukazují, že nehomogenita bentonitu neovlivnila měření bobtnacího tlaku pro danou objemovou hmotnost sušiny. Výsledky měření propustnosti ukazují obecně nižší hydraulickou vodivost pro homogenní vzorek. Při zkoumání homogenního bentonitu při vícebodovém měření výsledky vykazují rozdílné chování materiálu oproti předpokladům. Podrobné výsledky měření jsou v závěru práce vyhodnoceny a posouzeny.

Klíčová slova: bentonit, nehomogenita, bobtnací tlak, hydraulická vodivost, objemová hmotnost sušiny, edometr, propustoměr

ABSTRACT

This study examines the influence of inhomogeneity in bentonite on its geotechnical properties. The purpose of this study is to test this hypothesis and investigate how homogeneity affects these properties and whether this effect is positive or negative. This study further focuses on the influence of different ways of measuring the swelling pressure and examines if the behaviour of the material differs when the swelling pressure is measured on top and the bottom of the sample.

Laboratory experiments were conducted to determine the selected geotechnical properties of bentonite. The experiments were carried out using an oedometer with lever mechanism and a permeameter with constant gradient. To examine the influence of different measuring techniques of swelling pressure on the bentonite sample a new measuring apparatus was constructed allowing for a multi-point measurement of swelling pressure. Drawing from experience with this prototype the presented study proposed a new device for multi-point measuring.

Czech bentonite BVC (Bentonit Černý Vrch) was used in the study. This material is a commercial product of Keramost, a. s. In the experimental part of this study two type of bentonite BCV were examined. Fine-grained bentonite BCV from 2017 was used as the homogeneous sample. As the inhomogeneous sample bentonite grit from 2018 was used.

The results indicated that inhomogeneous bentonite did not have any significant effects on the swelling pressure for the given dry density. Lower hydraulic conductivity was generally found in the homogeneous sample. The results for the homogeneous sample indicated that the material did not behave in line with the study's hypothesis. Detailed results are discussed and evaluated in the conclusion of the present study.

Key words: bentonite, inhomogeneous, swelling pressure, hydraulic conductivity, dry density, oedometer, permeameter

Obsah

1	Úvod	1
2	Bentonit.....	2
2.1	Charakteristika bentonitu.....	2
2.2	Rozdělení bentonitů	2
2.3	Voda v bentonitu a struktura montmorillonitu.....	2
2.4	Historie objevení bentonitu	3
2.5	Ložiska bentonitu v ČR.....	4
2.6	Využití bentonitu	5
2.7	Definice homogenity bentonitu	5
3	Geotechnické vlastnosti bentonitu.....	6
3.1	Vlhkost zeminy w	6
3.2	Objemová hmotnost ρ	6
3.3	Objemová hmotnost sušiny ρ_d	7
3.4	Zrnitost	7
3.5	Edometrický modul přetvárnosti E_{oed}	7
3.6	Swell index	8
3.7	Bobtnací tlak	8
3.8	Hydraulická vodivost.....	8
4	Laboratorní zkoušení vybraných geotechnických vlastností a jejich charakteristika 10	
4.1	Stanovení vlhkosti zeminy w	10
4.2	Stanovení objemové hmotnosti sušiny ρ_d	11
4.3	Stanovení zrnitosti	11
4.4	Zkouška stlačitelnosti v edometru	13
4.5	Stanovení swell indexu	14

4.6	Stanovení bobtnacího tlaku	15
4.7	Stanovení hydraulické vodivosti	16
5	Modifikace propustoměru pro vícebodové měření bobtnacího tlaku	19
5.1	Proč měřit bobtnací tlak ve více bodech	19
5.2	Důvody modifikace propustoměru	19
5.3	Modifikace propustoměru a jeho popis	20
6	Kalibrace silových čidel.....	23
7	Experimentální část	25
7.1	Referenční bentonit BCV	25
7.2	Zrnitostní rozbor BCV M182.....	27
7.3	Vyhodnocení kalibrace silových čidel	29
7.4	Sestavení modifikovaného propustoměru	33
7.5	Sestavení edometru.....	35
7.6	Stanovení swell indexu	37
8	Vyhodnocení bobtnacího tlaku a hydraulické vodivosti	39
8.1	Bobtnací tlak na modifikovaném propustoměru	39
8.2	Bobtnací tlak na standardním propustoměru	41
8.3	Bobtnací tlak na edometru s pákovým mechanismem	42
8.4	Hydraulická vodivost na modifikovaném propustoměru	46
8.5	Hydraulická vodivost na standardním propustoměru	47
9	Posouzení vlivu nehomogenity bentonitu na jeho geotechnické vlastnosti	48
9.1	Posouzení BCV M182 a BCV M179 v modifikovaném propustoměru	48
9.2	Posouzení BCV M182 a BCV M179 ve standardním propustoměru	49
9.3	Posouzení BCV M182 a BCV M179 v edometru s pákovým mechanismem....	50
9.4	Posouzení hydraulické vodivosti BCV M182 a BCV M179	53
9.5	Posouzení swell indexu BCV M182 a BCV M179.....	53

10	Závěr	54
11	Seznam obrázků	55
12	Seznam grafů	56
13	Seznam tabulek.....	57
14	Použitá literatura	58
15	Přílohy	60
15.1	Příloha 1 – Zkušební protokol P669	60
15.2	Příloha 2 – Zkušební protokol P670	61
15.3	Příloha 3 – Zkušební protokol P671	62
15.4	Příloha 4 – Zkušební protokol P635	63
15.5	Příloha 5 – Zkušební protokol P639	64

1 Úvod

Tato práce byla zpracována na základě zjištění vlivu nehomogenity bentonitu na vybrané geotechnické vlastnosti. Cílem této práce je ověřit, zda nehomogenita má vliv na geotechnické vlastnosti bentonitu a zjistit, jakým způsobem ovlivňuje tyto vlastnosti. Cílem je zjištění, zda tento vliv je pozitivní nebo negativní. Bentonit a jeho geotechnické vlastnosti se zkoumají a studují pro využití materiálu ve stavebnictví jako těsnící vrstvy. Tato práce dále zkoumá způsob měření bobtnacího tlaku. Cílem je zjištění, zda měření tlaku bude odlišné na spodní a horní části vzorku bentonitu.

2 Bentonit

V úvodu této práce je popsána charakteristika bentonitu, rozdělení materiálu, jeho chování při kontaktu s vodou, historie objevení bentonitu, ložiska bentonitu v ČR a jeho využití. V závěru této kapitoly je definován pojem homogenita pro využití v této práci.

2.1 Charakteristika bentonitu

Bentonit je jílovitá zemina, která se vyznačuje mohutnou sorpční schopností, bobtnáním a nízkou propustností při kontaktu s vodou. Základním minerálem bentonitu je montmorillonit, který je nositelem těchto vlastností. Obsah montmorillonitu výrazně ovlivňuje vlastnosti bentonitu. Chemické a mineralogické složení bentonitu je velmi proměnlivé a velmi ovlivňuje jeho vlastnosti. Bentonity vznikly mechanickým a chemickým zvětráváním matečné horniny. Především sopečných tufů, tufitů a jiných třetihorních hornin. (Chváta, 1995)

2.2 Rozdělení bentonitů

Bentonity lze rozdělit do dvou skupin podle schopnosti bobtnání:

Silně bobtnavé sodné bentonity, tzv. bentonity wyomingského typu.

Nejnámější ložiska této suroviny se nacházejí především v USA. V ČR se ložiska sodných bentonitů nenachází.

Méně bobtnavé bentonity jsou draselné, vápenaté, hořečnaté a případně jejich kombinace. Ložisek těchto bentonitů je na světě mnoho. Tyto bentonity lze průmyslově obohacovat sodíkem tzv. aktivací¹.

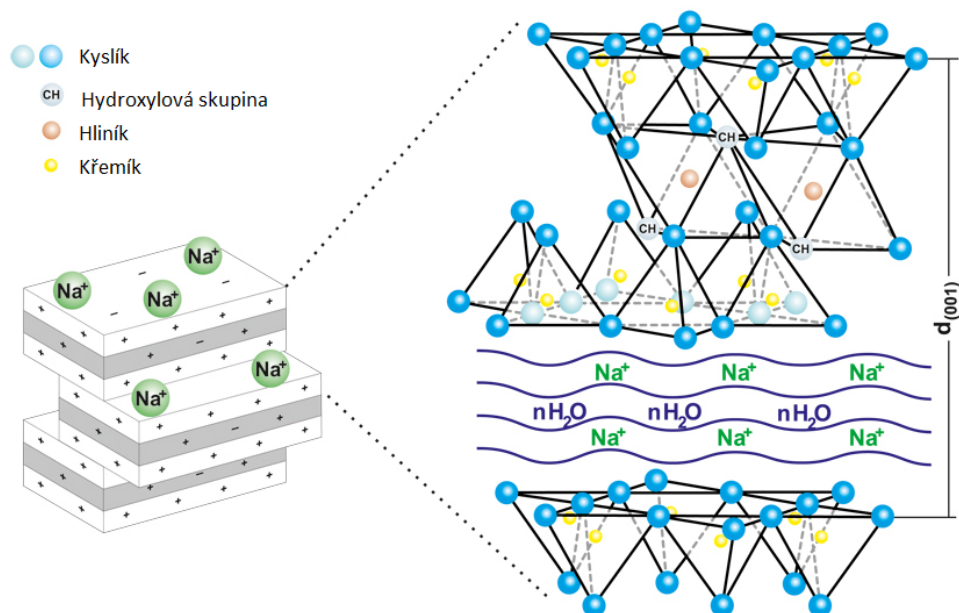
2.3 Voda v bentonitu a struktura montmorillonitu

Sorpční schopnosti bentonitu souvisí se schopností výměny kationtů. Jde o schopnost materiálu vázat do své struktury molekuly H₂O. Voda se může nacházet mezi zrny zeminy v pórech nebo spolu s kationty v mezivrstevních prostorech. Při kontaktu s vodou dochází k hydrataci kationtů. Během toho se oddalují kationty od

¹ Aktivace bentonitu - proces, při kterém se výměnné kationty (nacházející se v mezivrstevním prostoru) zamění za vybrané kationty z prostředí

vrstvy a vytvářejí elektrostatické dvojevrstvy. Poté jsou hydratovány ostatní vrstvy, které mají záporný náboj (Dixon et al. 1993). Důsledkem této schopnosti výměny kationtů je bobtnání bentonitu. Vlivem přijímání vody do mezivrstevních prostor a oddalování vrstev dochází ke změně objemu. Při zamezení deformace vyvíjí bentonit bobtnací tlak.

Montmorillonity se skládají z dioktaedrických a tetraedrických vrstev a mezivrstevního prostoru. V tomto prostoru se nachází nenasycené náboje okolních vrstev. Na tyto náboje se vážou výměnné kationty K^+ , Na^+ , Ca^{2+} a Mg^{2+} . Na Obr. 1 je mikrostruktura bentonitu se sodným kationtem. Rychlost těchto procesů závisí na struktuře tohoto materiálu. (Weiss a Kužvart 2005)



Obr. 1 Struktura montmorillonitu (inzynieria.com)

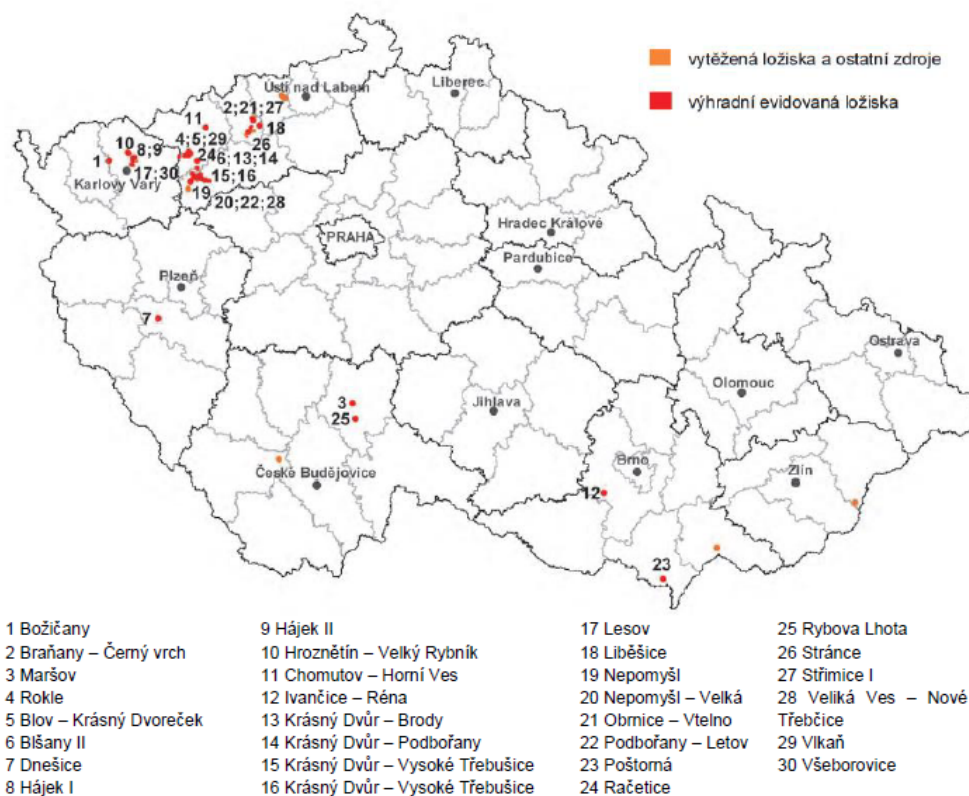
2.4 Historie objevení bentonitu

Historie novodobého využití bentonitu začala již v 19. století. První ložiska bentonitu byla nalezena v USA u Fort Bentonu v roce 1881. Podle tohoto ložiska získala hornina název bentonit. Další ložiska byla objevována ve Spojených státech a v Evropě. První použití bentonitu bylo ve Velké Británii, kde sloužil pro odbarvování jedlých tuků a olejů. Největší rozvoj využití bentonitu nastal až ve 20. století, kdy se bentonit začal využívat v oborech jako je slévárenství a stavebnictví. Dále se bentonit začal využívat v keramickém, chemickém a potravinářském průmyslu nebo pro čištění odpadních vod.

Na českém území bylo první ložisko nalezeno nedaleko obce Braňany u Mostu v roce 1941. V roce 1953 se otevřelo další naleziště bentonitu v nedalekých Libkovicích. Společně s těžbou se zde začal budovat také provoz na zpracování bentonitu. Úpravna v Libkovicích fungovala až do roku 1969, kdy ji nahradil provoz Obrnice, který funguje dodnes. Dalším otevřeným ložiskem byl Černý vrch. (Chváta, 1995)

2.5 Ložiska bentonitu v ČR

V České republice se nachází poměrně velké množství ložisek bentonitu. Ložiska bentonitu jsou převážně situovaná v oblasti Českého středohoří a Doupovských hor. Mapa ČR s ložisky bentonitu je zobrazena na Obr. 2. V okolí Kadaně a Podbořan se nachází většina zásob bentonitu. Jedním z nejdůležitějších ložisek v této oblasti je ložisko Rokle. Těžba na ložisku Hroznětín – Velký Rybník byla z ekonomických důvodů ukončena v roce 1993. Další významná ložiska bentonitu se nachází na Mostecku. Nejdůležitější ložiska této oblasti jsou: Braňany – Černý Vrch, Stránce a Střimice. Menší význam mají ložiska jihočeské pánve. Na jižní Moravě jsou ložiska využívána převážně pro zemědělství. (Surovinové zdroje ČR) Podle statistických údajů České geologické služby z roku 2016 se v ČR nachází 38 ložisek bentonitu a z toho pouze 7 je těžených.



Obr. 2 Ložiska bentonitu v ČR (Surovinové zdroje ČR)

2.6 Využití bentonitu

Bentonit se využívá v různých průmyslových odvětví např.: ve slévárenství, stavebnictví, potravinářství, zemědělství, farmacii, papírenském průmyslu atd. Slévárenství je největším spotřebitelem bentonitu.

Dále se využívá při čištění odpadních vod jako sorbentu ropných nečistot a těžkých kovů. V rostlinné výrobě se bentonit využívá při kompostování a zúrodnování příliš propustných (písečných) půd. V protipožární ochraně se využívá bentonitů v hasicích zásypech pro likvidaci lesních požárů. Pro domácí chovatelství se vyrábí z bentonitu hygienická podestýlka pro zvířata známá jako kočkolit. V potravinářství se využívá bentonitů pro odbarvování, stabilizaci tuků a olejů atd.

Ve stavebnictví se bentonit používá jako těsnicí vrstva nebo pažící suspenze. Např.: bentonitové suspenze pro pažení stavebních rýh a stěn, těsnění vrtaných studní a bentonitové rohože. V posledních několika desetiletích se ve světě i v ČR navíc zkoumá možnost využití bentonitů jako účinné těsnicí bariéry při ukládání radioaktivního odpadu v hlubinném úložišti.

2.7 Definice homogenity bentonitu

Obecně se materiály homogenní nazývají takové materiály, které mají v celém svém objemu stejné vlastnosti. V této práci pojem (ne)homogenita je uvažována s ohledem na zrnitostní složení materiálu, resp. na zrnitost bentonitu. Pro experimentální část této práce byly použity dva zástupci materiálu. Zástupce homogenního materiálu je jemně mletý bentonit BCV (BCV 179), na kterém jsou dodnes zkoušeny jeho geotechnické vlastnosti v Centru experimentální geotechniky ČVUT. Zrnitostní složení bentonitu je uvažováno do největší frakce 0,63 mm. Tento jemný prášek po slisování do vzorku nazýváme homogenní. Zástupce nehomogenního materiálu je hrubozrnná drť bentonitu BCV (BCV 182), který je v této práci pro všechny laboratorní zkoušky proset přes síto o velikosti 4 mm. Po slisování nehomogenního materiálu do vzorku vznikají mezi zrny mezery. Na rozdíl od homogenního vzorku, kde je ideálně celý prostor vyplněn bentonitem.

3 Geotechnické vlastnosti bentonitu

V této kapitole jsou popsány základní popisné fyzikální vlastnosti, hydrofyzikální vlastnosti a vybrané parametry zemin, které jsou níže charakterizovány.

- Vlhkost zeminy
- Objemová hmotnost
- Objemová hmotnost sušiny
- Zrnitost
- Edometrický modul přetvárnosti
- Swell index
- Bobtnací tlak
- Hydraulická vodivost

3.1 Vlhkost zeminy w

Vlhkost zeminy je poměr hmotnosti vody z předem určené hmotnosti zkušebního vzorku zeminy k hmotnosti suchých pevných částic zkušebního vzorku zeminy. Vysoušení vzorků probíhá v sušárně při teplotě 105°C až 110°C.

Hmotnostní vlhkost využijeme pro stanovení objemové hmotnosti sušiny. Dále je stanovení vlhkosti zeminy požadováno při zatřídování zhutňovaných zemin jako kontrolní kritérium.

3.2 Objemová hmotnost ρ

Objemová hmotnost je poměr mezi hmotností zeminy a objemu materiálu včetně přítomné vody a plynů. Stanovení objemu vzorku je závislé na jeho tvaru. Pokud je vzorek pravidelný, použijeme metodu přímého měření. Tj. změříme vzorek posuvným měřítkem a spočítáme jeho objem. Jestliže je vzorek nepravidelného tvaru, použijeme metodu stanovení objemové hmotnosti ponořením do kapaliny, kdy je vzorek obalen voskem.

3.3 Objemová hmotnost sušiny ρ_d

Objemová hmotnost sušiny udává poměr mezi hmotnostmi vysušených pevných částic zeminy a celkovým objemem zeminy. Vysoušení probíhá v sušárně při teplotě 105 °C až 110 °C. Podstatou zkoušky je stanovení hmotnosti vysušené zeminy v jednotce objemu.

Většina porovnání vztahů a závislostí parametrů bentonitu je vztažena právě k objemové hmotnosti sušiny, abychom sjednotili hodnotící systém a mohli jednotlivé charakteristiky mezi sebou posuzovat.

3.4 Zrnitost

Zrnitostní křivka je součtová čára, jejíž každý bod udává, kolik procent z celkové hmotnosti vzorku činí hmotnost všech zrn menších než určitý průměr zrna. Obecně je zrnitost jedna z nejdůležitějších fyzikálních vlastností zemin. Zrnitost poskytuje popis zeminy založený na rozdělení zrn zeminy do jednotlivých frakcí.

V rámci této práce, jak bylo řečeno v kapitole 2.7 je homogenita materiálu uvažována především na základě zrnitostního rozboru tedy obsahu frakcí v materiálu. Zkoumaný materiál je rozdělen dle zrnitosti na homogenní materiál – jemně mletý bentonit a nehomogenní materiál – hrubozrnný bentonit.

3.5 Edometrický modul přetvárnosti E_{oed}

E_{oed} charakterizuje stav, při kterém se zemina vlivem svislého přetížení nemůže deformovat do stran. Hlavním předpokladem a principem je jednoosá deformace. Pokud nahradíme deformační křivku pro určitý interval blízkých napětí sečnou, můžeme závislost považovat za lineární. Edometrický modul přetvárnosti je tedy sečnový modul, který je platný pro určitý interval napětí na deformační křivce. Musíme tedy vždy uvést rozsah napětí, pro který byl edometrický modul přetvárnosti stanoven. (Kořínek, 2007)

3.6 Swell index

Swell index je nabobtnaný objem volně sypaného prášku do kapaliny. Swell index slouží pro stanovení obecných charakteristik bobtnání bentonitů nebo jiných bobtnavých jíílů. Tento zkušební parametr se používá jako kvalitativní indikátor. Tento index je pro nás ukazatelem bobtnání bentonitu a považuje se za informativní.

3.7 Bobtnací tlak

Bobtnací tlak je definován jako tlak bobtnavé zeminy, která je v kontaktu s vodou a zároveň ji je zamezeno v deformaci. Jedná se o zjišťování vlastností materiálů při zvyšování jejich vlhkosti, resp. jejich sycení.

Bobtnací tlak vyvíjí bobtnavé materiály, především jíly. Bentonit reaguje při kontaktu s vodou, tak že sorbuje do sebe molekuly vody. Při podmínce zabránění změně objemu materiálu vyvíjí tlak, který se nazývá bobtnací tlak. U zemin je tento parametr ovlivněn objemovou hmotností sušiny, resp. zhutněním a mineralogickým složením, kde bobtnání ovlivňuje hlavně obsah montmorillonitu.

3.8 Hydraulická vodivost

Hydraulická vodivost se udává v [m/s] a je koeficient popisující schopnost průtoku kapaliny prostředím (zeminou) účinkem hydraulického sklonu. Je závislá na vlastnostech prostředí i kapaliny. Výpočet vychází z Darcyho zákona pro ustálené proudění. Hydraulická vodivost bývá také nazývána koeficientem filtrace. Bližší stanovení filtračního koeficientu je popsáno dále v kapitole 4.7.

Hydraulická vodivost je mnohdy zaměňována za propustnost. Je tedy potřeba stále sledovat jednotky dané charakteristiky. Propustnost, která se udává v jednotkách plochy [m²] je parametr sledující jen prostředí.

U zemin je hydraulická vodivost ovlivněna objemovou hmotností sušiny (zhutněním), zrnitostním složením a typem zeminy. (*Hausmannová, 2017*).

V této práci je používán termín hydraulická vodivost nebo koeficient filtrace. Hydraulickou vodivost lze vyhodnotit pro vzorky nasycené nebo nenasycené vodou. Nasycený materiál je takový materiál, který má všechny póry vyplněny vodou. V této práci je vyhodnocení hydraulické vodivosti pro nasycené vzorky materiálu.

Bobtnací tlak a hydraulická vodivost bentonitu jsou silně ovlivněny zhutněním materiálu. S rostoucí objemovou hmotností sušiny exponenciálně roste bobtnací tlak. Požadovaného bobtnacího tlaku pro těsnící vrstvy lze dosáhnout změnou objemové hmotnosti bentonitu. Čím více je vzorek zhutněn, tím vykazuje větší odpor proti proudění tekutin tzn. nižší hydraulická vodivost. Tyto skutečnosti byly v minulosti ověřeny jak v zahraničním výzkumu (*Villar, 2008; Dixon et al., 1999*), tak výzkumem v Centru experimentální geotechniky ČVUT. (*Hausmannova, L. a Vasicek R., 2014*)

Bobtnací tlak a hydraulická vodivost jsou hlavní parametry popisující kvalitu těsnící funkce bentonitu. Požadavky na vlastnosti českého bentonitu podle jednotlivých aplikací ve stavebnictví lze dohledat v bakalářské práci: „Možnosti využití severočeských bentonitů ve stavebnictví“ (Tůma, 2016).

4 Laboratorní zkoušení vybraných geotechnických vlastností a jejich charakteristika

Pro vyhodnocení vlivu (ne)homogenity byly vybrány hlavní charakteristické parametry bentonitu. Vybrané vlastnosti jsou:

- Stanovení vlhkosti zeminy
- Stanovení objemové hmotnosti sušiny
- Stanovení zrnitosti
- Zkouška stlačitelnosti v edometru
- Stanovení swell indexu
- Stanovení bobtnacího tlaku
- Stanovení hydraulické vodivosti

Na základě stanovení těchto vlastností bude dále v následujících kapitolách posuzován vliv homogenity na vybrané geotechnické vlastnosti bentonitu.

V této kapitole jsou popsány jednotlivé metodiky zkoušení materiálů. Laboratorní zkoušky byly prováděny dle platných ČSN v aktuálním znění. Bližší specifikace a označení norem je v jednotlivých kapitolách o metodikách zkoušení.

4.1 Stanovení vlhkosti zeminy w

Stanovuje se podle ČSN EN ISO 17892-1 Stanovení vlhkosti. Tato norma popisuje laboratorní stanovení vlhkosti vzorku zeminy pomocí vysoušení v sušárně. Postup pro stanovení vlhkosti je určit hmotnost vody odstraněné při vysušování při teplotě 105°C až 110°C. Hmotnostní vlhkost (w) je definována jako poměr hmotnosti vody ve vzorku zeminy k hmotnosti vysušené zeminy.

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

kde:

m_w – hmotnost vody v zemině [kg]

m_d – hmotnost vysušené zeminy [kg]

4.2 Stanovení objemové hmotnosti sušiny ρ_d

Stanovuje se podle ČSN EN ISO 17892-2 Stanovení objemové hmotnosti. Principem metody je zvážení zkušebního vzorku o známém objemu. Objemová hmotnost vysušeného vzorku (ρ_d) udává poměr mezi hmotností pevných částic zeminy vysušené při teplotě 110°C a celkovým objemem.

$$\rho_d = \frac{m_d}{V} \times 10^{-6} \quad [\text{Mg/m}^3]$$

kde:

m_d - hmotnost pevných částic vysušené zeminy [g]

V - celkový objem [m³]

4.3 Stanovení zrnitosti

Zrnitostní rozbor se stanovuje podle normy ČSN EN ISO 17892-4 Stanovení zrnitosti. Zrnitost je jedna z nejdůležitějších fyzikálních vlastností zeminy, na které je založena klasifikace zemin. Zrnitost popisuje rozdělení zrn zeminy do jednotlivých frakcí. Zrnitostní křivka je součtová čára, jejíž každý bod udává, kolik procent z celkové hmotnosti vzorku činí hmotnost všech zrn menších než určitý průměr zrna d . Pro její stanovení existují dva nejčastěji používané laboratorní způsoby:

- Prosévání - síťový rozbor proséváním na standardizované řadě sít pro zrna větší než 0,063 mm (písčité až štěrkovité)
- Hustoměrný rozbor - pro zrna menší než 0,063 mm (prachovitá). Tento rozbor vychází ze Stokesova usazovacího zákona, který udává vztah mezi průměrem zrn a rychlostí jejich usazování v kapalině.

V této práci byl použit způsob stanovení zrnitosti pomocí síťového rozboru prosévání na sítích. Normovaná síta s vibrační deskou pro stanovení čáry zrnitosti jsou zobrazena na Obr. 3.



Obr. 3 Vibrační deska s normovanými sítí

Pro lepší znázornění zrnitosti vzorku je v závěru práce porovnání s ideální Fullerovou křivkou. Fullerův výpočet ideální zrnitosti je důležitým ukazatelem, který řeší výplň prostoru mezi různě velkými zrny. Fullerův výpočet definuje křivku zrnitosti, která by se měla přiblížit ideální zrnitosti pro zkoušený materiál.

$$y_i = 100 \times \left(\frac{d_i}{D_{max}} \right)^n$$

kde:

y_i – celkový příslušný propad k velikosti síta d_i [%]

D_{max} – jmenovitý rozměr největšího použitého oka síta [mm]

n – koeficient [0,5; 0,33]

4.4 Zkouška stlačitelnosti v edometru

Stlačitelnost se stanovuje podle ČSN EN ISO 17892-5 Zkouška stlačitelnosti v edometru postupným přitěžováním. Jedná se o měření jednoosé deformace vzorku zeminy v závislosti na známém napětí a popřípadě čase. Válcový zkušební vzorek, kterému je zabráněno deformace do stran, podléhá stupňovitému osovému zatěžování a odtěžování. Drénování probíhá pomocí karborundových filtračních destiček, které umožňují průchod vody oběma směry (sycení a odtok). Hlavní parametry zjistitelné z edometrické zkoušky jsou stlačitelnost, bobtnání a konsolidační vlastnosti zemin.

Výsledkem zkoušky jsou deformační charakteristiky zeminy, které slouží převážně k výpočtům sedání objektů a konsolidační charakteristiky, podle kterých se stanovuje doba potřebná k procesu sednutí. (Kořínek, 2007)

Používají se dva způsoby zatěžování vzorku. Zkouška s krokovým zatěžováním a zkouška s plynulým zatěžováním. V této práci bylo využito zatěžování krokové. Vyhodnocením zkoušky získáme edometrický modul přetvárnosti. Označení parametrů edometrického modulu jsou patrné na Obr. 4.

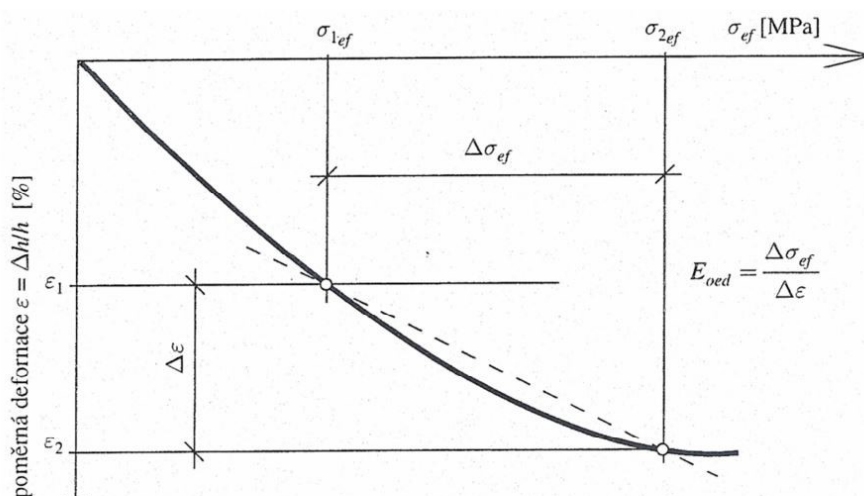
$$E_{oed} = tg\alpha = \frac{\Delta\sigma_{ef}}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_{2ef} - \sigma_{1ef}}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}$$

kde:

E_{oed} – edometrický modul přetvárnosti (sečnový) [MPa]

$\Delta\sigma_{ef}$ – rozdíl mezi známým napětím mezi jednotlivými zatěžovacími kroky [MPa]

$\Delta\varepsilon$ – rozdíl poměrných deformací mezi jednotlivými zatěžovacími kroky [-]



Obr. 4 Schéma a popis zatěžování edometru (Kořínek, 2007)

4.5 Stanovení swell indexu

Stanovení swell indexu vychází z indických standardů IS: 2720 (Part 40) z roku 1977. Jedná se o stanovení volného bobtnání zemin za použití dvou odměrných válců, do kterých se nalije známé množství destilované vody a petroleje. Následně se zváží reprezentativní vzorky a postupně se přisypávají do odměrných válců.

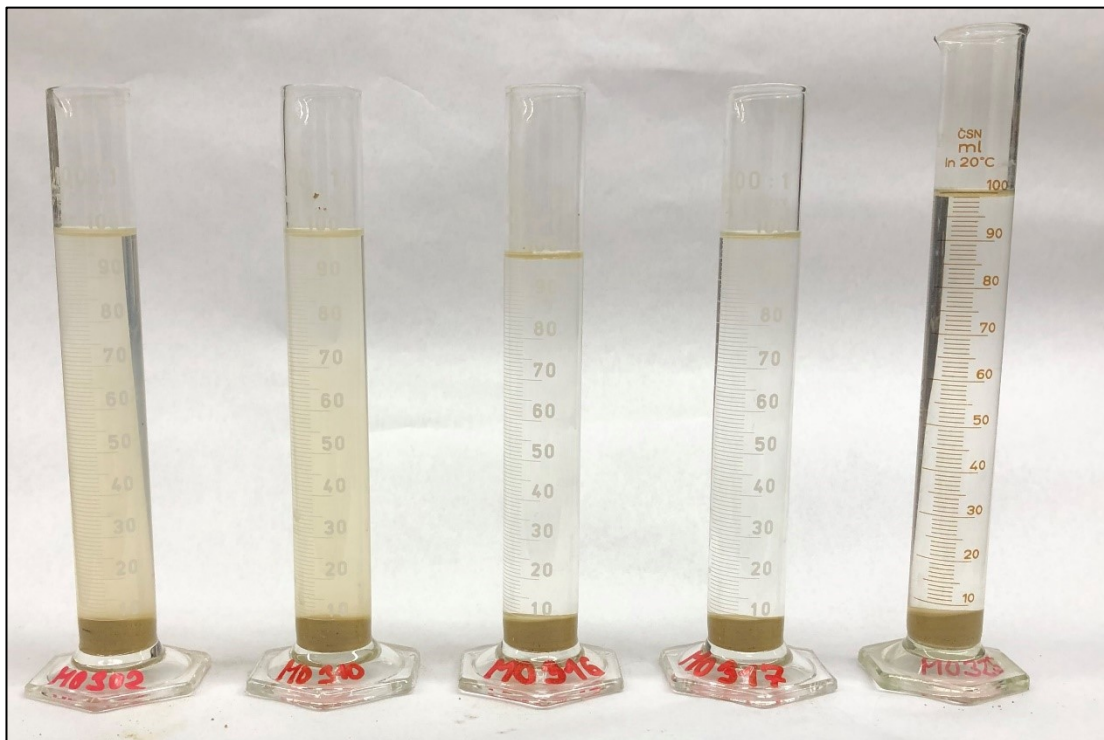
V rámci Centra experimentální geotechniky ČVUT tato metodika prošla modifikací. Do odměrných válců s destilovanou vodou se přisypává předem vysušený vzorek o hmotnosti 2,0g. Do válce se přidává každých 10 minut 0,1g vzorku. Následně se nechá bentonit nabobtnat po dobu 16 až 24 hodin. Po uplynulém čase se odečte objem nabobtnaného materiálu (Obr. 5). Výpočet swell indexu:

$$SI = \frac{V}{m} \times 2$$

kde:

V – objem nabobtnaného materiálu [ml]

m – hmotnost vysušeného vzorku [2g]



Obr. 5 Stanovení swell indexu v odměrných válcích

4.6 Stanovení bobtnacího tlaku

Pro měření bobtnacího tlaku lze využít několik zařízení. Jedním z aparátů je edometr viz. kapitola 4.4, popř. edometr v kombinaci s dynamometrem. Na Obr. 6 je zobrazený edometr s pákovým mechanismem. Dále lze měřit hodnoty tlaku pomocí silového čidla umístěném v zařízení, které se nazývá propustoměr. V obou případech je zcela zabráněno boční deformaci vzorku. V této práci se bobtnací tlak stanovuje v edometru s pákovým mechanismem a pomocí silových čidel. V závěru práce jsou jednotlivé měření porovnány. Při použití metody měření v edometru jsou hodnoty bobtnacího tlaku přímo úměrné konsolidačnímu tlaku.



Obr. 6 Edometr s pákovým mechanismem

Pomocí silového čidla na propustoměru se sycení vzorků urychluje sytícím tlakem, který proudí z jedné strany vzorku. Z druhé strany vzorku se může vytvořit tlak nebo volný odtok tzn. atmosferický tlak. Silové čidlo je umístěno na horní části vzorku a může dojít k nepřímému ovlivnění vzorku sytícím tlakem. Z předchozích měření a zkoumání je známé, že naměřený tlak na čidle je ovlivněn sytícím tlakem. Tedy dostáváme absolutní hodnoty napětí s ohledem na sytící tlak, který ovlivňuje hodnoty bobtnacího tlaku. Absolutní tlak je značen σ_{ABS} . (Hausmannová, 2017)

Silová čidla mají daný rozsah měření. Na Obr.7 jsou zobrazena čidla, která byla použita v rámci této práce s rozsahem 13kN a 17kN. Měření bobtnacího tlaku vzorku pomocí silového čidla, které není ovlivněno sytícím tlakem se vypočte podle:

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

kde:

F – Síla měřená na čidle [kN]

A – Plocha vzorku, kde je přenášen bobtnací tlak na čidlo [m²]

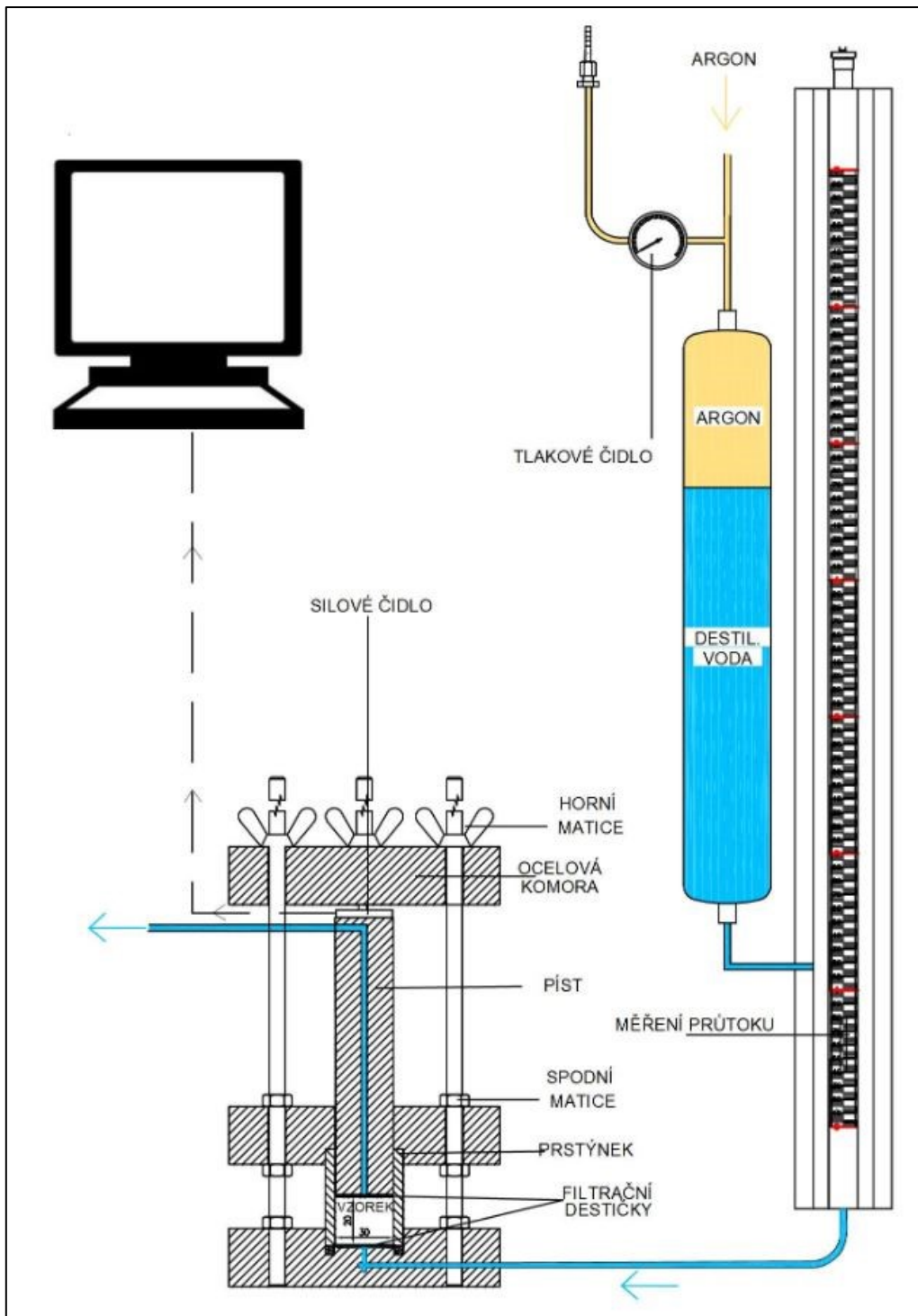


Obr. 7 Silové čidlo snímající napětí v propustoměru

4.7 Stanovení hydraulické vodivosti

Hydraulická vodivost se stanovuje přímým laboratorním vyhodnocením, které se rozděluje na měření v propustoměru s konstantním spádem, v propustoměru s proměnným spádem a v triaxiální komoře s konstantním spádem. Zkoušení těchto metod je stanoveno v ČSN CEN ISO/TS 17892-11 Stanovení propustnosti zemin při konstantním a proměnném spádu.

V této práci je využito metody měření hydraulické vodivosti v propustoměru s konstantním spádem, tj. s konstantním gradientem. Pro vyhodnocení je zásadní, aby byl vzorek plně nasycen. Na Obr. 8 je zobrazeno schéma propustoměru, který se využívá pro stanovení hydraulické vodivosti a bobtnacího tlaku v Centru experimentální geotechniky ČVUT.



Obr. 8 Schéma propustoměru v CEG ČVUT

Výpočet hydraulické vodivosti (k) vychází z Darcyho zákona pro rychlost ustáleného laminárního proudění:

$$v = k \cdot i.$$

kde:

v - Rychlost proudění ve vzorku [m/s]

i - Hydraulický sklon [m/m]

kde hydraulický sklon i je:

$$i = \frac{\Delta h}{\Delta l}$$

kde:

Δh - Hydraulická výška [m]

Δl - Dráha, kterou musí vodní částice projít zeminou [m]

kde hydraulická výška pro používaný způsob měření Δh je:

$$\Delta h = \frac{p}{\rho \times g}$$

kde:

p – Sytící tlak [Pa]

ρ – Objemová hmotnost kapaliny [kg/m³]

g – Gravitační zrychlení [m/s⁻²]

Hodnota hydraulické vodivosti k se vypočte dle:

$$k = \frac{q}{i \cdot A}$$

kde:

q - Množství kapaliny proteklé vzorkem [m³/s]

k - Hydraulická vodivost [m/s]

i - Hydraulický sklon [m/m]

A - Plocha vzorku kolmá na směr proudění [m²]

5 Modifikace propustoměru pro vícebodové měření bobtnacího tlaku

5.1 Proč měřit bobtnací tlak ve více bodech

Měření ve více bodech nám pomůže přiblížit vliv homogenity zkoušeného materiálu, kterým se tato práce věnuje. Dále toto měření může ověřit správnost hypotéz a naměřených hodnot bobtnacího tlaku. Naměřený tlak může být ovlivněn třením na plášti prstýnku, v kterém je vzorek nalisován. Lisováním z jedné strany může dojít k předepnutí vzorku a ovlivnění měření. Úvaha zkoumání je, že při měření na spodní a horní části vzorku budou naměřeny stejné hodnoty.

5.2 Důvody modifikace propustoměru

Na základě průběžných výsledků projektu BEACON (www.beacon-h2020.eu), proběhla diskuze ohledně stanovení a měření bobtnacího tlaku bentonitu. Dnes se bobtnací tlak vzorku standardně měří pouze jednobodově. V propustoměru je instalováno silové čidlo pouze na horní části pístu, který je vsazen do prstýnku se vzorkem. Schéma standardního propustoměru je na Obr. 8. Všechny laboratorní postupy pro stanovení hydraulické vodivosti a bobtnacího tlaku v Centru experimentální geotechniky ČVUT probíhají na těchto aparátech.

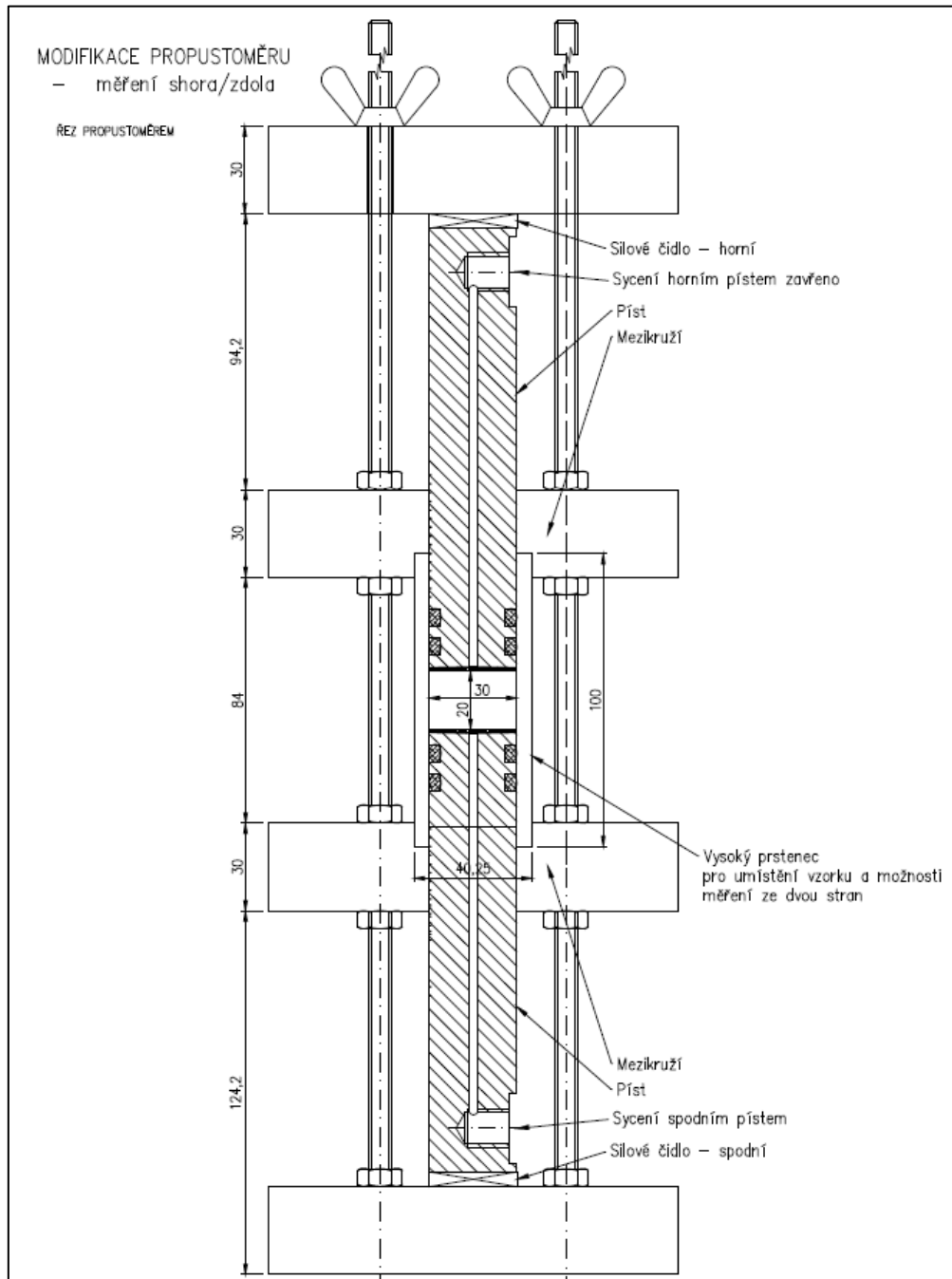
V rámci projektu BEACON se objevil názor, že by se bobtnací tlak měl měřit a ověřit na více místech vzorku. Na základě této hypotézy vznikla myšlenka sestavit v České republice takový aparát, na kterém by mohlo probíhat měření ve více bodech.

V první části této kapitoly je navržen prototyp modifikovaného propustoměru, na kterém jsou umístěna dvě silová čidla pro měření bobtnacího tlaku. Dále je tento aparát popsán a sestaven. Na takto připraveném modifikovaném propustoměru proběhlo první měření a vyhodnocení, které je v závěru práce popsáno.

5.3 Modifikace propustoměru a jeho popis

Základním prvkem pro sestavení modifikovaného propustoměru byl standardní propustoměr pro měření bobtnacího tlaku v jednom bodě. Schéma celého systému se standardním propustoměrem je na Obr. 8.

S ohledem na časovou náročnost experimentu byl sestaven aparát se dvěma silovými čidly. Návrh měřícího aparátu je zobrazen na Obr. 9.

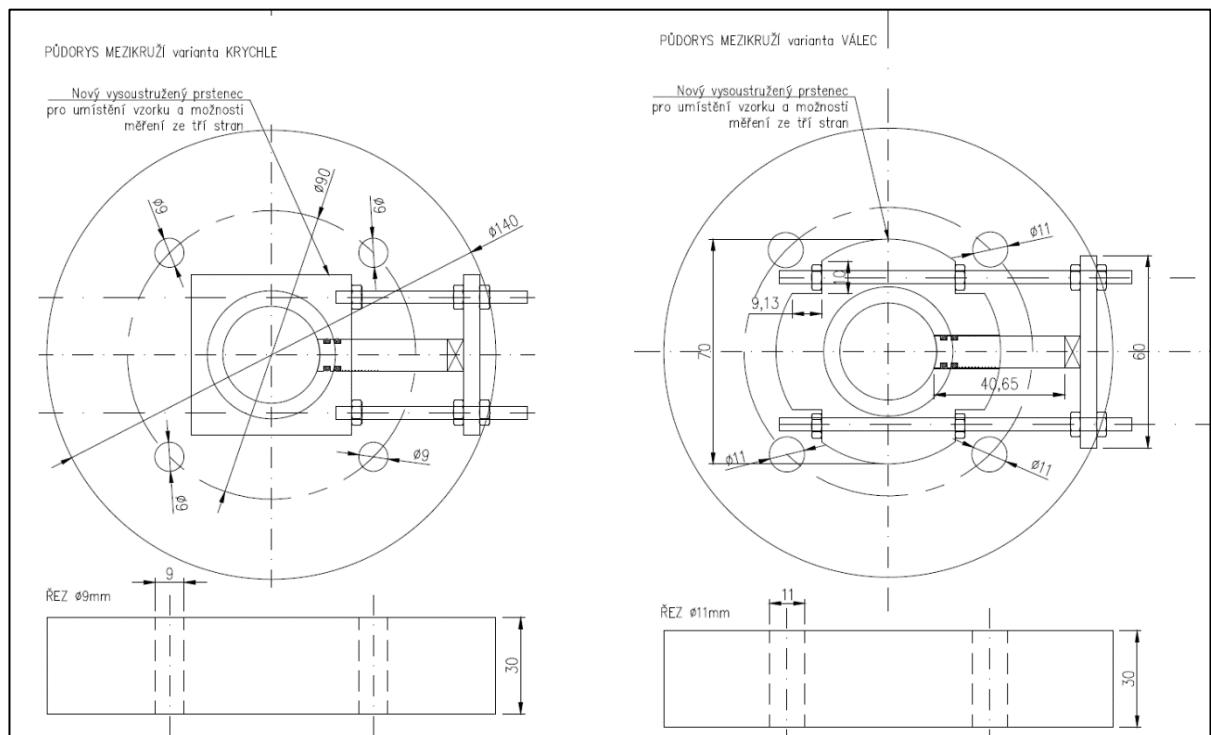


Obr. 9 Modifikovaný propustoměr pro měření shora a zdola

Byly použity prvky propustoměru, které jsou dostupné v laboratoři CEG. Aparát byl složen ze dvou podstav a dvou mezikruží, mezi kterými je prstavec s nalisovaným vzorkem. Prstavec má délku 100mm a je delší oproti standárnímu sestavení. Do prstence jsou zasunuty dva písky s karburovými destičkami. Měřicí silová čidla jsou umístěna mezi podstavami a horním a spodním pískem. Celá sestava byla zkompletována pomocí závitových tyčí, které bylo potřeba prodloužit. Aparát je ve výsledku dvakrát vyšší než původní.

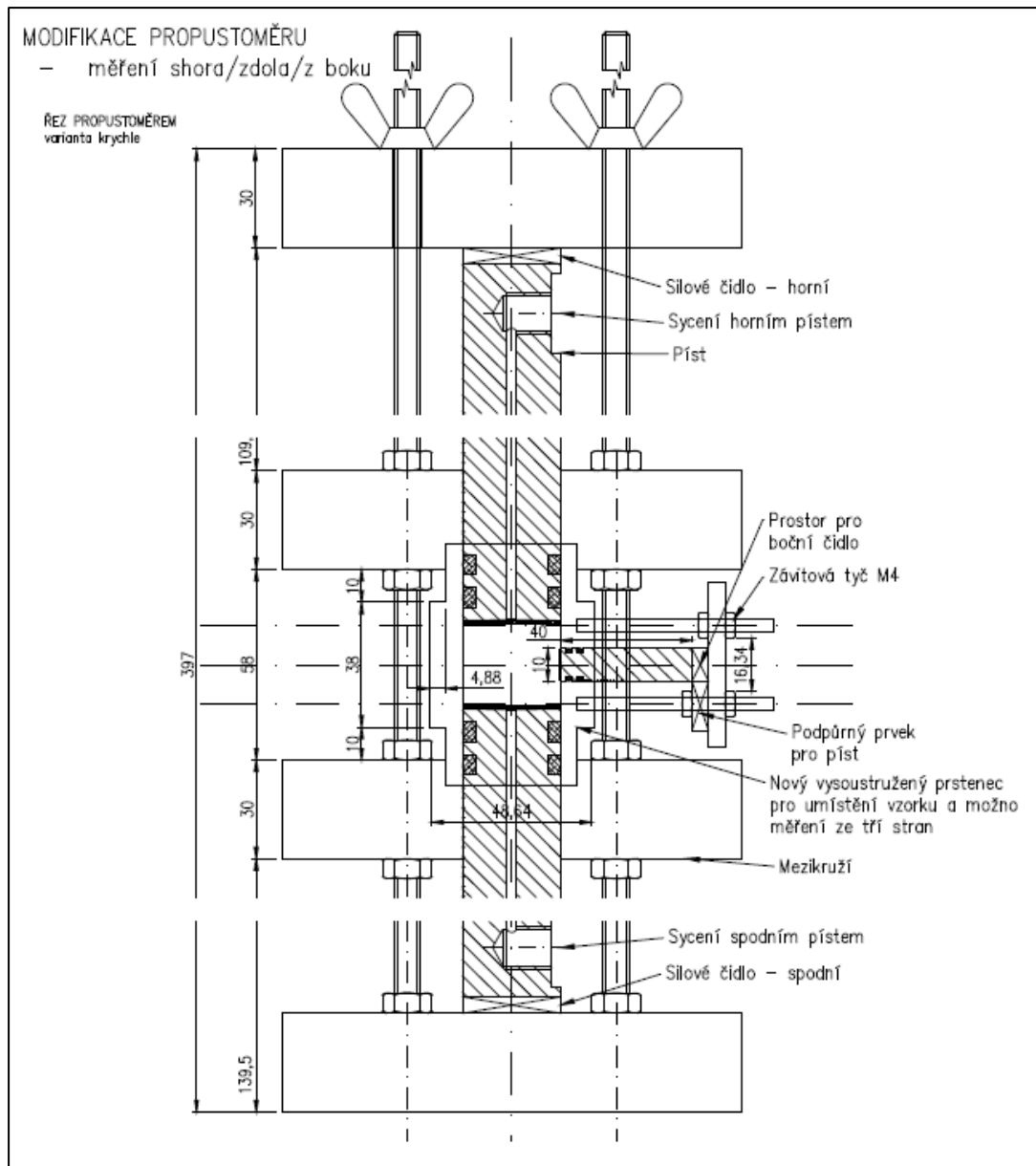
V rámci experimentální části byl sestaven prototyp toho měřícího aparátu a proběhlo na něm první měření ve dvou bodech.

Další myšlenka a možnost měření bobtnacího tlaku je měření ze tří stran (shora, zdola a z boku). Tato myšlenka je rozvinuta do dvou verzí. Středový prstavec tvaru krychle nebo tvaru válce (Obr. 10), do kterého by byl vyfrézován otvor pro píst. V prstenci by byly horizontálně zašroubovány závitové tyče. Tyto tyče by sloužily pro uchycení silového čidla, které by snímalo vzorek i z boku.



Obr. 10 Prototyp modifikovaného propustoměru - varianta krychle a válec

Princem celé sestavy je opět zachování stejných prvků, ze kterých se skládá standardní propustoměr. Aparát by byl doplněn jen o nový prstenec. Prstenec by umožnil vsazení tří pístů. Dva písty vertikálně (shora a zdola) a jeden píst horizontálně pro měření ze strany. Na Obr. 11 je první návrh prototypu modifikovaného propustoměru pro měření ze tří stran. Na tomto aparátu by bylo možné v budoucnu ověřit další skutečnosti o vlastnostech bobtnajících zemin a jílu.



Obr. 11 První návrh modifikovaného propustoměru pro měření ze tří stran

6 Kalibrace silových čidel

Silová čidla před zahájením měření musí být zkontrolována a ověřena jejich správnost měření, abychom eliminovali systematické chyby měření. Ověření čidel se provádí podle Interního dokumentu OL 182/112-102 – Interní ověřovací postup (IOP). Postup se využívá pro pravidelné kontrolní ověření správnosti měření zařízení. V této práci byla ověřována silová čidla k propustoměrům. Pro ověření čidel se užívá lis Instron na Obr. 12. Dále se používá ústředna pro zaznamenávání signálu při zatěžování čidel.



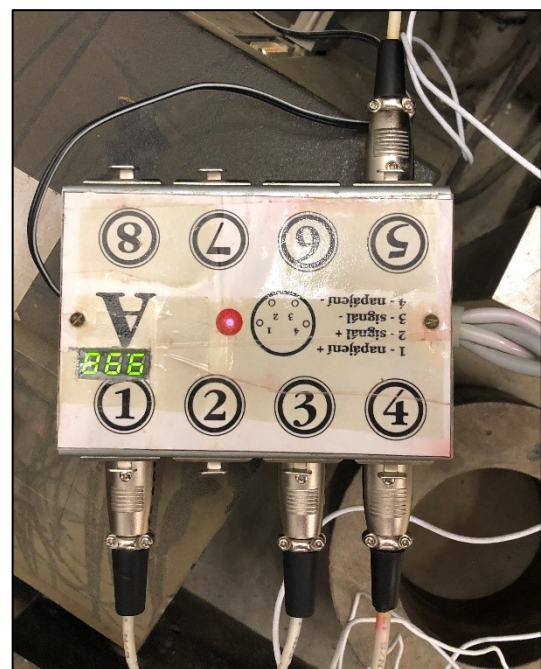
Obr. 12 Lis Instron

Nejprve byla provedena vizuální kontrola kabeláže a konektorů. Následně proběhla kontrola funkčnosti portů ústředny (Obr. 13) a adaptérů čidel (Obr. 14). Každé čidlo bylo zapojeno zvlášť do ústředny přes adaptér. V lisu byla nastavena předdefinovaná procedura podle rozsahu čidla. V této práci byla použita čidla s rozsahem do 13kN a do 17kN.

Poté bylo čidlo umístěno do lisu a byla spuštěna procedura zatěžování, po které byla stažena data z ústředny. Takto bylo zkoušeno každé čidlo zvlášť a kontrolní měření proběhlo dvakrát.



Obr. 13 Ústředna pro zaznamenávání signálu zatížení



Obr. 14 Adaptér pro zapojení silových čidel

Vyhodnocují se nulové hodnoty čidel, pro každé čidlo zvlášť. Získáme relativní hodnoty, které vyneseme do grafu. Pro každé čidlo vynášíme závislost milivolt na volt [mV/V] na síle na lisu [kN]. Kritérium pro vyhodnocení kalibrace je porovnání směrnice křivky s kalibrační konstantou danou výrobcem čidel. Rozdíl mezi směrníci křivky naměřených hodnot nesmí být větší než 10%. Pokud ano, čidlo ještě jednou překontrolujeme stejným postupem. Při rozdílu nad 10% s výrobní kalibrační konstantou se čidlo musí vyřadit. Limit 10% je velice orientační. Pokud bychom měřili s touto tolerancí, mohli bychom dostat nepřesné výsledky. Zásadním parametrem pro posouzení je lineární tvar křivky získaných hodnot, resp. jejich směrnice.

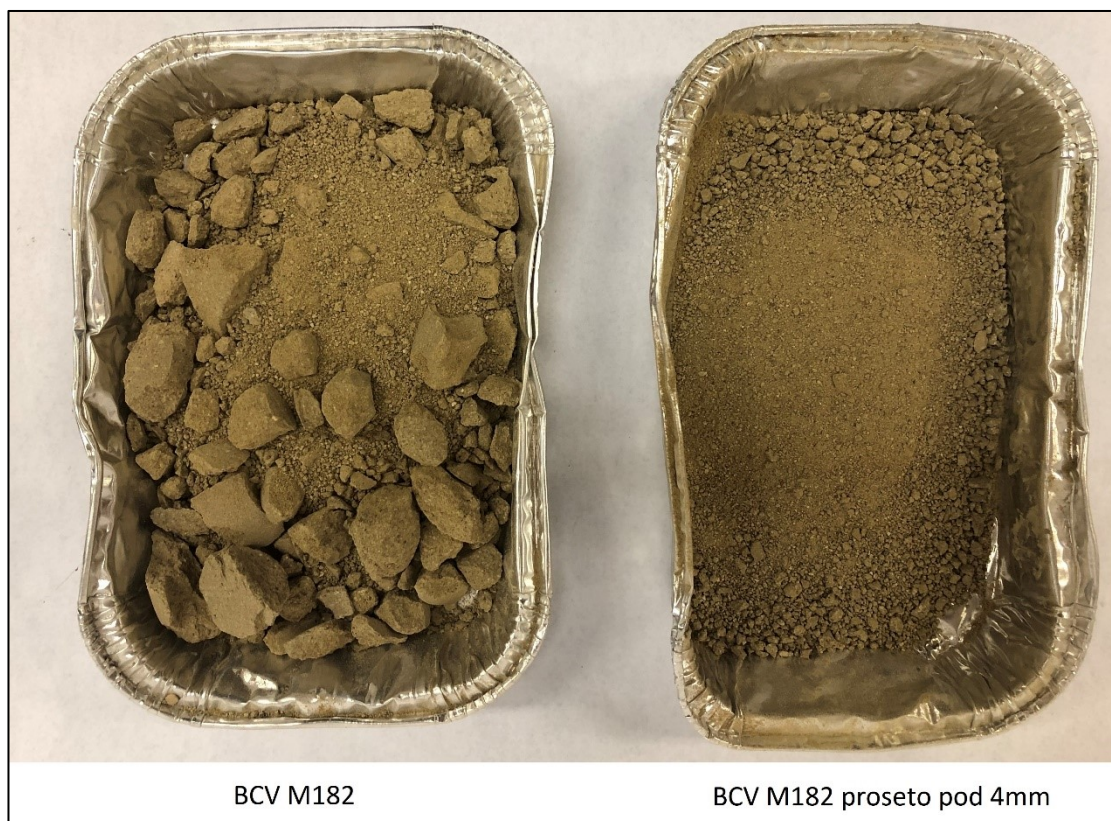
7 Experimentální část

V experimentální části byl zvolen jako referenční materiál český bentonit. Bentonit je označen BCV (Bentonit Černý Vrch). Jedná se o vápeno-hořečnatý bentonit (Ca-Mg). Tento materiál je komerčním produktem a pochází od firmy Keramost, a. s. Bentonit pochází z provozu Obrnice a je neaktivovaný.

Součástí experimentální části je také sestavení modifikovaného propustoměru pro měření bobtnacího tlaku shora a zdola

7.1 Referenční bentonit BCV

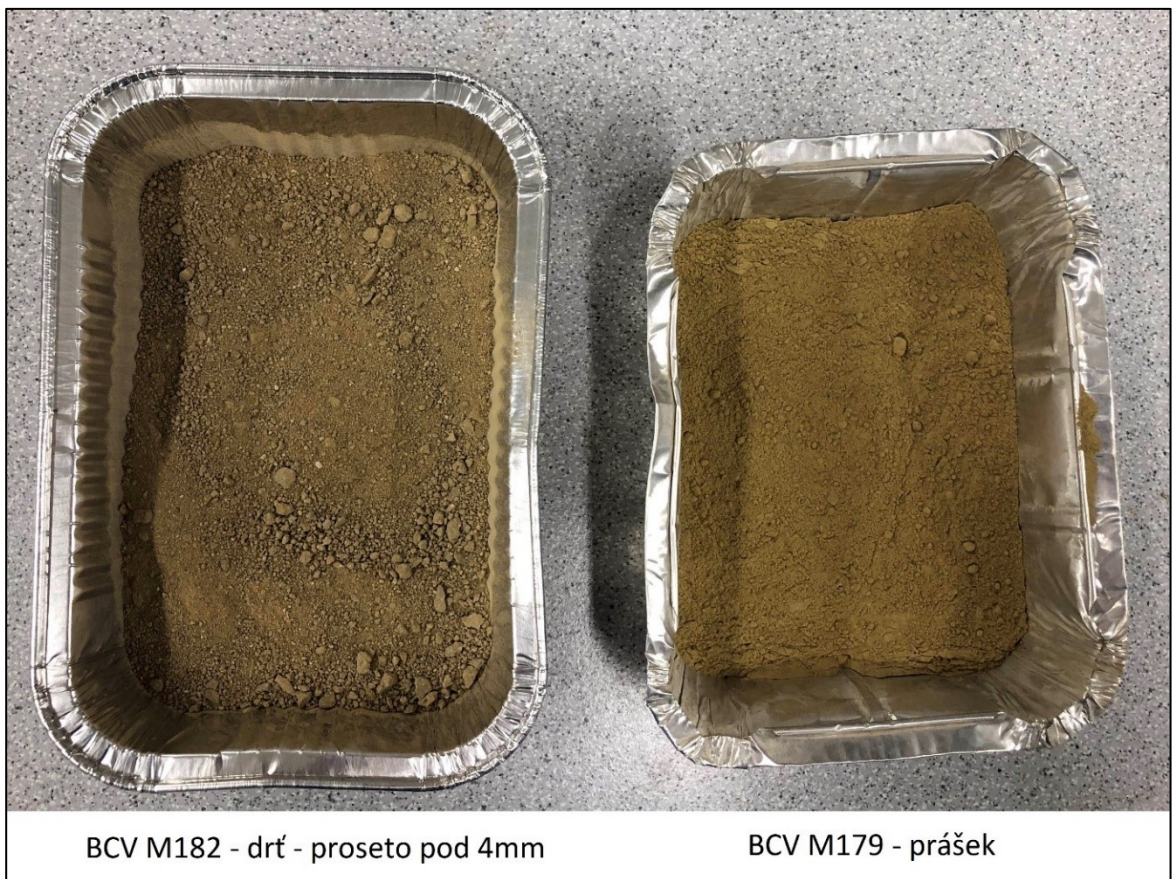
Materiál je vylisovaný kompaktozem a podrcený kladivovým drtičem. V této práci je materiál nazýván drť a je reprezentantem nehomogenního materiálu. Tato drť je označována BCV 2018. Interní označení laboratoře CEG je BCV M182, které je v této práci převzato. Materiál se lisuje při vlhkosti 4–5 %. Z technologického hlediska je toto rozmezí limitní, protože při nižší vlhkosti než 4 % se materiál téměř nelisuje. Pro všechny zkoušky v rozsahu této práce byla drť vždy proseta pod sítem o velikosti oka 4 mm.



Obr. 15 Bentonit BCV M182 (vlevo) a BCV M182 proseto pod sítem 4mm (vpravo)

S ohledem na nehomogenní materiál, v kterém se nachází i vyšší frakce než 15 mm. Na Obr. 15 je zobrazen surový materiál, který dodává Keramost a.s. a prosetý vzorek pod sítím 4 mm, který je v této práci zkoumán.

V rámci experimentální části pro zhodnocení vlivu (ne) homogenity byl vybrán druhý zástupce materiálu. Jedná se také o bentonit BCV, ale s označením BCV 2017. Interní označení laboratoře CEG je BCV M179, které je v této práci převzato. Jedná se o jemně mletý přírodní bentonit (prášek). Na Obr. 16 je zobrazen vzorek BCV prosetý přes síto 4mm a jemně mletý BCV prášek.



Obr. 16 Bentonit BCV M182 proseto pod 4 mm (vlevo) a BCV M179 - jemně mletý prášek (vpravo)

7.2 Zrnitostní rozbor BCV M182

V rámci experimentální práce byl proveden zrnitostní rozbor podle kapitoly 4.3. Celkem byly odebrány tři vzorky z jednoho pytle bentonitu BCV M182 – drť. Pro stanovení křivky zrnitosti byla použita sada normovaných sít (0,1; 0,2; 0,5; 1; 2; 4; 8; 15; a 30 mm). V tabulkách Tab. 1, Tab. 2 a Tab. 3 jsou zaznamenány hmotnostní zbytky na sítu, které jsou přepočteny na procentuální propady.

Zrnitostní rozbor			
materiál: BCV 182 - drť			
m vysušeného vzorku =		1523,75 g	
průměr zrna [mm]	zbytek na sítu [g]	celkem propad [g]	propad [%]
30	0	1524,44	100,00
15	376,1	1148,34	75,33
8	426,22	722,12	47,37
4	222,26	499,86	32,79
2	82,19	417,67	27,40
1	71,65	346,02	22,70
0,5	124,47	221,55	14,53
0,2	102,08	119,47	7,84
0,1	48,41	71,06	4,66
dno	71,06	0	0,00
suma:		1524,44 g	
suma propadů:		1524,44 g	
rozdíl před/ po (max. 1%):		0,05%	OK

Tab. 2 Zrnitostní rozbor BCV č.1

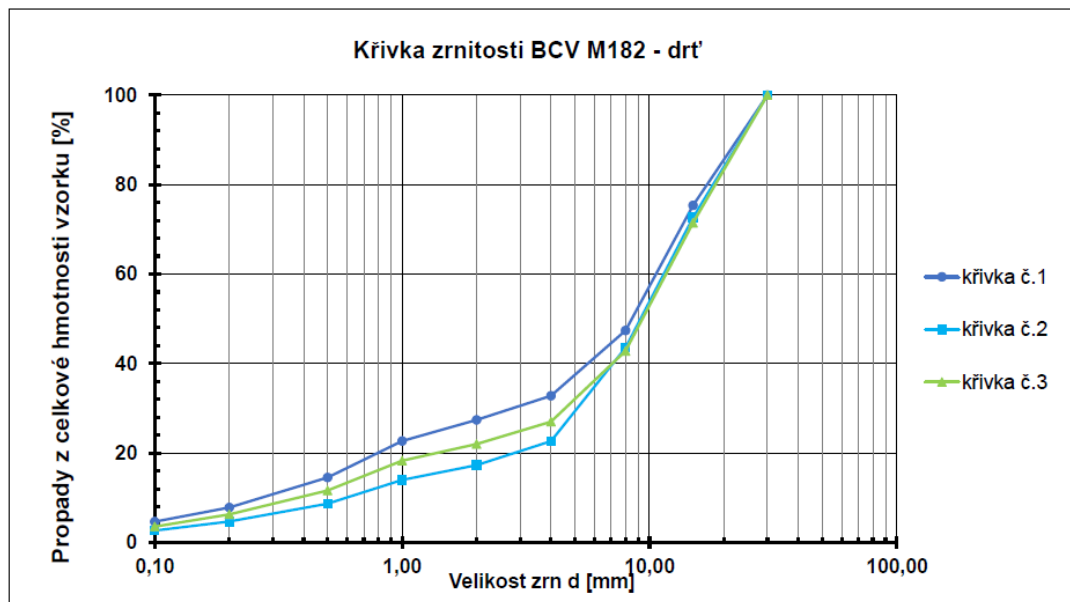
Zrnitostní rozbor			
materiál: BCV 182 - drť			
m vysušeného vzorku =		1442,55 g	
průměr zrna [mm]	zbytek na sítu [g]	celkem propad [g]	propad [%]
30	0	1444,31	100,00
15	395,57	1048,74	72,61
8	419,96	628,78	43,53
4	301,54	327,24	22,66
2	77,27	249,97	17,31
1	48,05	201,92	13,98
0,5	76,53	125,39	8,68
0,2	57,22	68,17	4,72
0,1	29,48	38,69	2,68
dno	38,69	0	0,00
suma:		1444,31 g	
suma propadů:		1444,31 g	
rozdíl před/ po (max. 1%):		0,12%	OK

Tab. 3 Zrnitostní rozbor BCV č.2

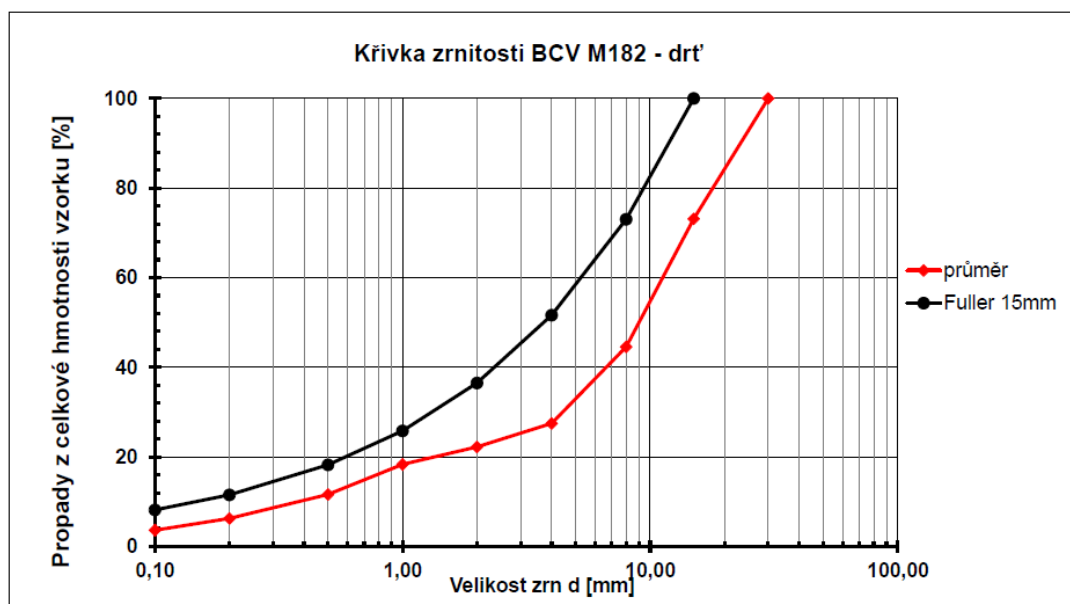
Zrnitostní rozbor			
materiál: BCV 182 - drť			
m vysušeného vzorku =		1487,6 g	
průměr zrna [mm]	zbytek na sítu [g]	celkem propad [g]	propad [%]
30	0	1488,35	100,00
15	425,38	1062,97	71,42
8	425,94	637,03	42,80
4	235,17	401,86	27,00
2	74,08	327,78	22,02
1	55,39	272,39	18,30
0,5	99,05	173,34	11,65
0,2	79,6	93,74	6,30
0,1	40,7	53,04	3,56
dno	53,04	0	0,00
suma:		1488,35 g	
suma propadů:		1488,35 g	
rozdíl před/ po (max. 1%):		0,05%	OK

Tab. 1 Zrnitostní rozbor BCV č.3

Vyhodnocení zkoušky a grafické znázornění křivek zrnitosti pro jednotlivé zrnitostní rozbory jsou na Graf. 2. Z grafu je zřejmé, že v dodaném balení materiálu BCV M182 jsou křivky zrnitosti obdobné. Tedy zastoupení frakce je velmi stejnorodé. Nachází se zde i frakce větší než 15 mm. Z tohoto důvodu pro následující zkoušení bylo po odebrání vzorku vždy proseto pod sítem 4 mm, abychom vzorek mohli zkoumat s ohledem na omezenou velikost zkušebních aparátů. V rozsahu této práce je materiál dostatečně nehomogenní i po prosetí pod 4 mm. Pro lepší charakteristiku zrnitosti daného vzorku je na Graf. 1 znázorněn průběh křivky zrnitosti z průměrů procentuálních propadů z jednotlivých měření a je doplněna ideální křivka zrnitosti podle Fullera pro velikost síta 15mm



Graf. 2 Křivky zrnitosti pro jednotlivé zrnitostní rozbory



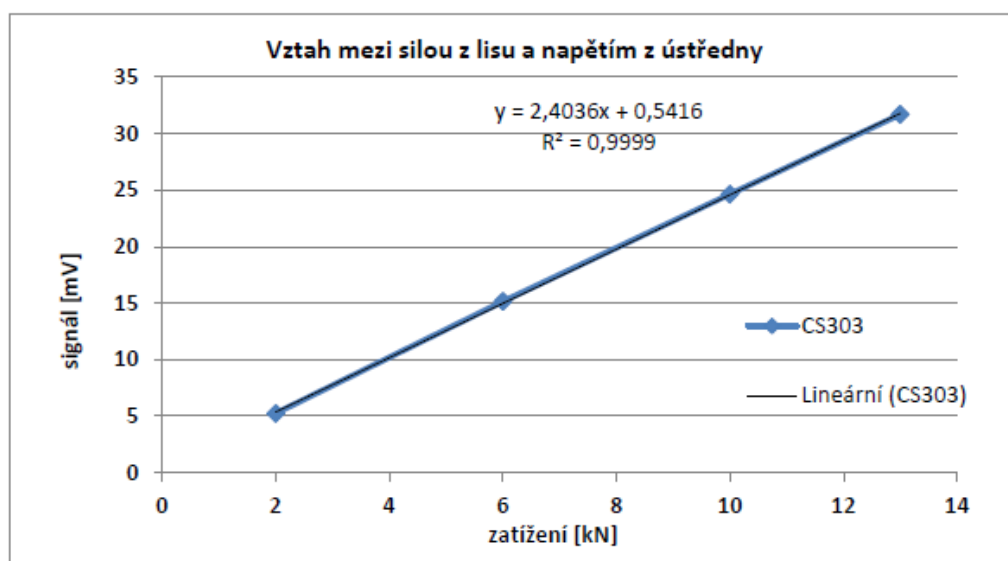
Graf. 1 Křivka zrnitosti pro průměr procentuálních propadů a ideální křivka podle Fullera

7.3 Vyhodnocení kalibrace silových čidel

Před zahájením měření v propustoměrech byla ověřena kalibrační konstanta z certifikovaného silového čidla. Kalibrace probíhala dle kapitoly 6, kvůli eliminaci systematických chyb měření. Celkem bylo ověřováno pět silových čidel. Tři silová čidla s označením CS303, CS304 a CS307. Tato čidla mají rozsah do 13kN. Další dvě silová čidla s označením CS427 a CS428 mají rozsah do 17kN. V Tab. 4, Tab. 5, Tab. 6, Tab. 7 a Tab. 8 je záznam z jednotlivých zatěžování čidel lisem a záznam signálu z ústředny. Dále byla stanovena odezva signalu pro rozsah, kdy lis držel dané zatížení na čidle. Z tohoto záznamu je sestavena lineární funkce na Graf. 3, Graf. 4, Graf. 5, Graf. 6 a Graf. 7. Z těchto křivek je stanovena jejich směrnice, která udává kalibrační koeficient.

KALIBRACE SILOVÝCH ČIDEL do 13kN					
CS303		kal. Faktor:	2,3181	rozsah:	13,345
zatížení od lisu [kN]	naměřené hodnoty na čidle				o kolik je větší tovární při plném zatížení
	V/V	V	mV	mV*kN	
0	-0,0003	-0,00003	-0,03		
2	0,003917	0,0003917	0,3917	5,2272365	
6	0,011342	0,0011342	1,1342	15,135899	
10	0,01845	0,001845	1,845	24,621525	
13	0,02375	0,002375	2,375	31,694375	
0	-0,0003	-0,00003	-0,03		
max. rozsah			továrna	směrnice	
13,345			2,3181	2,4036	-4%

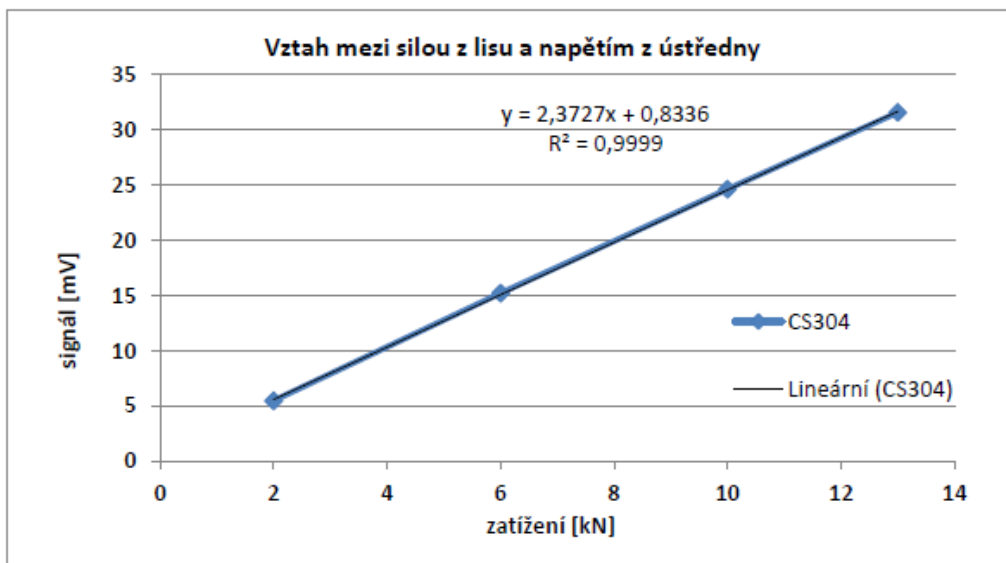
Tab. 4 Záznam lisu a ústředny pro CS303



Graf. 3 Vztah mezi silou lisu a signálem z ústředny a její směrnice pro CS303

CS304		kal. Faktor: 2,3057		rozsah: 13,345	
zatížení lis	naměřené na čidle			o kolik je větší tovární při plném zatížení	
[kN]	V/V	V	mV	mV*kN	
0	0,0002	0,00002	0,02		
2	0,0041	0,00041	0,41	5,47145	
6	0,0114	0,00114	1,14	15,2133	
10	0,01845	0,001845	1,845	24,621525	
13	0,0236667	0,00236667	2,36667	31,58321115	
0	0,0002	0,00002	0,02		
max. rozsah 13,345			továrna 2,3057	směrnice 2,3727	-3%

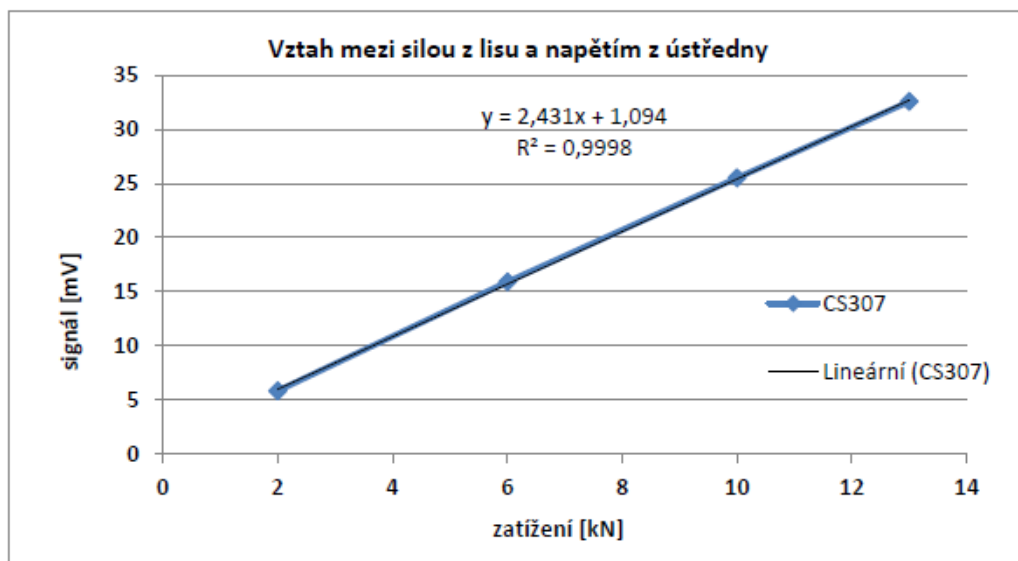
Tab. 6 Záznam lisu a ústředny pro CS304



Graf. 4 Vztah mezi silou lisu a signálem z ústředny a její směrnice pro CS304

CS307		kal. Faktor: 2,3495		rozsah: 13,345	
zatížení lis	naměřené na čidle			o kolik je větší tovární při plném zatížení	
[kN]	V/V	V	mV	mV*kN	
0	0,0003	0,00003	0,03		
2	0,00435	0,000435	0,435	5,805075	
6	0,0119	0,00119	1,19	15,88055	
10	0,0191	0,00191	1,91	25,48895	
13	0,0244	0,00244	2,44	32,5618	
0	0,0003	0,00003	0,03		
max. rozsah 13,345			továrna 2,3495	směrnice 2,431	-3%

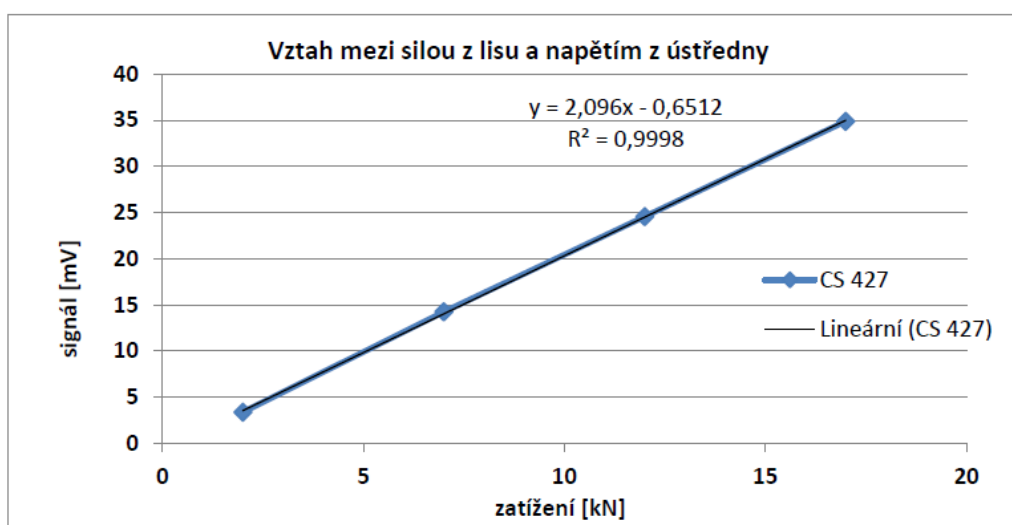
Tab. 5 Záznam lisu a ústředny pro CS307



Graf. 6 Vztah mezi silou lisu a signálem z ústředny a její směrnice pro CS307

KALIBRACE SILOVÝCH ČIDEL do 17kN						
CS 427	kal. Faktor:	2,0294			rozsah:	17,793
zatížení lisu [kN]	naměřené hodnoty na čidle				mV*kN	o kolik je větší tovární při plném zatížení
	V/V	V	mV			
0	-0,0009	-0,00009	-0,09			
2	0,0019	0,00019	0,19	3,38067		
7	0,008	0,0008	0,8	14,2344		
12	0,0138	0,00138	1,38	24,55434		
17	0,0196	0,00196	1,96	34,87428		
0	-0,0009	-0,00009	-0,09			
max. rozsah 17,793		továrna 2,0294	směrnice 2,096			-3%

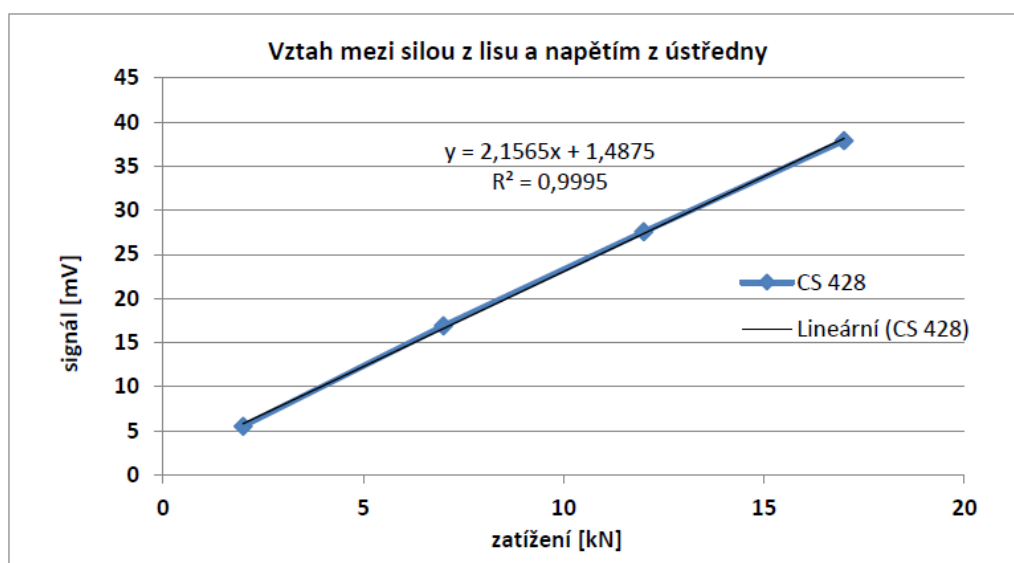
Tab. 7 Záznam lisu a ústředny pro CS427



Graf. 5 Vztah mezi silou lisu a signálem z ústředny a její směrnice pro CS427

CS 428		kal. Faktor: 2,0243		rozsah: 17,793	
zatížení lisu [kN]	naměřené hodnoty na čidle			mV*kN	o kolik je větší tovární při plném zatížení
	V/V	V	mV		
0	0,0004	0,00004	0,04		
2	0,0031	0,00031	0,31	5,51583	
7	0,0095	0,00095	0,95	16,90335	
12	0,0155	0,00155	1,55	27,57915	
17	0,0213	0,00213	2,13	37,89909	
0	0,0004	0,00004	0,04		
max. rozsah 17,793			továrna 2,0243	směrnice 2,1565	-7%

Tab. 8 Záznam lisu a ústředny pro CS428



Graf. 7 Vztah mezi silou lisu a signálem z ústředny a její směrnice pro CS428

Nové kalibrační konstanty (směrnice křivek) byly posouzeny s výrobními kalibračními konstantami. Bylo ověřeno, že rozdíl mezi nimi není větší než 10%. Průměrná odchylka kalibračních konstant od výrobních jsou 4%. Hlavním parametrem posouzení správnosti měření čidel je především lineární tvar křivky. Z jednotlivých grafů je vidět linearita funkcí a hodnota koeficientu spolehlivosti blížící se jedné. Proto je možné další vyhodnocení uvažovat bez dalších úprav. Tímto jsme ověřili funkčnost a správnost měření silových čidel.

7.4 Sestavení modifikovaného propustoměru

Měřicí zařízení pro vícebodové měření je sestaveno ze součástí popsanych na Obr. 9 v kapitole 5.3. Jedná o dostupné komponenty v laboratoři CEG ČVUT. V propustoměru je nahrazen prstýnek pro nalisování vzorku. Použitý prstýnek má výšku 100 mm, abychom do něj mohli instalovat vzorek a dva písty. Jeden píst shora a druhý zdola. S ohledem na výšku aparátu bylo nutné použít delší závitové tyče pro sestavení celého aparátu.

Vzorek bentonitu BCV M182 byl proset přes síto velikosti 4 mm a odebráno přesně 23,98g, tak abychom získali cílenou objemovou hmotnost sušiny $1,6 \text{ Mg/m}^3$. Takto odebraný a zvážený vzorek byl nalisován do prstýnku. Cílená výška vzorku byla 20 mm. Příprava vzorku před lisováním je na Obr. 18 a lisování vzorku na Obr. 17.

Poté byl celý aparát instalován včetně silových čidel, které jsou umístěné na spodním a horním pístu. Abychom zamezili možnému posunu mezikruží a negativnímu vlivu na vzorek, je nutné mezikruží zafixovat dvojicí matic. Na každé závitové tyči a na obou mezikružích aparátu jsou instalovány matice. Realizovaná sestava modifikovaného propustoměru je na Obr. 19.

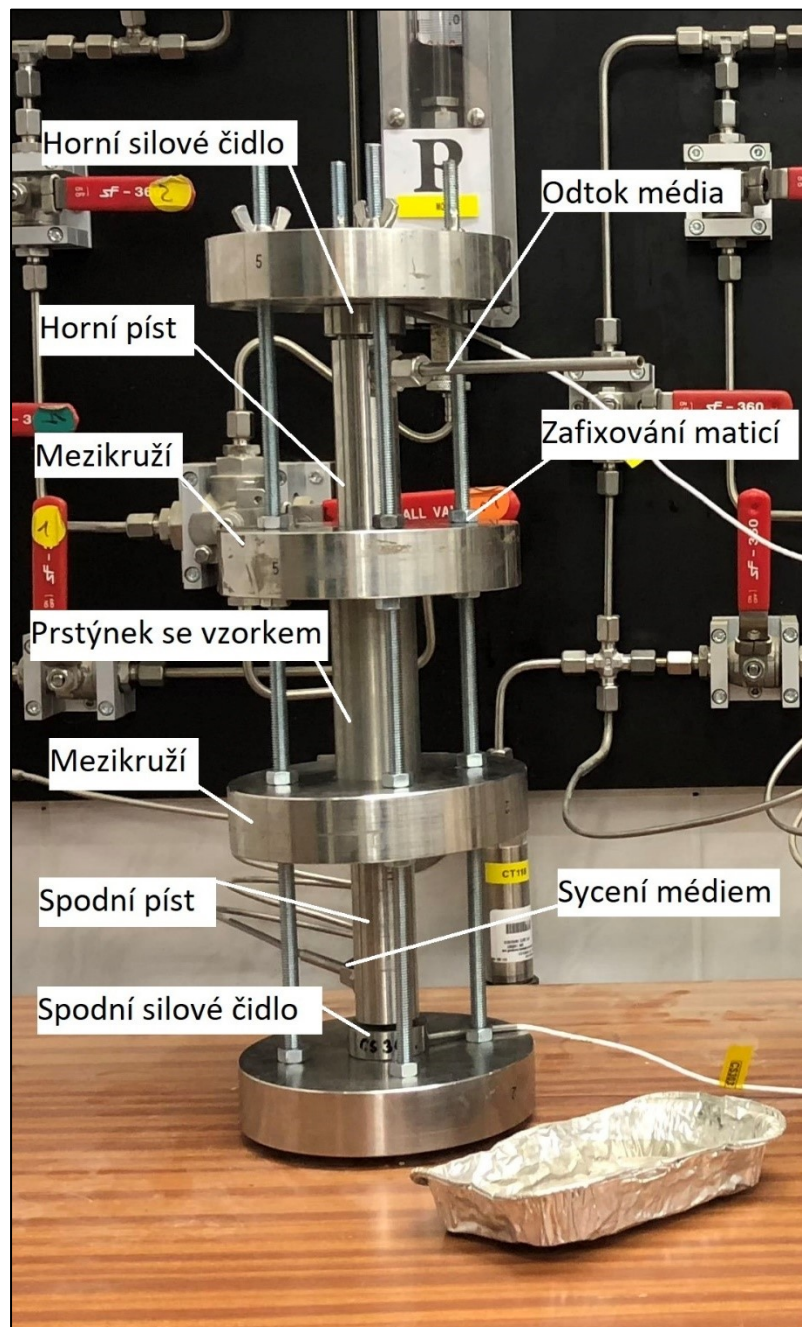


Obr. 18 Příprava vzorku před lisováním



Obr. 17 Lisování vzorku do prstýnku

V posledním kroku byla všechna čidla připojena k ústředně, která zapisuje napětí na čidle. Zároveň je nutná kontrola, zda se data na ústřednu zapisují. Následně se pustí sycení propustoměru pod tlakem 1,0MPa. Všechny počáteční parametry jako je vlhkost, rozměry vzorku, označení silových čidel, tlakových čidel sycícího média, ústředěn a označení propustoměru je zapsáno do protokolu o zkoušce. Tento protokol je doplněn při ukončení zkoušky o vlhkost a rozměry vzorku po rozebrání. Všechny zkušební protokoly jsou přílohou této práce.



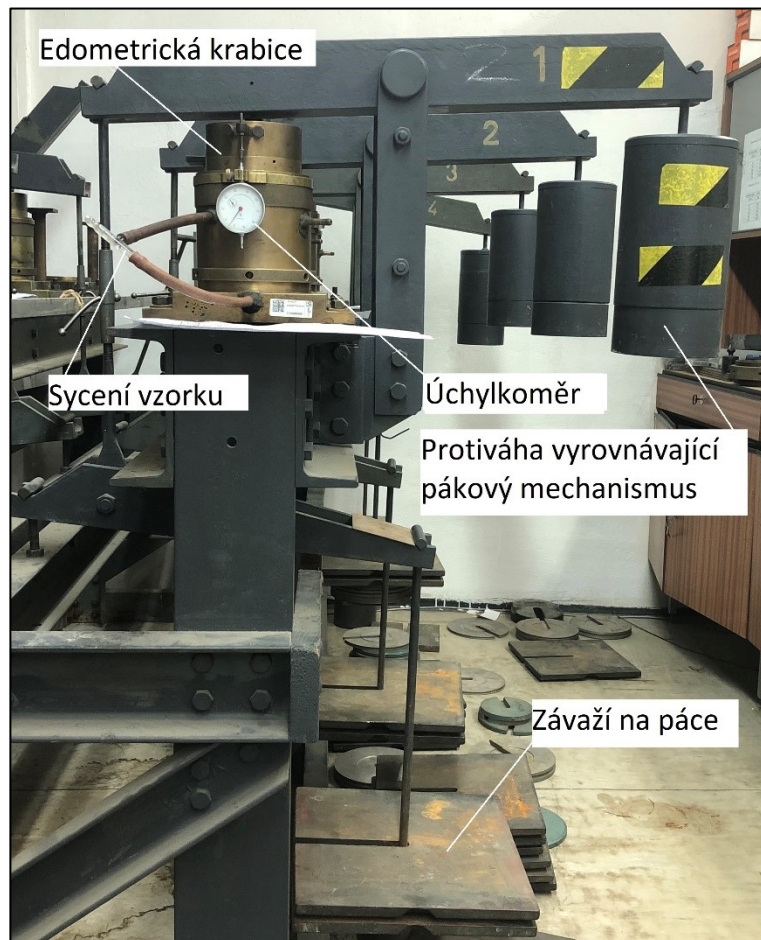
Obr. 19 Sestavený modifikovaný propustoměr

7.5 Sestavení edometru

Toto laboratorní zkoumání probíhalo v laboratořích CEG ČVUT v Dejvicích. V této části pro stanovení bobtnacího tlaku a konsolidace byl použit edometr s pákovým mechanismem. Pákový převodový poměr je 10, tzn. hmotnost, kterou přidáme na páku působí 10krát větší silou na edometr. Edometry byly vybaveny úchylkoměry, ze kterých se zaznamenávalo čtení deformací vzorku. Edometr s pákovým mechanismem je na Obr. 20.

Před zahájením zkoušky byly změřeny rozměry všech komponentů edometru pro následující stanovení objemu vzorku a možnou budoucí kontrolu. Byla změřena hloubka pístu včetně karburových destiček a jeho průměr. Tyto veličiny slouží pro stanovení velikosti vzorku. Každé měření probíhalo třikrát a pro vyhodnocení se zprůměrovalo.

Vzorek bentonitu BCV M182 byl proset pod sítem 4 mm a navážka každého vzorku měla 252,85g. Vzorek byl jemně zhutněn v misce edometru. Po sestavení edometru se změnil přesah pístu pro stanovení celkové výšky vzorku.



Obr. 20 Sestava edometru s pákovým mechanismem

V této práci byly zvoleny dva postupy zkoušení. Dva edometry byly sestaveny a od počátku zasyceny vodou (Obr. 21). Po ustálení volného bobtnání teprve začalo krokové zatěžování vzorku. Další tři edometry byly sestaveny bez zasycení vodou a krokově zatěžovány. Po dosažení váhy na páce 80 kg a po konsolidaci bentonitu byly teprve vzorky zasyceny vodou. Po ustálení bobtnání byly vzorky opět krokově odtěžovány.

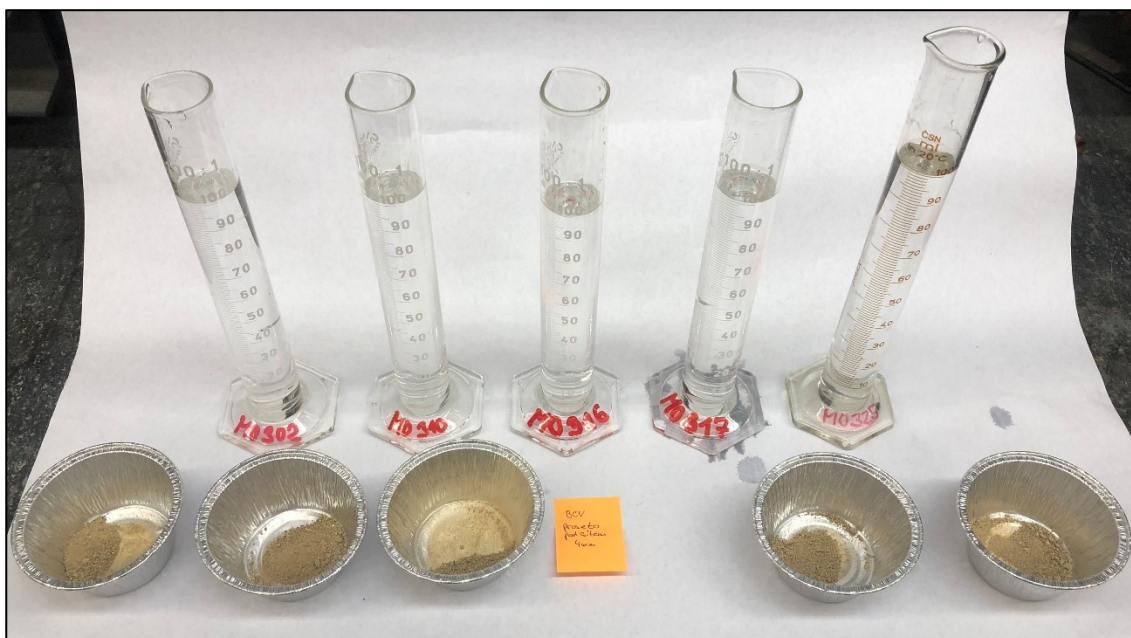
Jedná se o odvodněnou zkoušku stlačitelnosti bez pórového tlaku. Zatížení na edometr je úměrné zatížení na vzorek. Po přepočtu silového účinku na plochu vzorku dostáváme napětí, které je rovno bobtnacímu tlaku při dané objemové hmotnosti sušiny.



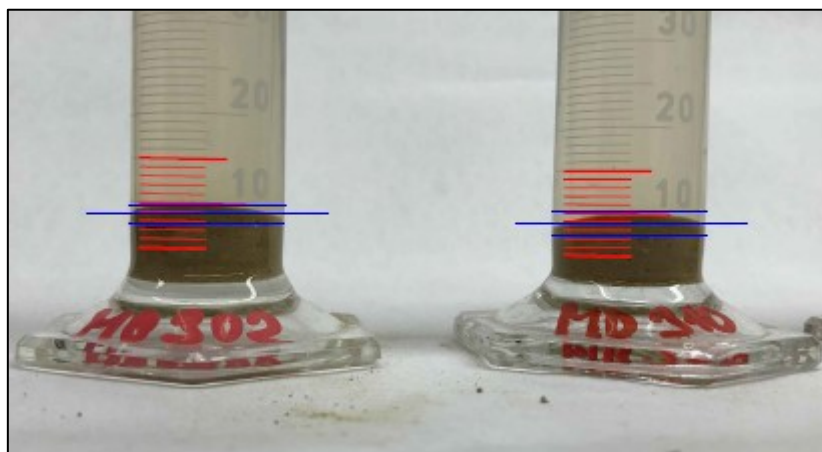
Obr. 21 Edometr zasycený vodou

7.6 Stanovení swell indexu

Swell index je stanoven dle kapitoly 3.6. Vzorek bentonitu BCV 182 byl proset pod sítem 4 mm a předem vysušen při 110°C. Zkouška probíhala na pěti vzorcích o hmotnosti cca 2,0 g. Do odměrných válců byla nalita destilovaná voda o objemu 100 ml. Odměrné válce a navážka vzorku je na Obr. 23. Každých 10 minut bylo do válců přidáváno 0,1 g vzorku. Po nasypání celé navážky byl swell index vyhodnocen po 24 hodinách bobtnání bentonitu v destilované vodě (Obr. 22). Stejný postup byl použit pro vyhodnocení BCV M179 - prášek. V Tab. 10 a Tab. 9 je označení vzorků a jejich hmotnosti včetně vyhodnocení jako průměr naměřených hodnot. Na Graf. 8 je grafické vyhodnocení swell indexu pro prášek a pro drť.



Obr. 23 Odměrné válce a navážka bentonitu před zahájením zkoušky SI



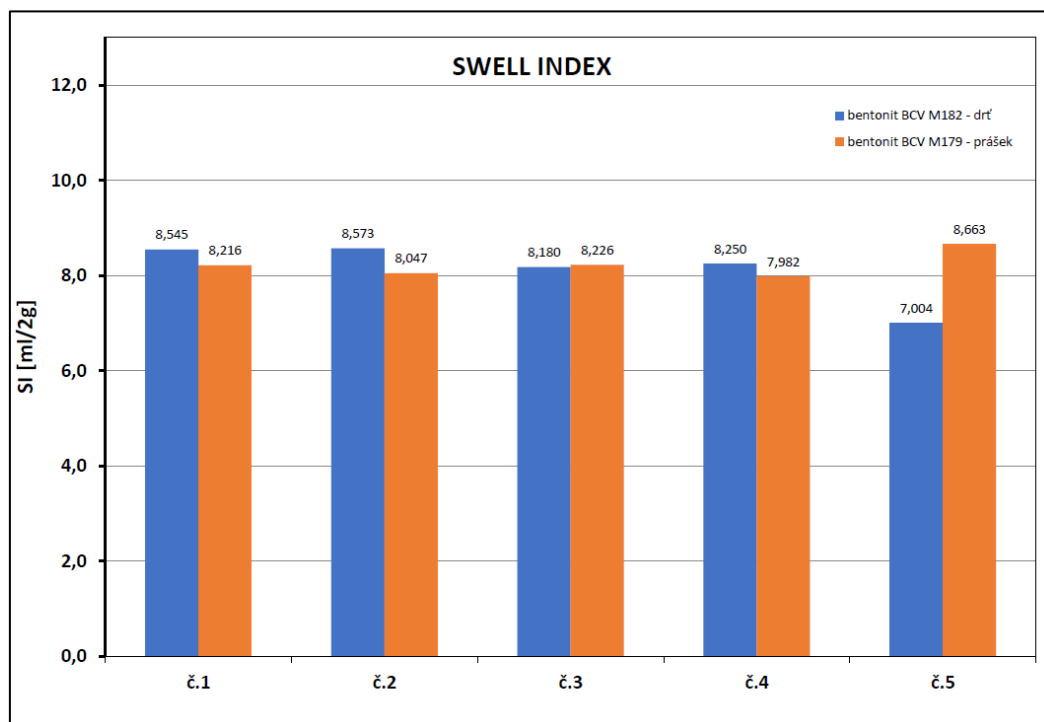
Obr. 22 Vzorek po 24hod v destilované vodě

Swell index					
materiál:	bentonit BCV M182 - drť				
vzorek:	č.1	č.2	č.3	č.4	č.5
vlhkost [%]	0	0	0	0	0
hmotnost [g]	2,048	2,053	2,005	2,012	1,999
objem po 24h [ml]	8,75	8,8	8,2	8,3	7
SI [ml/2g]	8,545	8,573	8,180	8,250	7,004
SI [ml/2g]			8,110 ml/2g		

Tab. 10 Stanovení swell indexu bentonitu BCV - drť

Swell index					
materiál:	bentonit BCV M179 - prášek				
vzorek:	č.1	č.2	č.3	č.4	č.5
vlhkost [%]	0	0	0	0	0
hmotnost [g]	2,069	2,113	2,066	2,130	1,847
objem po 24h [ml]	8,5	8,5	8,5	8,5	8
SI [ml/2g]	8,216	8,047	8,226	7,982	8,663
SI [ml/2g]			8,227 ml/2g		

Tab. 9 Stanovení swell indexu bentonitu BCV - prášek



Graf. 8 Grafické vyhodnocení swell indexu drť a prášek

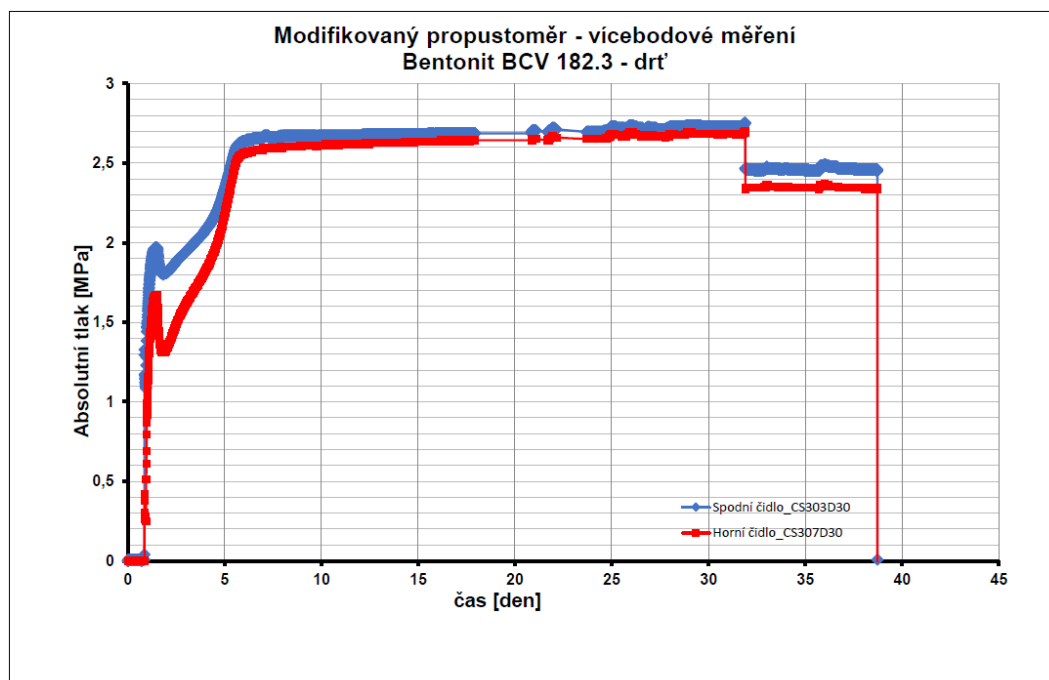
8 Vyhodnocení bobtnacího tlaku a hydraulické vodivosti

V rámci experimentální části práce bylo použito pro stanovení bobtnacího tlaku modifikovaného propustoměru pro měření shora a zdola, standardního propustoměru a edometru s pákovým mechanismem. Pro stanovení vlivu (ne) homogenity byl bobtnací tlak stanoven pro dva reprezentativní vzorky materiálu. Vzorek nehomogenního materiálu je bentonit BCV M182 – drť, který byl prosetý přes síto o velikosti 4 mm. Vzorek homogenního materiálu je bentonit BCV M179 – prášek.

8.1 Bobtnací tlak na modifikovaném propustoměru

Pro vícebodové měření bobtnacího tlaku byly použity dva typy vzorku BCV (BCV M182 a M179). Měření probíhalo na novém aparátu s použitím dvou silových čidel umístěné nad horním pístem a pod spodním pístem.

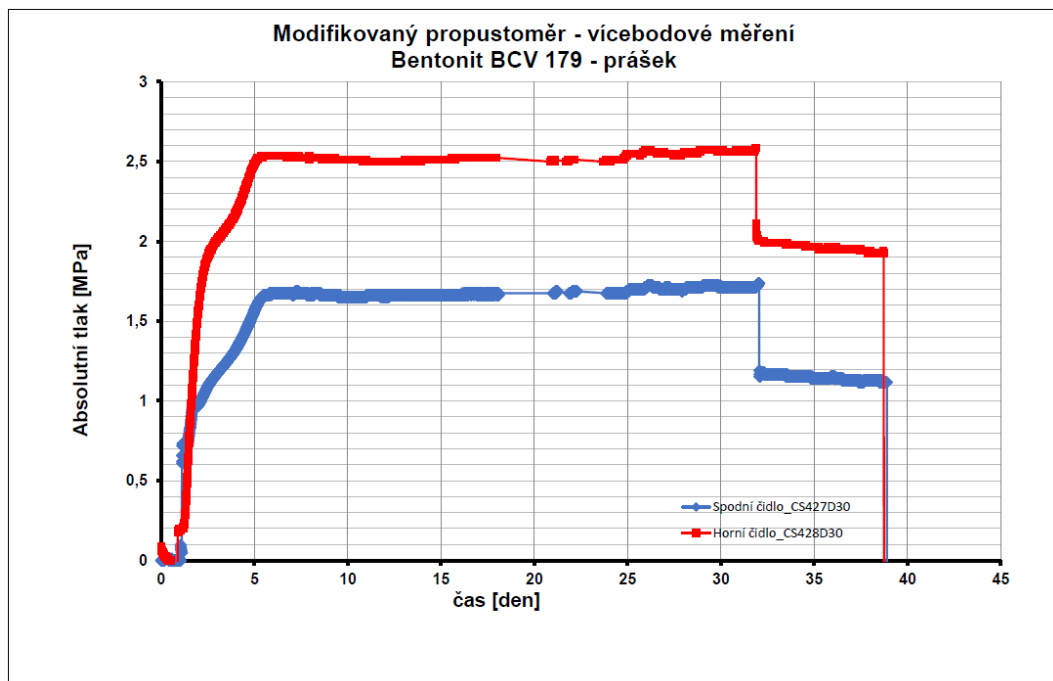
Vyhodnocení na Graf. 9 je pro nehomogenní vzorek – drť. Z průběhu na Graf. 9 je patrné, že nárůst absolutního tlaku na spodním čidle (modře) bylo mnohem rychlejší než na horním čidle. Toto je způsobeno sycením vzorku zespodu. Tedy je patrný vliv sytícího tlaku na naměřené hodnoty.



Graf. 9 Průběh absolutního tlaku v čase na modifikovaném propustoměru - drť

Po plném nasycení vzorku, které je poměrně rychlé s ohledem na frakci vzorku se hodnoty čidel ustalují na velice podobné hodnotě. Silová čidla jsou ovlivněna sytícím tlakem. Tedy je potřeba v aparátu vypnout sytící tlak a nechat hodnoty ustálit, abychom mohli stanovit hodnotu bobtnacího tlaku. Hodnota bobtnacího tlaku na obou čidlech je velice blízká. Bobtnací tlak na spodním čidle je 2,451 MPa na horním čidle 2,338 MPa. Tyto hodnoty jsou zapsány v příloze 15.1 v protokolu P669.

Další vyhodnocení bobtnacího tlaku je pro vícebodové měření na homogenním vzorku. Předpokladem měření bylo, že obě čidla po ustálení budou opět měřit velice podobně. Bohužel po vyhodnocení je patrné na Graf. 10, že spodní čidlo nedosáhlo tak vysokého absolutního tlaku jako horní čidlo, i když spodní čidlo došlo do kontaktu s vodou dříve. Ani po vypnutí sytícího tlaku se hodnoty bobtnacího tlaku k sobě nepřiblížily. Hodnota na spodním čidle je 1,116 MPa a na horním čidle je 1,840 MPa. Data ke zkoušce jsou vedeny pod číslem protokolu P670. Tato anomálie může být způsobena vyplavením vzorku syčením pod tlakem, ale po rozebrání došlo ke kontrole objemové hmotnosti, která vyplavení nevykazuje. Dále rozdíl může být způsoben vadným silovým čidlem, které ale bylo před zkouškou ověřeno kalibrací. Toto čidlo mělo vysoké nulové čtení -0,831 MPa.



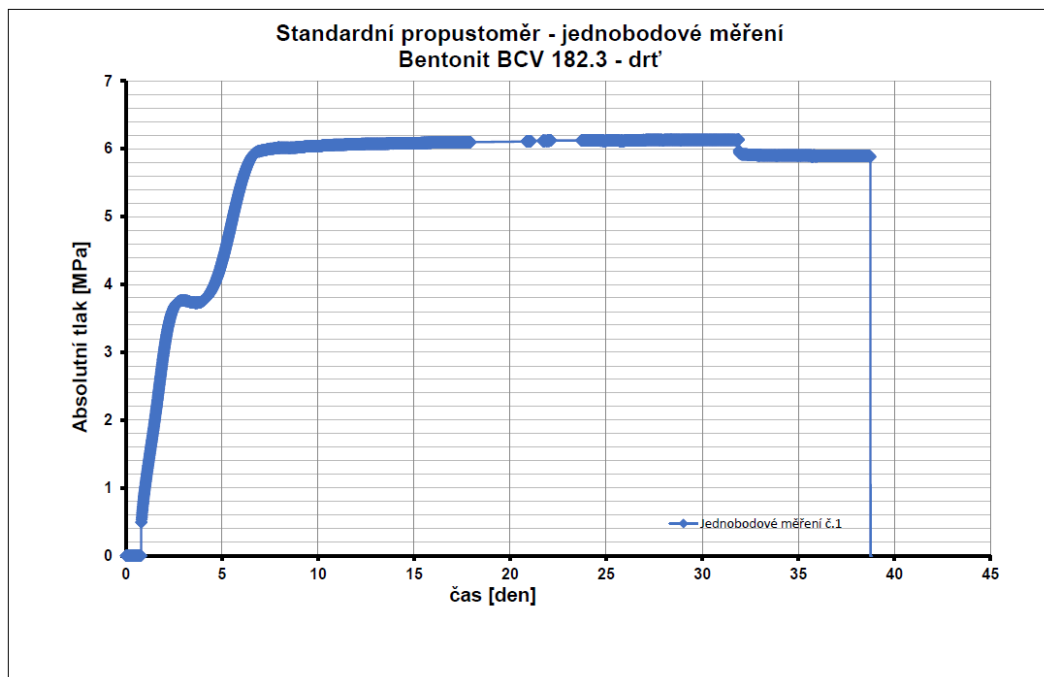
Graf. 10 Průběh absolutního tlaku na modifikovaném propustoměru - prášek

Poslední možností je nevhodného umístění sycení vzorku. Sycení vzorku je přímo našroubováno na pístu. Píst se vlivem bobtnání posouvá a silové čidlo snímá toto napětí. Tedy záznam průběhu tlaku mohl být negativně ovlivněn odporem nerezové hadičky pro sycení. Způsob sycení a spirálovitá hadička je vidět na Obr. 19 v kapitole 7.4.

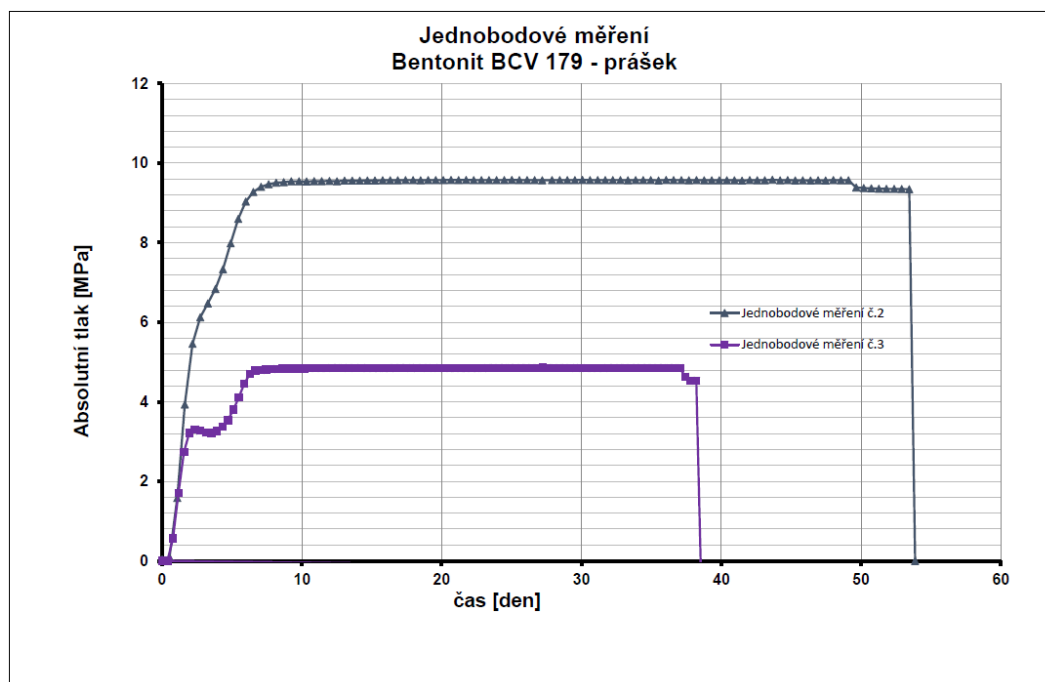
Jedná se o měřicí prototyp, s kterým nejsou doposud žádné zkušenosti. Je tedy nutné pokračovat ve vývoji aparátu pro vícebodové měření a zkoušky na něm opakovat, abychom měli více dat a podkladů pro vyhodnocení.

8.2 Bobtnací tlak na standardním propustoměru

V této práci na standardním propustoměru byl měřen jen vzorek BCV M182 – drť na jednom aparátu. Zkouška je vedena pod číslem protokolu P671. Pro další vyhodnocení byly převzaty data z dřívějších zkoušek na bentonitu BCV 179 – prášek. Data jsou z CEG ČVUT vedeny pod číslem protokolů P635 a P639. Průběh absolutního tlaku BCV M182 – drť je na Graf. 11 a průběhy absolutních tlaků na BCV M179 – prášek na Graf. 12. Hodnoty po ustálení, resp. hodnoty bobtnacího tlaku jsou pro drť 5,887 MPa a pro prášek 9,319 MPa a 4,697 MPa.



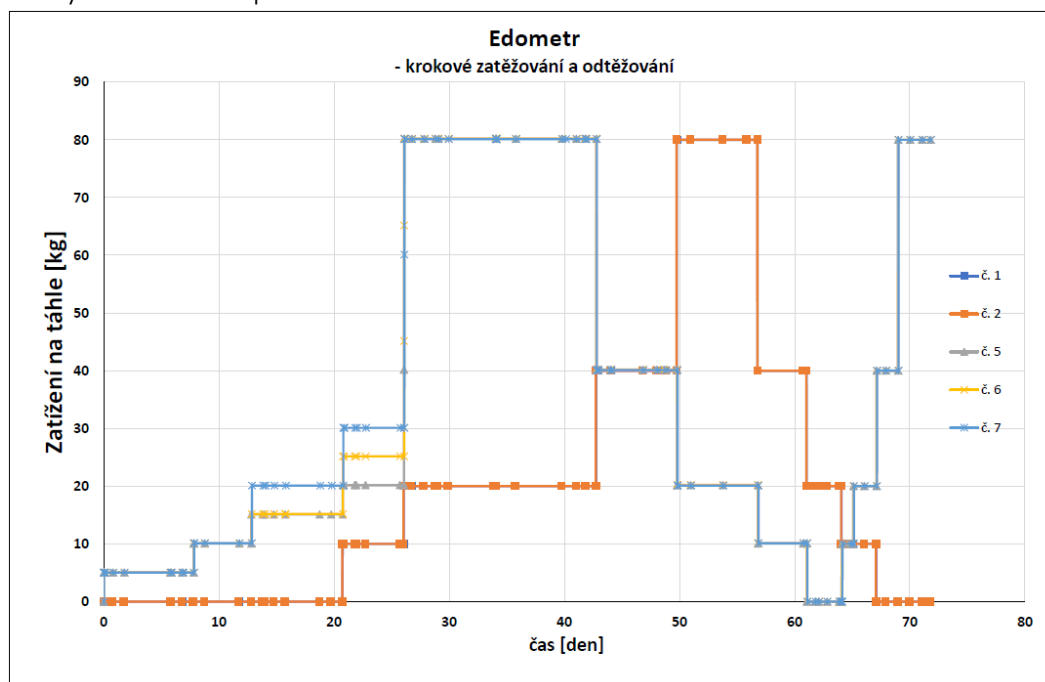
Graf. 11 Průběh absolutního tlaku na standardním propustoměru - drť



Graf. 12 Průběh absolutního tlaku na standardním propustoměru - prášek

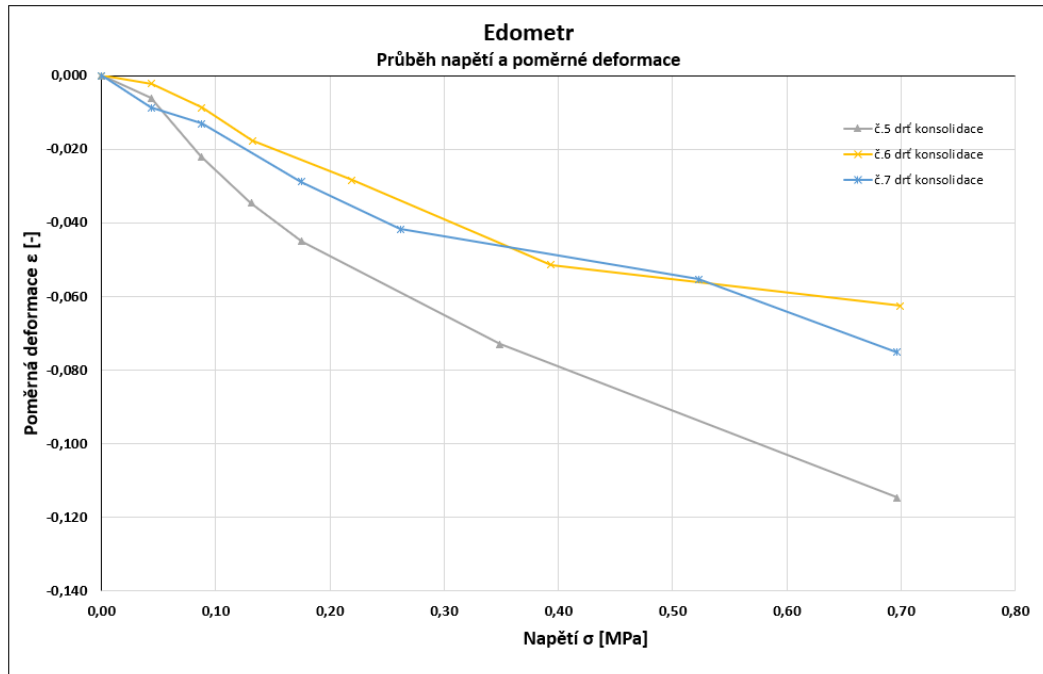
8.3 Bobtnací tlak na edometru s pákovým mechanismem

Bobtnací tlak v edometru byl stanoven pro bentonit BCV M182 – drť. Pro BCV M179 byly převzaty data pro vyhodnocení z dřívějších zkoušení v laboratoři CEG ČVUT v Dejvicích. Vyhodnocení je vyjádřeno v závislosti bobtnacího tlaku na objemové hmotnosti sušiny. Na Graf. 13 je zobrazeno krokové zatěžování a odtěžování jednotlivých edometrů pro drť.



Graf. 13 Krokové zatěžování a odtěžování v čase - drť

Na Graf. 14 je zobrazen průběh napětí a poměrné deformace při konsolidaci bentonitu bez syčení. Z této závislosti je podle kapitoly 3.5 stanoven edometrický modul přetvárnosti pro bentonitovou drť před syčením. Hodnoty E_{oed} pro jednotlivé intervaly napětí jsou v Tab. 14, Tab. 13 a Tab. 12. V Tab. 11 jsou průměry stanovených edometrických modulů přetvárnosti.



Graf. 14 Průběh napětí a poměrné deformace při konsolidaci bentonitu bez syčení

Edometrický modul přetvárnosti				
materiál:				
bentonit BCV M182 drť - konsolidace bez syčení				
edometr č.5				
σ_1	σ_2	ϵ_1	ϵ_2	E_{oed}
[MPa]	[MPa]	[-]	[-]	[MPa]
0,04	0,09	0,006	0,022	2,73
0,09	0,13	0,022	0,035	3,48
0,13	0,18	0,035	0,045	4,23
0,18	0,35	0,045	0,073	6,21
0,35	0,70	0,073	0,115	8,34

Tab. 14 Edometrický modul přetvárnosti č.5

Edometrický modul přetvárnosti				
materiál:				
bentonit BCV M182 drť - konsolidace bez syčení				
edometr č.6				
σ_1	σ_2	ϵ_1	ϵ_2	E_{oed}
[MPa]	[MPa]	[-]	[-]	[MPa]
0,04	0,09	0,002	0,009	6,68
0,09	0,13	0,009	0,018	5,00
0,13	0,22	0,018	0,028	8,10
0,22	0,39	0,028	0,041	13,64
0,39	0,70	0,041	0,063	14,34

Tab. 13 Edometrický modul přetvárnosti č.6

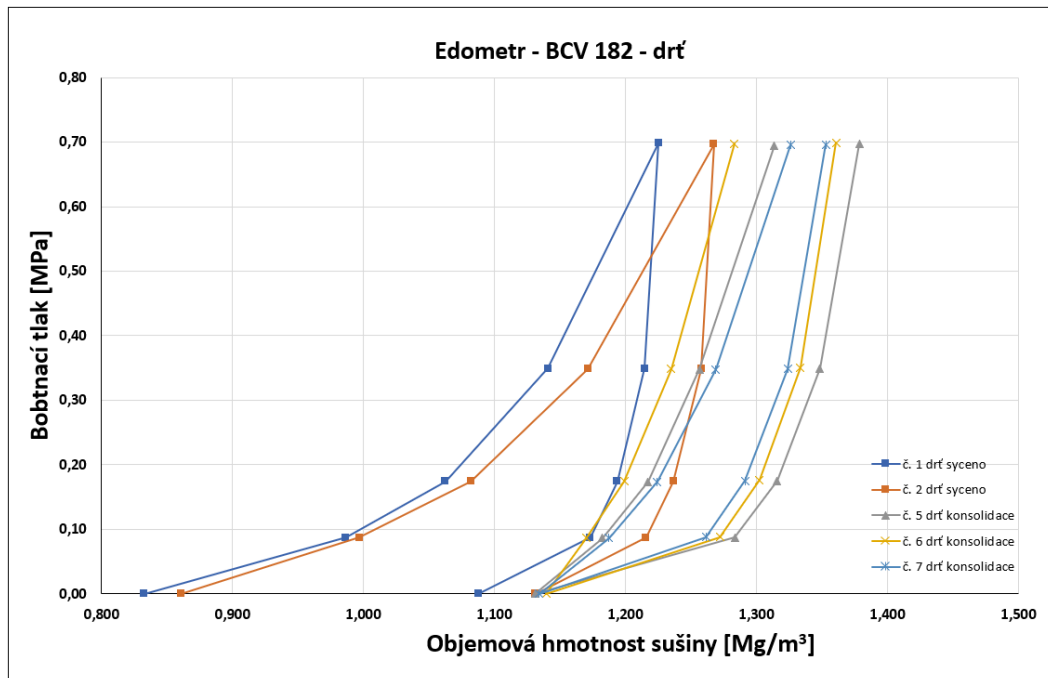
Edometrický modul přetvárnosti				
materiál:				
bentonit BCV M182 drť - konsolidace bez syčení				
edometr č.7				
σ_1	σ_2	ϵ_1	ϵ_2	E_{oed}
[MPa]	[MPa]	[-]	[-]	[MPa]
0,04	0,09	0,009	0,013	9,99
0,09	0,18	0,013	0,029	5,54
0,18	0,26	0,029	0,042	6,69
0,26	0,52	0,042	0,055	12,99
0,52	0,70	0,055	0,075	9,44

Tab. 12 Edometrický modul přetvárnosti č.7

Edometrický modul přetvárnosti		
materiál:		
BCV 182 drť konsolidace		
průměr stanovení E_{oed}		
σ_1	σ_2	E_{oed}
[MPa]	[MPa]	[MPa]
0,04	0,09	6,47
0,09	0,15	4,67
0,15	0,22	6,34
0,22	0,42	10,95
0,42	0,70	10,71

Tab. 11 Průměrný edometrický modul přetvárnosti

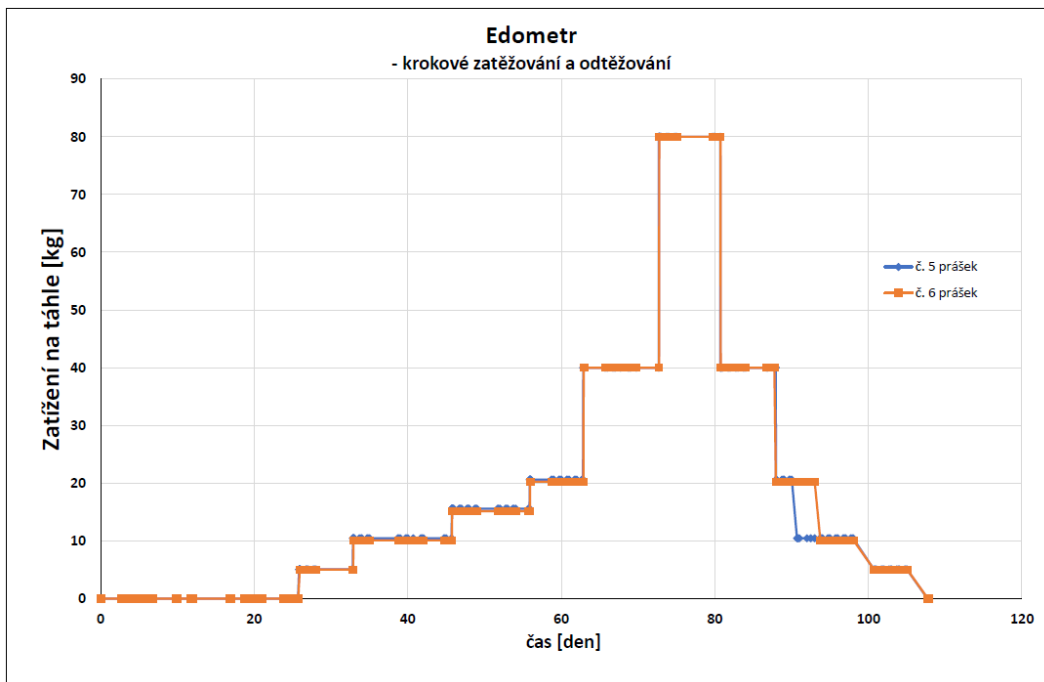
Na Graf. 15 je zobrazen průběh bobtnacího tlaku v závislosti na objemové hmotnosti sušiny. Větev č.1 a č.2 jsou vzorky, které byly v počátku zkoušení zasyceny vodou a po ustálení bobtnání zatěžovány až na 0,7 MPa a poté zpět odtěžovány do nuly. Větvě č.5, č.6 a č.7 jsou vzorky, které byly zprvu zatěžovány bez sycení. Až po konsolidaci při zatížení 0,7 MPa byly zality vodou. Následně byly odtěžovány do nuly a opět zatíženy na 0,7 MPa, kdy byla zkouška ukončena.



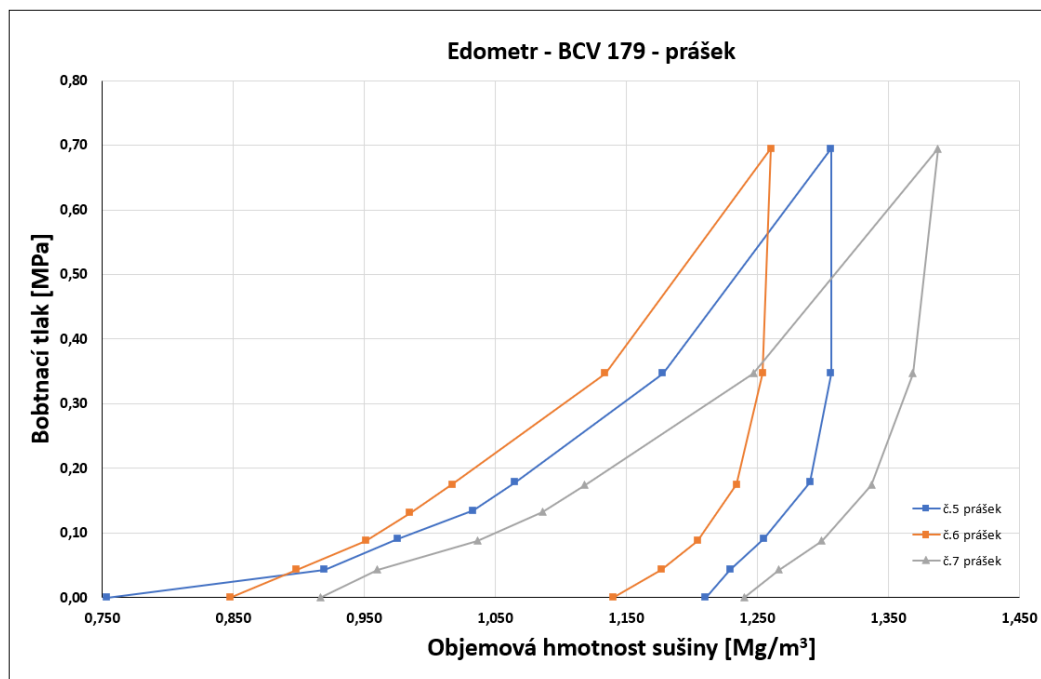
Graf. 15 Průběh bobtnacího tlaku v závislosti na objemové hmotnosti sušiny - drť

Předpokladem zkoušky bylo, že způsob sycení a zatěžování neovlivní závislost bobtnacího tlaku na objemové hmotnosti sušiny. Z průběhu bobtnacího tlaku je zřejmé, že počáteční konsolidace bentonitu nehraje roli. Výsledky v odtěžovacích větvích se k sobě přibližují, což nám potvrzuje počáteční hypotézu. Již při prvním zatěžovacím cyklu je patrná hystereze materiálu.

Krokové zatěžování vzorku BCV M179 - prášek je zobrazeno na Graf. 16. Vzorky byly od počátku zavodněny a po ustálení bobtnání byly zatěžovány. Na Graf. 17 jsou vyhodnocené data pro bentonit BCV M179. Při stejném zatížení, bychom měli získat velice podobné objemové hmotnosti sušiny. Rozdíly jsou okolo 0,05 Mg/m³. Maximální rozdíl v průběhu zkoušky je do 0,1 Mg/m³. Pro posouzení vlivu nehomogenity je následně využita křivka č.6, která má počáteční objemovou hmotnost sušiny blízkou objemové hmotnosti sušiny pro drť, která byla zkoušena.



Graf. 16 Krokové zatěžování a odtěžování v čase - prášek

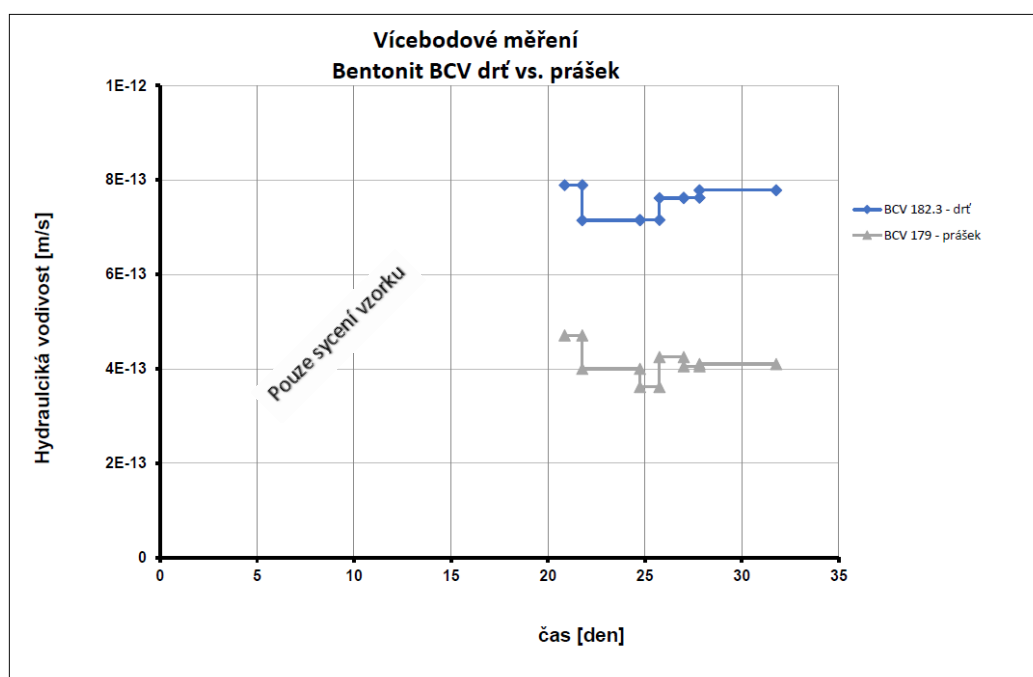


Graf. 17 Průběh bobtnacího tlaku v závislosti na objemové hmotnosti sušiny - prášek

8.4 Hydraulická vodivost na modifikovaném propustoměru

Hydraulická vodivost byla stanovena podle kapitoly 4.7. Předpoklad průběhů hydraulických vodivostí byl takový, že by nově sestavený vícebodový měřicí aparát neměl mít vliv na měření. Měřicí systém je separátní od propustoměru. Sytící systém má svá vlastní tlaková čidla a měřiče průtoku.

Na Graf. 18 je časový průběh vývoje hydraulické vodivosti měřená na vícebodovém aparátu pro drť a prášek. Stanovení hodnoty vodivosti je na základě protokolu P669 a P670. Vyhodnocení je vždy pro plně nasycený vzorek a stanovuje se z posledních zapsaných údajů v protokolu před ukončením zkoušky. Pro BCV M182 je stanovena hydraulická vodivost na $7,55 \times 10^{-13}$ m/s a pro BCV M179 na $3,98 \times 10^{-13}$ m/s.

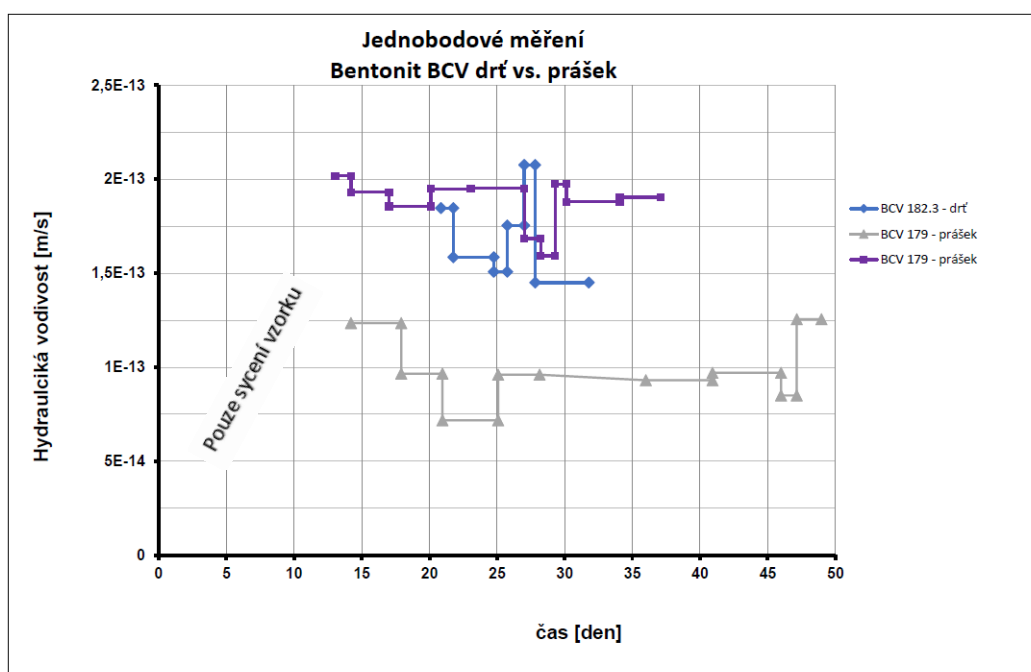


Graf. 18 Průběh hydraulické vodivosti v čase – modifikovaný propustoměř

8.5 Hydraulická vodivost na standardním propustoměru

Hydraulická vodivost v této práci byla stanovena na standardním propustoměru pro materiál BCV M182. Stanovení vodivosti a údaje o zkoušce jsou v protokolu P671. V Graf. 19 je časový průběh hydraulické vodivosti pro drť a data pro vyhodnocení BCV M179 byly převzata z CEG ČVUT.

Hodnota hydraulické vodivosti pro drť je $2,04 \times 10^{-13}$ m/s a pro prášek BCV M179 je $1,92 \times 10^{-13}$ a $1,14 \times 10^{-13}$ m/s. V tomto aparátu není jednoznačný rozdíl v měření a těsnící schopnost je velice blízká pro oba materiály drť i prášek. Přesto nepatrně větší vodivost má drť, tedy menší těsnící schopnost.



Graf. 19 Průběh hydraulické vodivosti v čase – standardní propustoměř

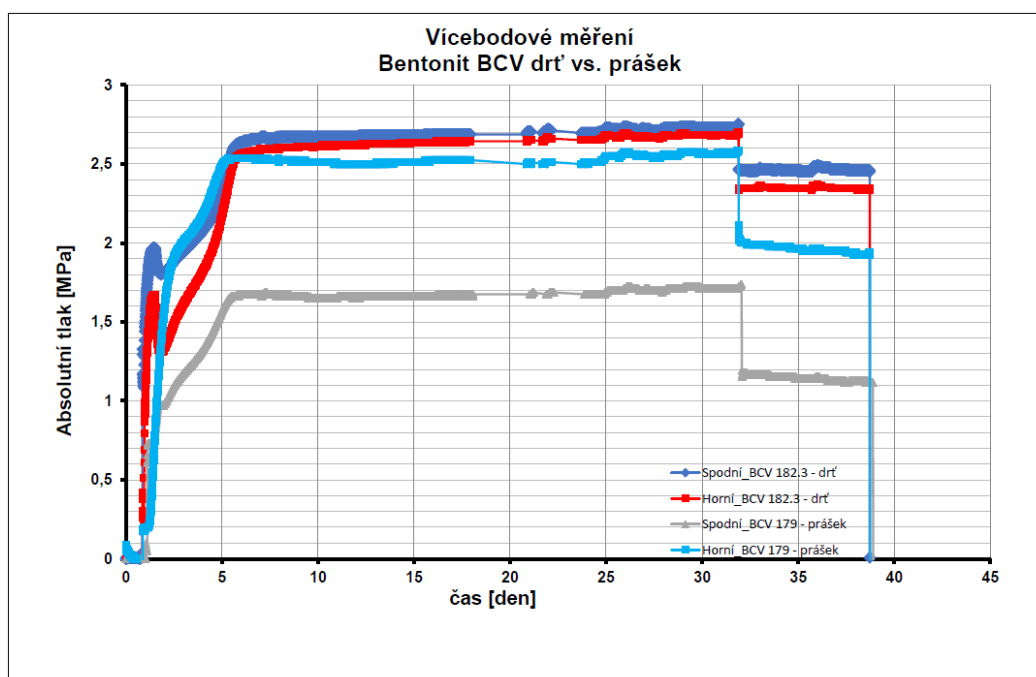
Pouze sycení vzorku

9 Posouzení vlivu nehomogenity bentonitu na jeho geotechnické vlastnosti

V následující části jsou použita vyhodnocení z experimentální části. Jednotlivé laboratorní zkoušky dvou reprezentativních vzorků BCV M182 a BCV M179 jsou vykresleny do společných grafických znázornění, ze kterých lze stanovit vliv nehomogenity materiálu na jeho vybrané geotechnické vlastnosti. Hlavní posouzení je provedeno na bobtnacím tlaku bentonitu a jeho hydraulické vodivosti. Dále je informativně znázorněn vliv na swell indexu bentonitu.

9.1 Posouzení BCV M182 a BCV M179 v modifikovaném propustoměru

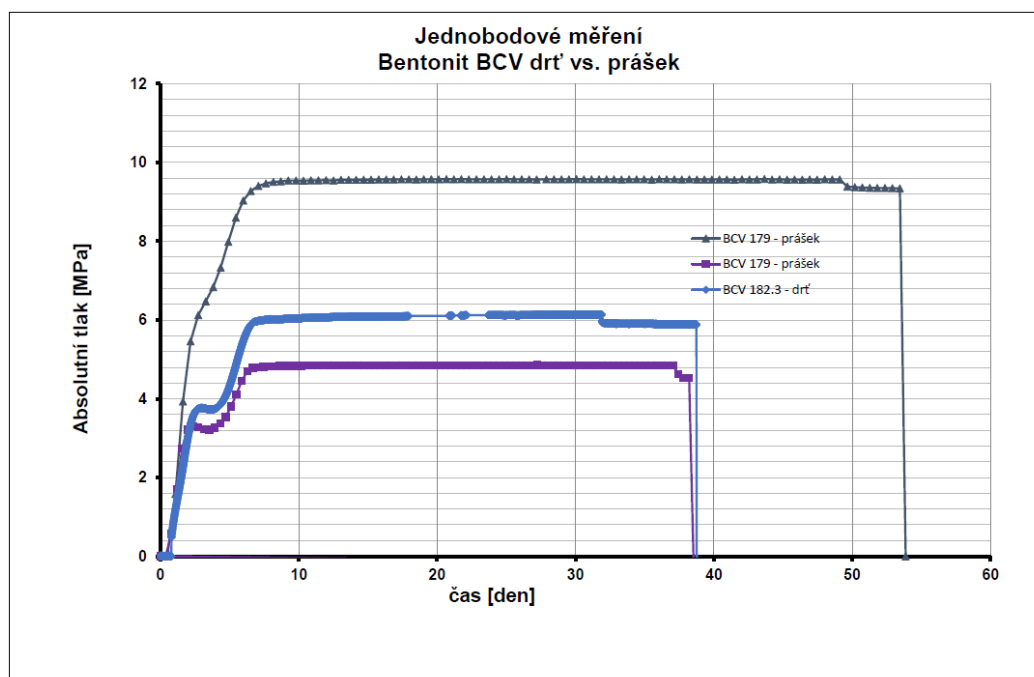
Z vývoje absolutního tlaku na silových čidlech (Graf. 20) v modifikovaném propustoměru lze stanovit, že při tomto postupu měření materiál BCV M182 má vyšší bobtnací schopnost. Toto tvrzení platí i po ustálení tlaku po vypnutí sycení, kdy stanovujeme bobtnací tlak. Při tomto stanovení je bobtnací tlak vyšší u drti než u prášek. Nepříznivé naměřené hodnoty spodního čidla pro prášek a možnosti vlivu měření jsou vysvětleny v kapitole 8.1.



Graf. 20 Porovnání měření BCV drť a prášek v modifikovaném propustoměru

9.2 Posouzení BCV M182 a BCV M179 ve standardním propustoměru

Průběh absolutního tlaku by měl být obecně vyšší pro vyšší objemové hmotnosti sušiny. V tomto experimentu všechny vzorky byly naváženy, abychom docílili objemové hmotnosti sušiny $1,600 \text{ Mg/m}^3$. Porovnáním průběhu drti (modře) s nižší křivkou prášku (fialově) na Graf. 21 dostáváme stejné posouzení jako v modifikovaném propustoměru. Tedy BCV M182 má bobtnací tlak vyšší než BCV M179 – prášek. Výchylka vývoje tlaku pro prášek (šedivě) mohla být způsobena jiným mineralogickým složením dodaného materiálu. Tedy mohl přijít ve výrobě do kontaktu s jinými více bobtnavými bentonity. Při vyhodnocení proběhla kontrola objemové hmotnosti sušiny ($1,600 \text{ Mg/m}^3$), která byla v pořádku.

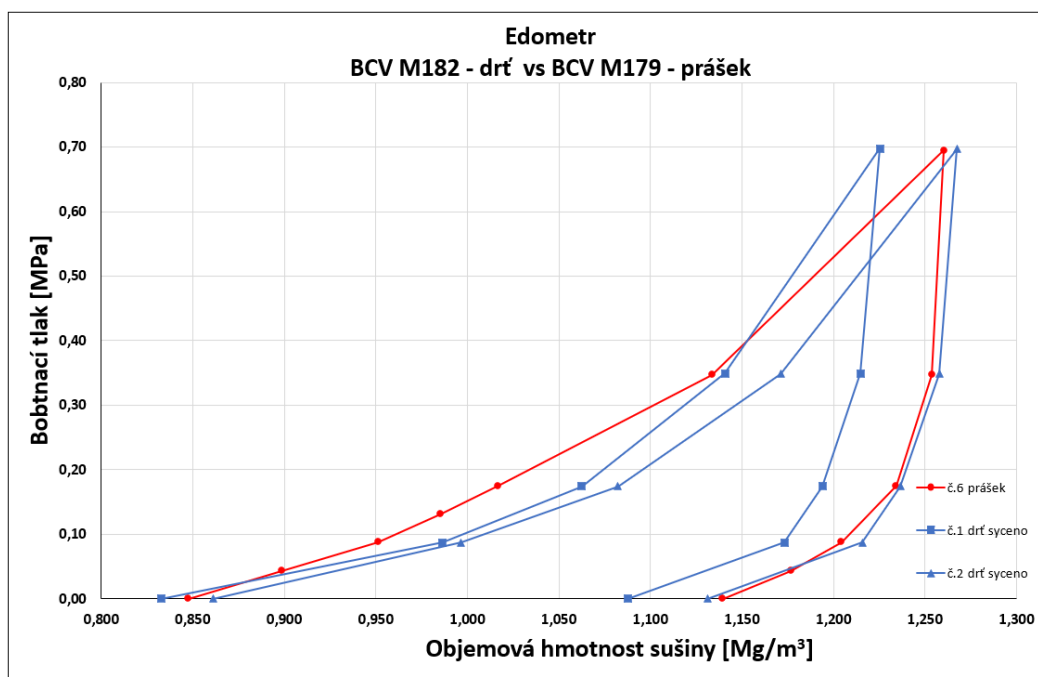


Graf. 21 Porovnání měření BCV drť a prášek ve standardním propustoměru

9.3 Posouzení BCV M182 a BCV M179 v edometru s pákovým mechanismem

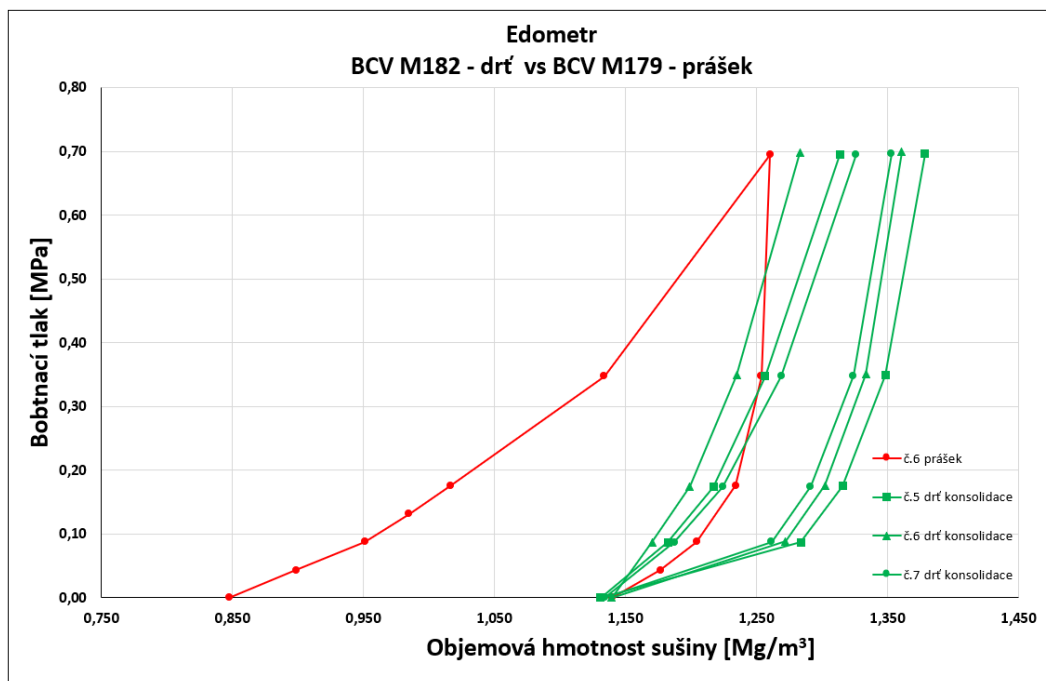
Pro stanovení závislosti bobtnacího tlaku a objemové hmotnosti sušiny byly použity dva postupy sycení vodou. Tedy první sada dvou edometrů má první větev zatěžovací a druhou větev odtěžovací. Druhá sada tří edometrů, které byly zasyceny vodou až po konsolidaci suchého bentonitu mají první větev odtěžovací a druhou větev zatěžovací. S ohledem na lepší prezentaci výsledků je nejprve posouzení provedeno zvlášť pro vzorky sycené od počátku a zvlášť pro vzorky sycené po konsolidaci. Pro stanovení vlivu nehomogenity bentonitu byla použita křivka č.6 pro prášek, která má blízkou počáteční objemovou hmotnost sušiny jako zkoušená bentonitová drť BCV M182.

Na Graf. 22 je průběh zatížení v závislosti na objemové hmotnosti sušiny, resp. bobtnací tlak. Z průběhu křivek pro drť (modře) a pro prášek (červeně) je patrné, že pro dané hodnoty zatížení mají blízké objemové hmotnosti sušiny. Můžeme tedy říci, že při stanovení bobtnacího tlaku na edometru s pákovým mechanismem nehomogenita bentonitu neovlivňuje jeho bobtnací tlak při dané objemové hmotnosti sušiny.



Graf. 22 Porovnání průběhů objemových hmotností sušiny v závislosti na zatížení pro drť sycenou a pro prášek

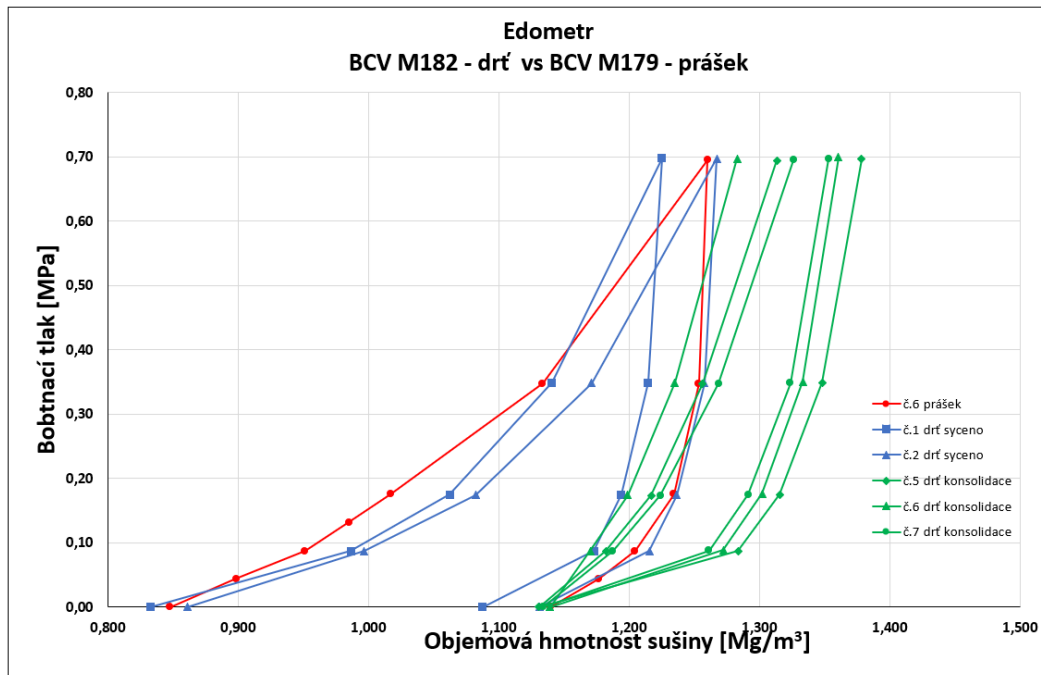
Další porovnání je pro drť, která byla konsolidována a poté zasyčena vodou. Následně probíhalo krokové odtěžování a zatěžování. Z Graf. 23 je názorné, že vzorky drti (zeleně) po konsolidaci mají obecně větší objemové hmotnosti sušiny než prášek (červeně). Při odtěžování drti a prášku se objemové hmotnosti k sobě blíží. Porovnáním křivek drti a prášku víme, že zvolené dva postupy syčení od počátku a syčení až po konsolidaci nemají vliv na vlastnosti materiálu.



Graf. 23 Porovnání průběhů objemových hmotností sušiny v závislosti na zatížení pro drť konsolidovanou a pro prášek

Pro zhodnocení další hystereze materiálu by bylo nutné ve zkoušce pokračovat dalšími zatěžovacími cykly. Ale již z tohoto prvního cyklu můžeme říci, že oba bentonity mají velice podobné chování při zatěžování a odtěžování.

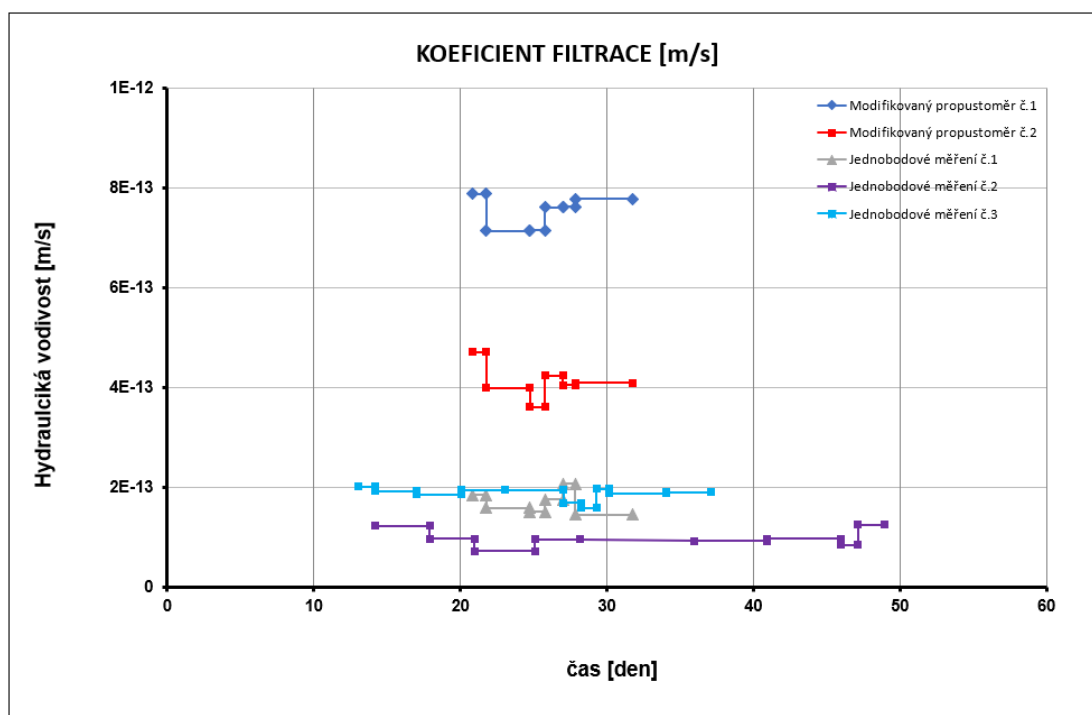
Celkové porovnání průběhů bobtnacího tlaku v závislosti na objemové hmotnosti sušiny pro drť a prášek je na Graf. 24. Z grafu je vidět, že odtěžovací větve pro drť i pro prášek mají pro dané zatížení podobné objemové hmotnosti sušiny. Celkový pohled na průběhy potvrzuje předešlé tvrzení, že nehomogenní bentonit nemá vliv na závislost mezi bobtnacím tlakem a objemovou hmotností sušiny.



Graf. 24 Celkové posouzení průběhů zatížení a objemové hmotnosti sušiny pro drť a prášek

9.4 Posouzení hydraulické vodivosti BCV M182 a BCV M179

Z Graf. 25 je zřejmé, že hydraulická vodivost je nižší pro prášek BCV M179. Což je žádoucí těsnící charakteristika bentonitu. Předešlé předpoklady, že měření v modifikovaném propustoměru nemá vliv na měření vodivosti jsou z toho měření negovány. Jsou patrné rozdíly z průběhu křivky pro měření prášku v modifikovaném propustoměru (červeně). Opět se jedná o první měření v modifikovaném propustoměru a pro stanovení bližších a přesnějších výsledků je nutno měření opakovat. Tak abychom měli více dat pro srovnání a vyhodnocení. Nyní se jedná o jedno měření jednoho materiálu, což i statisticky je nedostačující. Výsledky ve standardním propustoměru vykazují lepší přesnost měření, ale hydraulická vodivost drti spadá do rozsahu naměřených hodnot vodivosti pro prášek.



Graf. 25 Průběhy hydraulické vodivosti pro drt a prášek v modifikovaném a standardním propustoměru

9.5 Posouzení swell indexu BCV M182 a BCV M179

Při stanovení swell indexu podle kapitoly 4.5 a z Graf. 8 Grafické vyhodnocení swell indexu nejsou patrné významné rozdíly těchto hodnot mezi práškem a drtí. Z Tab. 9 Stanovení swell indexu bentonitu BCV - prášek a Tab. 10 Stanovení swell indexu bentonitu BCV - drt je zřejmý malý rozdíl, kdy průměrný swell index má materiál BCV M179 – prášek vyšší.

10 Závěr

Cílem této práce bylo ověřit, zda nehomogenita bentonitu má vliv na jeho geotechnické vlastnosti a zjistit, jakým způsobem ovlivňuje tyto vlastnosti. Tato práce dále zkoumala způsob měření bobtnacího tlaku a zda bude měření tlaku odlišné při měření na spodní a horní části vzorku.

Výsledky ukazují, že při měření na edometru s pákovým mechanismem nehomogenita bentonitu neovlivnila měření bobtnacího tlaku pro danou objemovou hmotnost sušiny. Výsledky měření propustnosti pro jednobodové a vícebodové měření ukazují obecně nižší hydraulickou vodivost pro homogenní vzorek. Pro nehomogenní vzorek, který byl měřen dvěma silovými čidly, neměl způsob měření zásadní vliv na hodnoty bobtnacího tlaku. Při zkoumání homogenního bentonitu při vícebodovém měření výsledky vykazují rozdílné chování materiálu oproti předpokladům. Podrobné výsledky měření a vyhodnocení je v kapitole 8.1.

Měření pomocí dvou silových čidel bylo v této práci první měření tohoto typu. Pro přesnější vyhodnocování dat a možnosti lépe posuzovat správnost výsledků je potřeba pokračovat ve výzkumu tohoto měřícího aparátu. V rámci této práce byl navržen vícebodový měřící aparát, který je potřeba zdokonalit s ohledem na získané zkušenosti při měření. Jedním ze zjištěných problémů je připojení sytících trubiček přímo na pohyblivém pístu propustoměru. Sycení vzorku by mělo být součástí nově vyrobeného prstýnku, aby bylo zabráněno možnému odporu hadičky na měřící čidlo.

11 Seznam obrázků

Obr. 1 Struktura montmorillonitu (inzynieria.com).....	3
Obr. 2 Ložiska bentonitu v ČR (Surovinové zdroje ČR)).....	4
Obr. 3 Vibrační deska s normovanými síty.....	12
Obr. 4 Schéma a popis zatěžování edometru (Kořínek, 2007)	13
Obr. 5 Stanovení swell indexu v odměrných válcích	14
Obr. 6 Edometr s pákovým mechanismem.....	15
Obr. 7 Silové čidlo snímající napětí v propustoměru.....	16
Obr. 8 Schéma propustoměru v CEG ČVUT	17
Obr. 9 Modifikovaný propustoměr pro měření shora a zdola	20
Obr. 10 Prototyp modifikovaného propustoměru - varianta krychle a válec	21
Obr. 11 První návrh modifikovaného propustoměru pro měření ze tří stran.....	22
Obr. 12 Lis Instron	23
Obr. 13 Ústředna pro zaznamenávání signálu zatížení	24
Obr. 14 Adaptér pro zapojení silových čidel	24
Obr. 15 Bentonit BCV M182 (vlevo) a BCV M182 proseto pod sítem 4mm (vpravo) ...	25
Obr. 16 Bentonit BCV M182 proseto pod 4 mm (vlevo) a BCV M179 - jemně mletý prášek (vpravo).....	26
Obr. 17 Lisování vzorku do prstýnku	33
Obr. 18 Příprava vzorku před lisováním	33
Obr. 19 Sestavený modifikovaný propustoměr	34
Obr. 20 Sestava edometru s pákovým mechanismem.....	35
Obr. 21 Edometr nasycený vodou	36
Obr. 22 Vzorek po 24hod v destilované vodě.....	37
Obr. 23 Odměrné válce a navážka bentonitu před zahájením zkoušky SI	37

12 Seznam grafů

Graf. 1 Křivka zrnitosti pro průměr procentuálních propadů a ideální křivka podle Fullera	28
Graf. 2 Křivky zrnitosti pro jednotlivé zrnitostní rozbory	28
Graf. 3 Vztah mezi silou lisu a signálem z ústředny a její směrnice pro CS303.....	29
Graf. 4 Vztah mezi silou lisu a signálem z ústředny a její směrnice pro CS304.....	30
Graf. 5 Vztah mezi silou lisu a signálem z ústředny a její směrnice pro CS427.....	31
Graf. 6 Vztah mezi silou lisu a signálem z ústředny a její směrnice pro CS307.....	31
Graf. 7 Vztah mezi silou lisu a signálem z ústředny a její směrnice pro CS428.....	32
Graf. 8 Grafické vyhodnocení swell indexu drť a prášek.....	38
Graf. 9 Průběh absolutního tlaku v čase na modifikovaném propustoměru - drť.....	39
Graf. 10 Průběh absolutního tlaku na modifikovaném propustoměru - prášek.....	40
Graf. 11 Průběh absolutního tlaku na standardním propustoměru - drť.....	41
Graf. 12 Průběh absolutního tlaku na standardním propustoměru - prášek.....	42
Graf. 13 Krokové zatěžování a odtěžování v čase - drť	42
Graf. 14 Průběh napětí a poměrné deformace při konsolidaci bentonitu bez sycení...	43
Graf. 15 Průběh bobtnacího tlaku v závislosti na objemové hmotnosti sušiny - drť.....	44
Graf. 16 Krokové zatěžování a odtěžování v čase - prášek	45
Graf. 17 Průběh bobtnacího tlaku v závislosti na objemové hmotnosti sušiny - prášek	45
Graf. 18 Průběh hydraulické vodivosti v čase – modifikovaný propustoměr	46
Graf. 19 Průběh hydraulické vodivosti v čase – standardní propustoměr	47
Graf. 20 Porovnání měření BCV drť a prášek v modifikovaném propustoměru	48
Graf. 21 Porovnání měření BCV drť a prášek ve standardním propustoměru	49
Graf. 22 Porovnání průběhů objemových hmotností sušiny v závislosti na zatížení pro drť sycenou a pro prášek	50
Graf. 23 Porovnání průběhů objemových hmotností sušiny v závislosti na zatížení pro drť konsolidovaná a pro prášek.....	51

Graf. 24 Celkové posouzení průběhů zatížení a objemové hmotnosti sušiny pro drť a prášek.....	52
Graf. 25 Průběhy hydraulické vodivosti pro drť a prášek v modifikovaném a standardním propustoměru	53

13 Seznam tabulek

Tab. 1 Zrnitostní rozbor BCV č.3	27
Tab. 2 Zrnitostí rozbor BCV č.1	27
Tab. 3 Zrnitostí rozbor BCV č.2	27
Tab. 4 Záznam lisu a ústředny pro CS303	29
Tab. 5 Záznam lisu a ústředny pro CS307	30
Tab. 6 Záznam lisu a ústředny pro CS304	30
Tab. 7 Záznam lisu a ústředny pro CS427	31
Tab. 8 Záznam lisu a ústředny pro CS428	32
Tab. 9 Stanovení swell indexu bentonitu BCV - prášek.....	38
Tab. 10 Stanovení swell indexu bentonitu BCV - drť.....	38
Tab. 11 Průměrný edometrický modul přetvárnosti.....	43
Tab. 12 Edometrický modul přetvárnosti č.7	43
Tab. 13 Edometrický modul přetvárnosti č.6	43
Tab. 14 Edometrický modul přetvárnosti č.5	43

14 Použitá literatura

- CHVÁTAL, Petr. *Výběr referenčních materiálů pro tlumící, zásypové a těsnicí materiál HÚ RAO*. Keessl s.r.o. Karlovy Vary, 1995
- WEISS, Zdeněk a Miloš KUŽVART. *Jílové minerály: jejich nanostruktura a využití* [online]. Praha: Karolinum, 2005 [cit. 2016-05-07]. ISBN 80-246-0868-5.
- Surovinové zdroje České republiky: nerostné suroviny : (stav ...)*. Praha: Ministerstvo životního prostředí České republiky, 2010. ISSN 1801-6693.
- VILLAR, M. Victoria a Antonio LLORET. Influence of dry density and water content on the swelling of a compacted bentonite. *Applied Clay Science* [online]. 2008, 39(1-2), 38-49 [cit. 2019-01-06]. DOI: 10.1016/j.clay.2007.04.007. ISSN 01691317. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169131707000919>
- DIXON, D.A., Graham, J. and GRAY, M.N. (1999). *Hydraulic conductivity of clays in confined tests under low hydraulic gradients*. Canadian Geotechnical Journal, 36, 815-825.
- HAUSMANNOVÁ, Lucie. *Vliv sytícího tlaku na hydraulickou vodivost a bobtnací tlak českých bentonitů*. Praha, 2017. Disertační práce. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE. Vedoucí práce Ing. Radek Vašíček, Ph. D.
- HAUSMANNOVA, L. a R. VASICEK. *Measuring hydraulic conductivity and swelling pressure under high hydraulic gradients* [online]. [cit. 2019-01-06]. DOI: 10.1144/SP400.36. ISBN 10.1144/SP400.36. Dostupné z: <http://sp.lyellcollection.org/cgi/doi/10.1144/SP400.36>
- KOŘÍNEK, R. *Mechanika hornin a zemin: podklady k přednáškám*, 2007 [online]. In: [cit. 2019-01-06]. Dostupné z: <http://www.geotechnici.cz/wp-content/uploads/2012/08/MHZ-07.pdf>
- TŮMA, Michael. *Možnosti využití severočeských bentonitů ve stavebnictví*. Praha, 2016. Bakalářská práce. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE. Vedoucí práce Ing. Radek Vašíček, Ph. D.
- ČSN EN ISO 17892-1: *Geotechnický průzkum a zkoušení - Laboratorní zkoušky zemin - Část 1: Stanovení vlhkosti*. Praha: Český normalizační institut, 2015.
- ČSN EN ISO 17892-2: *Geotechnický průzkum a zkoušení - Laboratorní zkoušky zemin - Část 2: Stanovení objemové hmotnosti*. Praha: Český normalizační institut, 2015.
- ČSN EN ISO 17892-4: *Geotechnický průzkum a zkoušení - Laboratorní zkoušky zemin - Část 4: Stanovení zrnitosti*. Praha: Český normalizační institut, 2017.

ČSN EN ISO 17892-5: *Geotechnický průzkum a zkoušení - Laboratorní zkoušky zemin - Část 5: Zkouška stlačitelnosti v edometru postupným přitěžováním*. Praha: Český normalizační institut, 2017.

ČSN CEN ISO/TS 17892-11: *Geotechnický průzkum a zkoušení - Laboratorní zkoušky zemin - Část 11: Stanovení propustnosti zemin při konstantním a proměnném spádu*. Praha: Český normalizační institut, 2005.

IS 2720-40: *Methods of test for soils, Part 40: Determination of free swell index of soils*, by Bureau of Indian Standards, 1977

Interní postup laboratorního zkoušení hydraulické vodivosti a bobtnacího tlaku bobtnavých jílů. CEG - ČVUT - Praha, 2012.

Interní dokument OL 182/112-102 – Interní ověřovací postup (IOP). CEG – ČVUT – Praha, 2012

Webové stránky:

KERAMOST, a.s. [online]. Most [cit. 2019-01-06]. Dostupné z: <http://www.keramost.cz/>

CEG ČVUT: K220 [online]. Praha, 2014 [cit. 2019-01-06]. Dostupné z: <https://ceg.fsv.cvut.cz/>

CEG ČVUT: URC JOSEF [online]. 2014 [cit. 2019-01-06]. Dostupné z: <http://uef-josef.urb-josef.eu/misc/propustomery/>

ČESKÁ GEOLOGICKÁ SLUŽBA [online]. Praha, 2017 [cit. 2019-01-06]. Dostupné z: <http://www.geology.cz/extranet>

Inzynieria [online]. 2010 [cit. 2019-01-06]. Dostupné z: <http://inzynieria.com/>

BEACON. *Bentonite Mechanical Evolution* [online]. [cit. 2019-01-06]. Dostupné z: <http://www.beacon-h2020.eu/>

15 Přílohy

15.1 Příloha 1 – Zkušební protokol P669

ČVUT Fakulta stavební - Centrum experimentální geotechniky
Stanovení hydraulické vodivosti - postup dle interní metodiky 182-21 a 22

zk. OL182/21, 22

Zkoušku zahájil: Tůma datum zahájení: 9.11.18 datum ukončení: 17.12.18 záznam č. **P 669**

Propustoměr: **P1** Silové čidlo: **CS 307 303** Tlakové čidlo: **CT 119** Horní: **303** Dolní: **303** Č. adaptéru: **EZ 204** Č. adaptéru (dolní): **EZ 206** Vstup adaptéru (horní): **2** Vstup adaptéru (dolní): **3** Č. ústředny: **EZ115** Kanál ústředny (horní): **B2** Kanál ústředny (dolní): **A6**

Č. materiálu: **182.3** Označení mat.: **BCV** Cílová vysušená obj. hmotnost [Kg/m³]: **1600** Projekt/Zakázka: **BEACON**

Příprava vzorku: **prose to pod 4mm/ ísováno/ 23,98 navážka/ měření nahore a dole**

Pomůcky:

den	hodina	čtení		obrátky	měřil	poznámky (teplota, syčení, zkratka zap./vyp.)
		hladina oleje [1/100 ml]	tlak plynu-vody (orientační) [kPa]			
1	8.11.2018	14:00	311	1000	mt	měření nezatíženého čidla
2	9.11.2018	12:00	311	1000	mt	měření nezavodněné komory
3	9.11.2018	13:55	311	1000	mt	zavodnění-vypnuto
4	9.11.2018	14:15	311	1000	mt	zavodněno
5	29.11.2018	10:40	317	1000	vk	ot plyn - zkratka vyp.
6	30.11.2018	8:35	339	1000	vk	
7	3.12.2018	8:05	404	1000	vk	
8	4.12.2018	8:15	426	1000	vk	
9	5.12.2018	14:10	455	1000	vk	
10	6.12.2018	9:45	474	1000	x	vk
11	6.12.2018	9:45	476	1000	x	vk
12	10.12.2018	8:40	382	1000		vk
13						
14						
15						
16						
17						
18						
19						
20						
21						
22						
23						
24						
25						
26						
27	10.12.2018	12:38	378	1000	jb	ukončení syčení
28	10.12.2018	12:38	378	1000	jb	odpojení komory od syčení
29	17.12.2018	8:35	378	1000	vk	měření nezatíženého čidla (min. 1h)
30	17.12.2018	8:35	378	1000	vk	konec zkoušky

Vstupní vlhkost:	1	2	3	Rozměry (před zk.) [mm]		Hmotnost	[g]	Výsledky		
Označení misky	76			Výška	1	20	Přístavec bez vzorku (před zkouškou)	431,2	W _{sat}	33,74%
Hmotnost misky	2,2826			měření č.	2	20	Přístavec se vzorkem (před zkouškou)	454,38	ρ _v [kg/m ³]	1520,1
Hmotnost před sušením (miska + vzorek)	56,6604				3	20	Miska se vzorkem (po rozebrání)	30,98	ρ [kg/m ³]	2033
Hmotnost po sušení (miska + vzorek)	53,4921					20	Miska se vzorkem (vysušené)	23,73	ρ _s [kg/m ³]	N/A
Průměr: 6,19%	6,19%			Průměr vzorku	30		Miska	2,24	ρ _v [kg/m ³]	N/A
vážil:				měřil:			vážil:		S.	N/A

strana 1/2

Vyhodnocení hydraulické vodivosti

mezi řádky	datum	hod	čtení [1/100 ml]	skutečný tlak vody [kPa]	čas [h]
11	6.12.18	9:45:00	476		95,95
12	10.12.18	8:40:00	382	1000,00	5099
					hydraulický gradient i [-]: 0,940
					proteky objem Q [ml]: 0,940
					hydraulická vodivost k [m/s]: 7,55E-13

Korekce nuly nezatíženého čidla

měření nezatíženého čidla CS303
0,000198 MPa

Korekce nuly nezatíženého čidla

měření nezatíženého čidla CS307
-0,008341 MPa

Bobtnací tlak spodní

datum a čas odečtu: 17.12.2018 7:30:00
tlak [MPa]: 2,451

Soubory z ústředny:

P669_CS303D30

Bobtnací tlak horní

datum a čas odečtu: 17.12.2018 7:30:00
tlak [MPa]: 2,338

Soubory z ústředny:

P669_CS307D30

Poznámka

Vypracoval: M. Tůma
jméno a podpis

Schválil: J. Svoboda
jméno a podpis

Datum: 29.12.2018

Datum: 29.12.2018

strana 2/2
konec protokolu

15.2 Příloha 2 – Zkušební protokol P670

ČVUT Fakulta stavební - Centrum experimentální geotechniky
Stanovení hydraulické vodivosti - postup dle interní metodiky 182-21 a 22

zk. OL182/21, 22

Zkoušku zahájil: Tůma datum zahájení: 9.11.18 datum ukončení: 17.12.18 záznam č. **P 670**

Propustoměr:	P2	č. čidla	horní	dolní	č. adaptéru	adaptéru (horní)	adaptéru (dolní)	č. ústředny	kanál ústředny
		Silové čílo:	CS 428	427	EZ 204	7	1	EZ115	B7
		Tlakové čílo:	CT 118		EZ 206	5			A5

Č. materiálu: **179** Označení mat.: **BCV** Cílová vysušená obj. hmotnost [Kg/m3]: **1600** Projekt/Zakázka: **BEACON**

Příprava vzorku: lisování/ navážka 24,2g/ měření nahore i dole

Pomůcky: Propustoměr (č. viz nahore), silové čílo (viz nahore), tlakové čílo (viz nahore), elektronická zařízení (EZxxx viz nahore), posuvné měřítko s noniem (N09), váhy (N5462), sušárna (Z01)

den	hodina	čtení		obrátky	měřil	poznámky (teplota, syčení, zkratka zap./vyp.)
		hladina oleje [1/100 ml]	tlak plynu-vody (orientační) [kPa]			
1	8.11.2018	14:00	343	1000	mt	měření nezatíženého čidla
2	8.11.2018	12:00	343	1000	mt	měření nezavodněné komory
3	8.11.2018	13:55	343	1000	mt	zavodnění - vypnuto
4	8.11.2018	14:15	343	1000	mt	zavodněno
5	8.11.2018	14:15	343	1000	mt	zavřeny plyn
6	29.11.2018	10:40	343	1000	vk	otevřený plyn, zkratka vyp.
7	30.11.2018	8:35	330	1000	vk	
8	3.12.2018	8:05	294	1000	vk	
9	4.12.2018	8:15	283	1000	vk	
10	5.12.2018	14:10	267	1000	vk	
11	6.12.2018	9:45	257	1000	vk	
12	10.12.2018	8:40	208	1000	vk	
13						
14						
15						
16						
17						
18						
19						
20						
21						
22						
23						
24						
25						
26						
27	10.12.2018	12:40	207	1000		ukončení syčení
28	10.12.2018	12:40	270	1000		odpojení komory od syčení
29	17.12.2018	8:50	207	0	odpojeno čidlo hned	měření nezatíženého čidla (min.1h)
30	17.12.2018	8:50	207	0		konec zkoušky

Vstupní vlhkost:	1	2	3	Rozměry (před zk.) [mm]	Hmotnost	Výsledky
Označení misky	103			Výška 1	zkouškou	w sat 36,79%
Hmotnost misky	2,28			měření č. 2	zkouškou	ρ _s [kg/m ³] 1524,7
Hmotnost před sušením (miska + vzorek)	42,7425			3	Miska se vzorkem (po rozebrání)	ρ [kg/m ³] 2086
Hmotnost po sušení (miska + vzorek)	38,5003			Průměr vzorku	Miska se vzorkem (vysušené)	ρ _s [kg/m ³] N/A
Průměr: 11,71%	11,71%			30	Miska	ρ _v [kg/m ³] N/A
vážil:				měřil:	vážil:	S. N/A

strana 1/2

mezi řádky	datum	hod	čtení [1/100 ml]	skutečný tlak vody	čas [h]
11	6.12.18	9:45:00	257	1000,00	95,95
12	10.12.18	8:40:00	208	1000,00	50,46

hydraulický gradient [l.] 0,480
hydraulická vodivost k [m/s] 3,98E-13

korekce nuly nezatíženého čidla
měření nezatíženého čidla CS427
-0,83104 MPa
Bobtnací tlak spodní
tlak [MPa] 1,116
datum a čas odečtu 17.12.2018 7:50:41
Soubory z ústředí: P670_CS427D30

korekce nuly nezatíženého čidla
měření nezatíženého čidla CS428
0,11556 MPa
Bobtnací tlak horní
tlak [MPa] 1,840
datum a čas odečtu 17.12.2018 7:50:41
Soubory z ústředí: P670_CS428D30

Poznámka

Vypracoval: M.Tůma
jméno a podpis

Schválil: J. Svoboda
jméno a podpis

Datum: 29.12.2018

Datum: 29.12.2018

strana 2/2
konec protokolu

15.3 Příloha 3 – Zkušební protokol P671

ČVUT Fakulta stavební - Centrum experimentální geotechniky
Stanovení hydraulické vodivosti - postup dle interní metodiky 182-21 a 22

zk. OL182/21, 22

Zkoušku zahájil: Barták datum zahájení: 9.11.18 datum ukončení: 17.12.18 záznam č. **P 671**

Propustoměr:	P9	Silové čidlo:	CS 304	EZ 201	7	č. ústředny	EZ115	kanál ústředny	B15
		Tlakové čidlo:	CT 114	EZ 206	1				A01
Č. materiálu:	182.3	Označení mat.:	pelely bcv	Cilová vysušená obj. hmotnost [Kg/m3]:	1600	Projekt/Zakázka:	BEACON		
Příprava vzorku:	proseto pod 4mm/ lisováno/ 23,98g navážka								
Pomůcky:	Propustoměr (č. viz nahore), silové čidlo (viz nahore), tlakové čidlo (viz nahore), elektronická zařízení (EZxxx viz nahore), posuvné měřítko s noriem (N09), váhy (N5462), sušárna (Z01)								

den	hodina	čtení		obrátky	měřil	poznámky (teplota, syčení, zkratka zap./vyp.)
		hladina oleje [1/100 ml]	tlak plynu-vody (orientační) [kPa]			
1	8.11.2018	14:00	440	1000	mt	měření nezatíženého čidla
2	9.11.2018	10:05	440	1000	jb	měření nezavodněné komory
3	9.11.2018	10:35	440	1000	mt	zavodnění 3.11. 10:35
4	9.11.2018	10:35				zavřený plyn
5	29.11.2018	10:40	445	1000	vk	zkratka vyp. - dop.plyn
6	30.11.2018	8:35	450	1000	x vk	
7	30.11.2018	8:35	455	1000	x vk	
8	3.12.2018	8:05	441	1000	vk	
9	4.12.2018	8:15	436,5	1000	vk	
10	5.12.2018	14:15	430	1000	vk	
11	6.12.2018	9:45	425	1000	vk	
12	10.12.2018	8:40	408	1000	vk	
13						
14						
15						
16						
17						
18						
19						
20						
21						
22						
23						
24						
25						
26						
27	10.12.2018	12:44	407	1000	jb	ukončení syčení
28	10.12.2018	12:45	407	1000	jb	odpojení komory od syčení
29	17.12.2018	9:09	407	0	vk	měření nezatíženého čidla(mín.1h)
30						konec zkoušky

Vstupní vlhkost:	1	2	3	Rozměry (před zk.) [mm]		Hmotnost	[g]	Výsledky
Označení misky	76			Výška	1	20,6	zkouškou	wsat 29,22%
Hmotnost misky	2,2826			měření č.	2	20,7	zkouškou	p _v [kg/m ³] 1544,9
Hmotnost před sušením (miska + vzorek)	56,6604				3		Miska se vzorkem (po rozebrání)	p [kg/m ³] 1996
Hmotnost po sušení (miska + vzorek)	53,4921					20,65	Miska se vzorkem (vysušené)	p _v [kg/m ³] N/A
Průměr: 6,19%	6,19%			Průměr vzorku	30		Miska	p _v [kg/m ³] N/A
vážil:				měřil:	jméno, podpis		vážil:	jméno, podpis

strana 1/2

Vyhodnocení hydraulické vodivosti

mezi řádky	datum	hod	čtení [1/100 ml]	skutečný tlak vody	čas [h]	19,50
10	5.12.18	14:15:00	430	[kPa]	hydraulický gradient i [m]	4950
11	6.12.18	9:45:00	425	1000,00	protokový objem Q [ml]	0,050
					hydraulická vodivost k [m/s]	2,04E-13

korekce nulý nezatíženého čidla

měření nezatíženého čidla CS427
0,0655 MPa

Bobtnací tlak

datum a čas odečtu 17.12.2018 8:00:00 tlak [MPa] 5,887

Soubory z ústředí:

P671_CS304030

Poznámka

Vypracoval: M. Tůma
jméno a podpis

Schválil: J. Svoboda
jméno a podpis

Datum: 29.12.2018

Datum: 29.12.2018

strana 2/2
konec protokolu

15.4 Příloha 4 – Zkušební protokol P635

ČVUT Fakulta stavební - Centrum experimentální geotechniky
Stanovení hydraulické vodivosti - postup dle interní metodiky 182-21 a 22

zk. OL182/21, 22

Zkoušku zahájil: V. Kašpar datum zahájení: 29.3.18 datum ukončení: 21.5.18 záznam č. **P 635**

Propustoměr:	P5	Silové čidlo:	č. čidla	č. adaptéru	vstup adaptéru	č. ústředny	kanál ústředny
			CS 205	EZ 201	6		
		Tlakové čidlo:	CT 113	EZ 206	2		A 2

Č. materiálu:	179	Označení mat.:	BCV	Cilová vysušená obj. hmotnost [kg/m ³]:	1600	Projekt/Zakázka	SÚRAO - IE Bukov
---------------	-----	----------------	-----	---	------	-----------------	------------------

Příprava vzorku: lisovaný

Pomůcky: Propustoměr (č. viz nahře), silové čidlo (viz nahře), tlakové čidlo (viz nahře), elektronická zařízení (EZxxx viz nahře), posuvné měřítko s noniem (N09), váhy (N5462), sušárna (Z01)

den	hodina	čtení		obrátky	měřil	poznámky (teplota, syčení, zkratka zap./vyp.)
		hladina oleje [1/100 ml]	tlak plynu-vody (orientační) [kPa]			
1	29.3.2018	10:00	311,5	1000	VK	měření nezatíženého čidla
2	29.3.2018	13:40	311,5	1000	VK	měření nezavodněné komory
3	29.3.2018	13:50	311,5	1000	VK	zavodnění
4	9.4.2018	9:40	318	1000	VK	zkratka vyp.
5	10.4.2018	13:30	319	1000	VK	
6	11.4.2018	14:50	322	1000	VK	
7	12.4.2018	14:50	322	1000	VK	
8	16.4.2018	8:00	336	1000	VK	
9	19.4.2018	9:15	345	1000	VK	
10	23.4.2018	11:50	354	1000	VK	
11	26.4.2018	13:30	363	1000	VK	zkratka zap.
12	4.5.2018	9:55	363	1000	VK	zkratka vyp.
13	9.5.2018	8:10	377	1000	VK	
14	14.5.2018	9:40	392	1000	VK	
15	15.5.2018	13:25	395	1000	VK	
16	17.5.2018	9:15	402	1000	VK	
17	17.5.2018	11:48	402	1000	VK	ukončení syčení
18	17.5.2018	11:48	402	1000	VK	odpojení komory od syčení
19	21.5.2018	13:00	402	1000	VK	konec zkoušky

Vstupní vlhkost:	1	2	3	Rozměry (před zk.) [mm]	Hmotnost [g]	Výsledky
Označení misky	BCV			Výška	217,57	wsat 26,19%
Hmotnost misky	2,31			měření č.	242,82	pk [kg/m ³] 1608,8
(miska + vzorek)	16,56				31,748	p [kg/m ³] 2030
(miska + vzorek)	15,00			19,9	25,822	ps [kg/m ³] 2800
Průměr: 4,10%	12,29%	0,00%	0,00%	Průměr vzorku	30	pw [kg/m ³] 998,2
vážil: Kašpar				měřil: Kašpar	vážil: Kašpar	S: 99,2%

strana 1/2

Vyhodnocení hydraulické vodivosti

mezi řádky	datum	hod	čtení [1/100 ml]	skutečný tlak vody [kPa]	čas [h]	71,98
14	14.5.18	9:40:00	392		4800	hydraulický gradient i [m]
16	17.5.18	9:15:00	402	960,00	0,100	proteklý objem Q [ml]
					hydraulická vodivost k [m/s]	1,14E-13

Poznámka

Bobtnací tlak

datum a čas odečtu	tlak [MPa]
21.5.2018 10:10:00	9,319
Soubory z ústředny:	
180409- EZ 115 - P1-12.TXT	
180423- EZ 115 - P1-12.TXT	
180522- EZ 115 - P1-12.TXT	
RRMMDD EZ1xx prop rozsah.txt	

Vypracoval: R. Vašíček
jméno a podpis

Schválil: J. Svoboda
jméno a podpis

Datum: 6.6.2018

Datum: 8.6.2018

strana 2/2
konec protokolu

15.5 Příloha 5 – Zkušební protokol P639

ČVUT Fakulta stavební - Centrum experimentální geotechniky
Stanovení hydraulické vodivosti - postup dle interní metodiky 182-21 a 22

zk. OL182/21, 22

Zkoušku zahájil: V. Kašpar

datum zahájení: 22.5.18

datum ukončení: 29.6.18

záznam č.

P 639

Propustoměr:	P7	Silové čidlo:	č. čidla	č. adaptéru	vstup adaptéru	č. ústředny	kanál ústředny
			CS 303	EZ 201	2	EZ115	B10
		Tlakové čidlo:	CT 114	EZ 206	3		A03

Č. materiálu:	179	Označení mat.:	BCV	Cilová vysušená obj. hmotnost [Kg/m3]:	1550	Projekt/ Zakázka:	BEACON
---------------	-----	----------------	-----	--	------	-------------------	--------

Příprava vzorku: LISOVANY

Pomůcky: Propustoměr (č. viz nahře), silové čidlo (viz nahře), tlakové čidlo (viz nahře), elektronická zařízení (EZxxx viz nahře), posuvné měřtko s noniem (N09), váhy (N5462), sušárna (Z01)

den [dd.mm.rr]	hodina [h.min]	čtení		obrátky [křížek]	měřil	poznámky (teplota, syčení, zkratka zap./vyp.)
		hladina oleje [1/100 ml]	tlak plynu-vody (orientační) [kPa]			
1	22.5.2018	8:00	304	1000	vk	měření nezatiženého čidla
2	22.5.2018	10:10	304	1000	vk	měření nezavodněné komory
3	22.5.2018	14:30	304	1000	vk	zavodnění-zkratka zap.
4	28.5.2018	8:05	304	1000	vk	zkratka vyp.
5	29.5.2018	15:10	296	1000	vk	
6	30.5.2018	13:00	291	1000	vk	
7	31.5.2018	14:10	286	1000	vk	
8	4.6.2018	9:10	263	1000	vk	
9	5.6.2018	13:15	256	1000	vk	
10	8.6.2018	8:20	240	1000	vk	
11	11.6.2018	10:30	223	1000	vk	
12	14.6.2018	9:05	206	1000	vk	
13	18.6.2018	8:30	183	1000	vk	
14	19.6.2018	13:20	177	1000	vk	
15	20.6.2018	14:45	172	1000	vk	
16	21.6.2018	11:15	167	1000	vk	
17	25.6.2018	10:00	145	1000	vk	
18	28.6.2018	10:15	128	1000	vk	
19	28.6.2018	10:17	128	1000	vk	ukončení syčení
20	28.6.2018	10:18	128	1000	vk	odpojení komory od syčení
21	29.6.2018	8:55	128	1000	vk	konec zkoušky
22						
23						
24						
25						
26						
27						
28						
29						
30						

Vstupní vlhkost:	1	2	3	Rozměry (před zk.) [mm]	Hmotnost [g]	Výsledky
Označení misky	BCV			Výška	216,138	wsat 30,71%
Hmotnost misky	2,295			měření č.	240,967	ps [kg/m3] 1514,8
(miska + vzorek)	12,014				32,008	p [kg/m3] 1980
(miska + vzorek)	11,003			20,6	25,233	ps [kg/m3] N/A
Průměr:	3,87%	11,61%	0,00%	0,00%	30	pw [kg/m3] N/A
vážil:	Kašpar			měřil:	Kašpar	vážil:
						S:

strana 1/2

Vyhodnocení hydraulické vodivosti

mezi řádky	datum	hod	čtení [1/100 ml]	skutečný tlak vody [kPa]	čas [h]
16	21.6.18	11:15:00	167	960,00	167,96
18	28.6.18	10:15:00	128	960,00	4752

hydraulická vodivost k [m/s] 1,92E-13

Poznámka

Vypracoval: R. Vašíček
jméno a podpis

Datum: 8.6.2018

Schválil: J. Svoboda
jméno a podpis

Datum: 9.6.2018

strana 2/2
konec protokolu

korekce nuly nezatiženého čidla

měření nezatiženého čidla	0,057 MPa
---------------------------	-----------

Bobtnací tlak

datum a čas odečtu	29.6.2018 4:20:00
tlak [MPa]	4,697

Soubory z ústředny:

180604- EZ 115- P1-12.TXT
180618- EZ 115- P1-12.TXT
180628- EZ 115- P1-12.TXT
180716- EZ 115- P1-12.TXT
RRMDD EZ1xx-prac-rozsah.txt