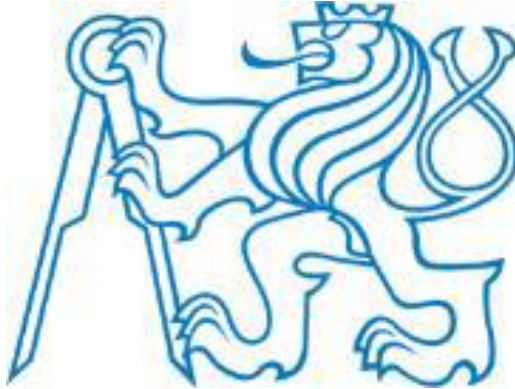


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavebná

Centrum experimentálnej geotechniky



Diplomová práca

Vplyv tepla na geotechnické vlastnosti bentonitu

Influence of the heat on the geotechnical properties of the bentonite

Vypracovala: Bc. Mária Kollárová

Študijný odbor: Inžinierstvo životného prostredia

Školiteľ: Ing. Jiří Svoboda Ph.D.



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavebná

Thákurova 7, 166 29 Praha 6

PREHLÁSENIE

Meno zhotoviteľa: Bc. Mária Kollárová

Názov diplomovej práce: Vplyv tepla na geotechnické vlastnosti bentonitu

Prehlasujem, že som danú diplomovú prácu vypracovala samostatne pod vedením školiteľa Ing. Jiřího Svobody Ph.D.

Použitá literatúra a materiály sú uvedené v zozname použitých zdrojov pre túto diplomovú prácu.

V Prahe dňa: _____

podpis

Pod'akovanie

Chcela by som sa pod'akovať môjmu školiteľovi Ing. Jiřímu Svobodovi Ph.D. za trpezlivosť a pomoc pri vypracovávaní mojej práce.

Ďalej by som chcela pod'akovať Centru experimentálnej geotechniky, kde som mala možnosť uskutočniť svoje merania a za pomoc ich zamestnancov.

Moje najväčšie ďakujem patrí mojím rodičom, s ktorých podporou som mala možnosť napísať diplomovú prácu a ktorí mi umožnili štúdium na tejto škole.

Abstrakt

V budúcnosti sa v Českej republike plánuje postaviť hlbinné úložisko rádioaktívneho odpadu a ako materiál, ktorý sa použije na tesnenie v tesniacej bariére, bol v návrhu SURAO vybraný bentonit. Aby sa zaručila tesniaca schopnosť bentonitu, je nutné preskúmať okrem iného aj zmenu jeho vlastností vplyvom tepla, nakoľko pri rozklade rádionuklidov vzniká teplo, ktoré môže ovplyvniť účinnosť tesniacej bariéry. Preto sa táto práca zaoberá zmenou vybraných geotechnických vlastností bentonitu vplyvom tepla.

V práci sa skúma vplyv teploty na hodnoty konzistenčných medzí a swell indexu. Ďalej sleduje vplyv teploty na vybrané geotechnické vlastnosti vzoriek bentonitu počas zaťažovacieho testu v oedometroch umiestnených v tepelnom laboratóriu pri 60°C a v laboratóriu pri 20°C. V priepustomeroch zisťuje bobtnací tlak a hydraulickú vodivosť rôzne zhutnených vzoriek.

Z výsledkov vyplýva, že teplo ovplyvňuje vlastnosti bentonitu. Najvýraznejší vplyv tepla bol zistený na medzu tekutosti, ktorá bola na meranej vzorke bentonitu vystavenej pôsobeniu tepla minimálne o 20 percentných bodov nižšia. Hodnoty Swell indexu boli tiež výrazne nižšie na zaťaženej vzorke. Vplyv tepla na bobtnací tlak nebol dostatočne preukázaný, aj keď sa javí, že vplyvom tepla sa znižuje.

Abstract

In the future, a deep repository of radioactive waste is planned in the Czech Republic. As a material to be used for sealing the sealing barrier, a bentonite was selected in the SURAO design. To guarantee the sealing capacity of bentonite, it is necessary to examine, among other things, the change in its properties due to heat, since the decomposition of the radionuclides results in heat that may affect the effectiveness of the sealing barrier. Therefore, this work deals with the change of selected geotechnical properties of bentonite due to heat.

In the research section, it examines the effect of temperature on the consistency and swell index values. It further monitors the effect of temperature on the selected geotechnical properties of bentonite samples during the load test in oedometers located in the thermal laboratory at 60 °C and in the laboratory at 20 °C. It detects the swelling pressure and the hydraulic conductivity of the various compacted samples in the special device.

The results show that heat affects the properties of bentonite. The most striking effect of heat was found on the liquid rate that was lower by at least 20 percentage points on the measured bentonite exposed to heat. Swell index values were also significantly lower on the loaded sample. The influence of heat on the swelling pressure has not been sufficiently demonstrated, although it appears that the influence of heat reduces the swelling pressure.

Obsah

1. Úvod.....	8
2. Geotechnické vlastnosti zemín.....	9
2.1 Konzistenčné medze	9
2.1.1 Medza tekutosti	10
2.1.2 Medza plasticity.....	12
2.1.3 Index plasticity	13
2.1.4 Index konzistencie	13
2.2 Hydraulická vodivosť	14
2.3 Bobtnanie a konsolidácia (stlačiteľnosť)	16
2.3.1 Stanovenie bobtnacieho tlaku skúškou s konštantným objemom vzorky	17
2.3.2 Stanovenie bobtnacieho tlaku a konsolidácie skúškou s riadeným napätím ...	17
2.4 Swell index	18
3. Bentonit.....	19
3.1 Výskyt.....	19
3.2 Zloženie	20
3.3 Vlastnosti	21
3.3.1 Sorpčná schopnosť	21
3.3.2 Bobtnanie.....	21
3.3.3 Hydraulická vodivosť	22
3.3.4 Plasticita	22
3.4 Využitie.....	22
4. Vplyv tepla na geotechnické vlastnosti bentonitu.....	23
5. Výsledky laboratórneho výskumu.....	25
5.1 Atterbergerove medze	26
5.1.1 Testovaný materiál	26
5.1.2 Medza tekutosti	26
5.1.3 Medza plasticity.....	28
5.1.4 Záver.....	28
5.2 Swell index	29
5.2.1 Materiál.....	29
5.2.2 Postup	29
5.2.3 Záver.....	31
5.3 Hydraulická vodivosť a bobtnací tlak.....	31
5.3.1 Príprava vzoriek a testovaný materiál	31

5.3.2	Postup	32
5.3.3	Záver.....	35
5.4	Voľné bobtnanie a konsolidácia	36
5.4.1	Príprava vzoriek a testovaný materiál	36
5.4.2	Postup a priebeh testu	37
5.4.3	Záver.....	45
6.	Záver.....	48
7.	Zoznam obrázkov a tabuliek	49

1. Úvod

S rozvojom priemyslu a neustálou expanziou ľudskej populácie sa zväčšuje kvantita a aj zloženie odpadu. Preto je stále väčším problémom, ako sa bude s vyprodukovaným odpadom nakladať, či už spôsobom recyklácie alebo skládkovania.

V otázke skládkovania odpadu majú zásadný význam tesniace vrstvy, ktoré bránia úniku nebezpečných látok do okolia. Čoraz častejšie sa do týchto vrstiev používajú produkty na báze bentonitu.

V súčasnosti sa pracuje na návrhu hlbinného úložiska rádioaktívneho odpadu (situované v hĺbke okolo 500 m), ktoré bude izolované od prostredia multibariérovým systémom slúžiacim na ochranu pred únikom látok z uloženého odpadu do prostredia. Pre materiál, ktorý sa použije do tesniacej bariéry, bol vybraný vďaka vysokej bobtnacej schopnosti a nízkej hydraulickej vodivosti práve bentonit. Pri rozklade rádionuklidov vzniká teplo, ktoré môže negatívne ovplyvniť účinnosť tesniacej bariéry

Práca je experimentálne zameraná na skúmanie vplyvu tepla na geotechnické vlastnosti českého bentonitu B75 2010. Skúma vplyv teploty na hodnoty konzistenčných medzí, swell indexu, bobtnanie a priepustnosť.

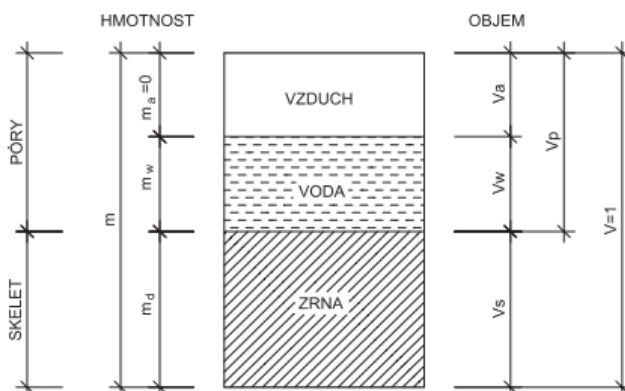
V prvej časti práce, ktorá je zameraná na výskum, sa skúmajú Atterbergerove medze a Swell index. Zmeny týchto vlastností sa skúmajú na vzorke bentonitu B75 2010 dlhodobo vystavenej pôsobeniu tepla okolo 206°C a získané hodnoty sa porovnávajú s hodnotami referenčnej vzorky.

V druhej časti sa skúma vplyv teploty na vybrané geotechnické vlastnosti vzorky bentonitu počas zaťažovacieho testu v oedometroch umiestnených v tepelnom laboratóriu pri 60°C a v laboratóriu pri 20°C. Porovnáva vývoj bobtnacieho tlaku a zmenu objemových hmotností počas trvania testu. Tieto parametre sú dôležité pri výbere bentonitu, ktorý sa použije ako tesniaci prvok do hlbinných úložísk.

V priepustomeroch bola zistená hydraulická vodivosť na rôzne zhutnených vzorkách a vyhodnotila sa závislosť počiatkovej objemovej hmotnosti a bobtnacieho tlaku - tesniaca bariéra musí mať čo najnižšiu hydraulickú vodivosť, aby čo najviac spomalila šírenie rádionuklidov.

2. Geotechnické vlastnosti zemín

Pôsobením geologických procesov vznikajú horniny. Horniny sa delia na spevnené alebo nespevnené. Nespevnené horniny sa označujú ako zeminy. Z fyzikálnej stránky je zemina zložitá prostredie pozostávajúce z troch fáz: pevnej, kvapalnej a plynnej (obr.1). Pomer týchto fáz ovplyvňuje vlastnosti danej zeminy. Vo väčšine prípadoch sa však o zemine uvažuje zjednodušene ako o dvojfázovom systéme (pevný a kvapalný).



Obrázok 1: Plynná, tekutá a pevná fáza zeminy(1)

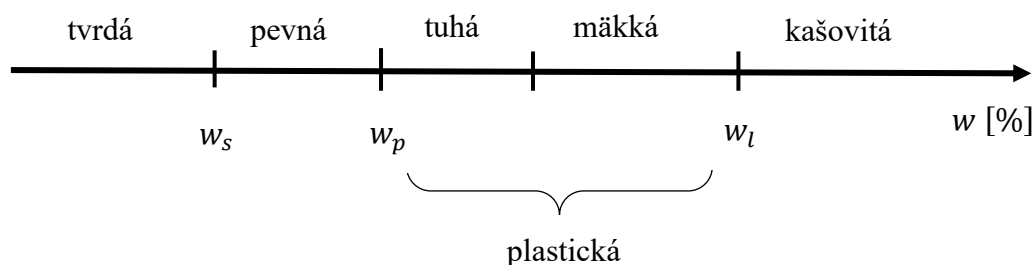
V rámci tejto práce boli skúmané nasledujúce geotechnické vlastnosti zemín:

- Konzistenčné medze
- Swell index
- Bobtnací tlak
- Hydraulická vodivosť

Vlastnosti zemín sa určujú laboratórnymi skúškami alebo skúškami in situ. V kapitolách nižšie sú presnejšie popísané vlastnosti a skúšky, ktoré boli uskutočnené v rámci tejto práce.

2.1 Konzistenčné medze

Mechanické vlastnosti súdržných zemín vo veľkej miere závisia od ich konzistenčného stavu. Voda v zemine môže byť rôzne viazaná a preto pri rovnakej vlhkosti môžu mať zeminy odlišnú konzistenciu. Vplyv kvapalnej fázy na vlastnosti zeminy stanovuje stupeň konzistencie. V závislosti na vlhkosti sa rozlišujú konzistenčné stavy podľa ČSN EN ISO 14688-1 na tvrdé, pevné, tuhé, mäkké a kašovité. Jednotlivé stavy sú definované pomocou konzistenčných medzí (obr.2).



Obrázok 2: Konzistenčné medze (2)

Existujú tri konzistenčné medze : medza tekutosti w_l , plasticity w_p a zmrašťiteľnosti w_s udávané v percentách. Sú to hraničné medze, kedy zemina mení konzistenciu.

Pre bentonit, ktorý sa použije do tesnicej bariéry HÚ zásadná medza tekutosti a plasticity, ktoré definujú oblasť, v ktorej si bentonit udržuje svoju plasticitu. Preto sú v práci ďalej vysvetlené a skúmané tieto vlastnosti.

2.1.1 Medza tekutosti

Medza tekutosti w_l je vlhkosť, pri ktorej zemina začína vykazovať šmykovú pevnosť. Je to hraničný stav medzi stavom tekutým a plastickým. Podľa w_l môžeme charakterizovať mieru plasticity zemín (tab.1). Medza tekutosti bentonitu skúmaného v tejto práci sa pohybuje v rozmedzí hodnôt 212 % - 236 %, z toho vyplýva, že jeho plasticita je extrémne vysoká.

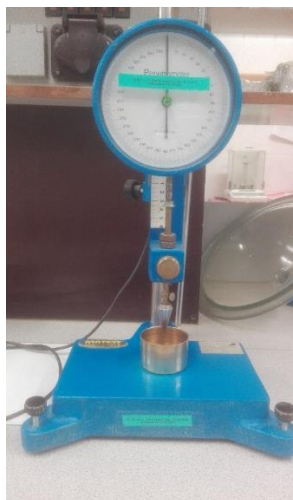
Tabuľka 1: Plasticita zemín podľa ČSN EN 1997-1 (731000)

w_l (%)	plasticita
< 35	nízka
35 - 50	stredná
50 - 70	vysoká
70 - 90	veľmi vysoká
> 90	extrémne vysoká

Stanovenie medze tekutosti

Medza tekutosti sa stanovuje podľa ČSN CEN ISO/TS 17892-12 Geotechnický prieskum a skúšanie – Laboratórne skúšky zemín – Časť 12: Stanovenie konzistenčných medzí pomocou kuželového prístroja alebo v Casagrandeho miske. V tejto práci bola medza

tekutosti zmeraná penetračným kužeľom 80g/30° (obr.3), preto bude ďalej vysvetlená táto metóda.



Obrázok 3: Aparatúra na meranie medze tekutosti – penetračný kužeľ 80g/30° v laboratóriu CEG

Vzorka bentonitu sa pred meraním zmieša s destilovanou vodou a nechá sa odstáť 24 hodín. Takto pripravenou pastou sa naplní nádoba určená na penetračnú skúšku, povrch zeminy sa zrovná a nádoba sa umiestni pod penetračný kužeľ. Je potrebné uskutočniť minimálne 3 merania na vzorkách s rôznym obsahom vody a penetráciou v rozmedzí hodnôt 15-20 mm, odčítaných z indikátorových hodínok.

Z nádoby sa po každom meraní odoberie menšie množstvo pasty (okolo 10 g) a umiestni sa do pece s teplotou 105°C, nechá sa vysušiť minimálne 24 hodín a následne sa znovu zváži. Zo zmeraných hodnôt sa pre jednotlivé penetrácie vypočíta hmotnostná vlhkosť vzoriek w [%] (1). Výpočet w je podľa normy ČSN EN ISO 17892-1 definovaný ako pomer hmotnosti vody m_w [g] v zemine ku hmotnosti vysušenej zeminy m_d [g].

$$w = \frac{m_w}{m_d} \cdot 100 \quad (1)$$

Kde: m_w – hmotnosť vody v zemine [g]

m_d – hmotnosť vysušenej zeminy [g]

w – hmotnostná vlhkosť zeminy [%]

Získané hodnoty penetrácií v závislosti na vlhkosti sa vynesú v semilogaritmickej mierke do grafu a preloží sa nimi spojnice trendu. Cieľom tejto skúšky je stanovenie vlhkosti, pri ktorej sa normový kužeľ zatlačí do zeminy 20 mm. Táto vlhkosť odpovedá medzi tekutosti a vypočíta sa po dosadení do rovnice trendu.

2.1.2 Medza plasticity

Vlhkosť, kedy je zemina ešte plastická, ale pri miernom poklese vlhkosti sa na nej začínajú objavovať praskliny (stráca svoju plasticitu), sa nazýva medza plasticity w_p [%].

Stanovenie medze plasticity

Medza plasticity sa stanovuje podľa ČSN CEN ISO/TS 17892-12 Geotechnický prieskum a skúšanie – Laboratórne skúšky zemín – Časť 12: Stanovenie konzistenčných medzí. Cieľom skúšky je stanovenie vlhkosti zeminy, pri ktorej sa vzorky vyvalkané na valčeky s priemerom 3 mm začínajú drobiť.



Obrázok 4: Valčeky pripravené do pece na zmeranie medze plasticity (laboratórium ČVUT).

Postup merania je nasledovný: vzorka o hmotnosti 20 g sa vyformuje do tvaru gule a valká sa, pokiaľ sa na nej neobjavia malé praskliny. Následne sa rozdelí na dve menšie guľičky po 10 g a tie sa potom rozdelia do 4 rovnakých častí. Z prichystaných vzoriek sa rolujú valčeky s priemerom 6 mm a z tých sa potom valkajú valčeky s priemerom 3 mm (obr.4). Vzorka je valkaná, pokiaľ valčeky nezačnú praskať vo všetkých smeroch. Takto pripravené vzorky sa zvažia a umiestnia do pece vyhriatej na 106°C. Zmerané hodnoty sa dosadia do vzťahu (2) a vypočíta sa medza plasticity.

$$w_p = \frac{m_w - m_d}{m_d} \cdot 100 \quad (2)$$

Kde: m_w – hmotnosť vlhkej vzorky [g]

m_d – hmotnosť vysušenej vzorky v gramoch [g]

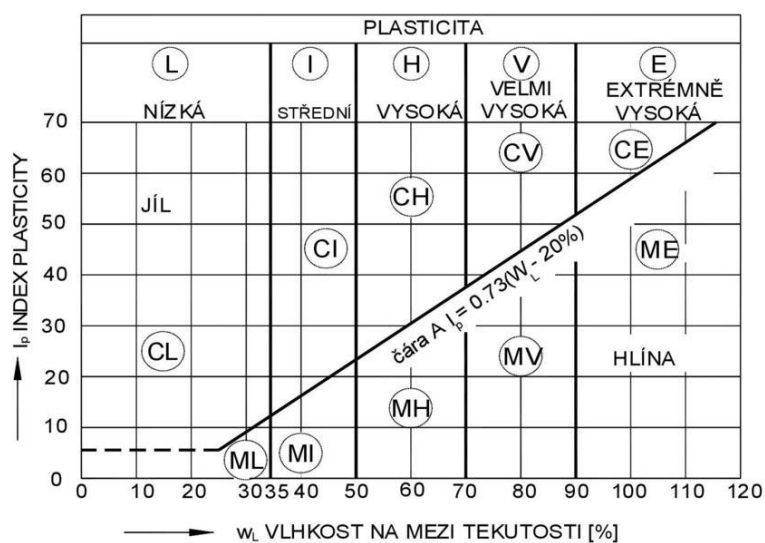
w_p – medza plasticity [%]

2.1.3 Index plasticity

Plasticita je schopnosť zemin viazať vodu bez toho, aby došlo k zmene jej stavu. Vyjadruje sa pomocou indexu plasticity I_p (3) udávaného v percentách. Je to rozdiel hodnôt medze tekutosti w_l a medze plasticity w_p :

$$I_p = w_l - w_p \quad (3)$$

Index plasticity vyjadruje rozsah vlhkosti, kedy je zemina ešte stále plastická. Vysoké hodnoty plasticity znamenajú, že zemina aj pri veľkom zvýšení vlhkosti neprechádza do stavu tekutého. Podľa normy ČSN EN 1997-1 zemin s indexom plasticity I_p väčším ako 50% a medzou tekutosti w_l väčšou ako 90% patria do oblasti zemín s extrémne vysokou plasticitou (obr.5). Bentonity patria do tejto oblasti. Hodnoty I_p sú vysoké. Z toho vyplýva, že oproti iným horninám vedú bentonity viazať veľké množstvo vody a udržať sa v plastickom stave (dokážu si udržať svoje tesniace účinky).



Obrázok 5: Diagram plasticity pre jemnozrnné zemin podľa normy ČSN EN 1997-1

2.1.4 Index konzistencie

Stav súdržných zemín sa najčastejšie popisuje číslom indexu konzistencie I_c (4). Jednotlivé konzistenčné stavy rozdelené podľa hodnôt I_c sú uvedené v tab.2.

$$I_c = \frac{w_l - w}{w_l - w_p} \quad (4)$$

Kde: w_l – medza tekutosti [%]

w_p – medza plasticity [%]

w – vlhkosť zeminy, pri ktorej sa stanovuje jej stav [%]

I_c – index konzistencie [–]

Tabuľka 2: Konzistenčné stavy.

Konzistenčné stavy	Veľmi mäkká	Mäkká	Tuhá	Pevná	Veľmi pevná
Rozmedzie I_c	< 0,25	0,25 – 0,50	0,50 – 0,75	0,75 – 1,00	> 1,00

2.2 Hydraulická vodivosť

Hydraulická vodivosť popisuje prúdenie kvapaliny prostredím. Je charakterizovaná filtračným súčiniteľom k , má jednotku [m/s]. Výpočet vychádza z Darcyho zákona, ktorý popisuje vzťah medzi priesakom q [m³/s], hydraulickým gradientom i [m/m] a plochou vzorky A [m²], ktorá je kolmá na smer prúdenia (5).

$$q = k \cdot i \cdot A \quad (5)$$

Hydraulický gradient i [m/m] je závislý od hydraulickej výšky h [m] a dráhy l [m], ktorú musí vodná častica prejsť zeminou (6).

$$i = \frac{\Delta h}{\Delta l} \quad (6)$$

V prípade tlakového sýtenia uskutočneného vo výskumnej časti práce sa hydraulická výška h [m] sa vypočíta z upraveného vzťahu:

$$h = \frac{p}{\rho \cdot g} \quad (7)$$

kde: p – sýtiaci tlak [Pa]

ρ – objemová hmotnosť kvapaliny [kg/m³]

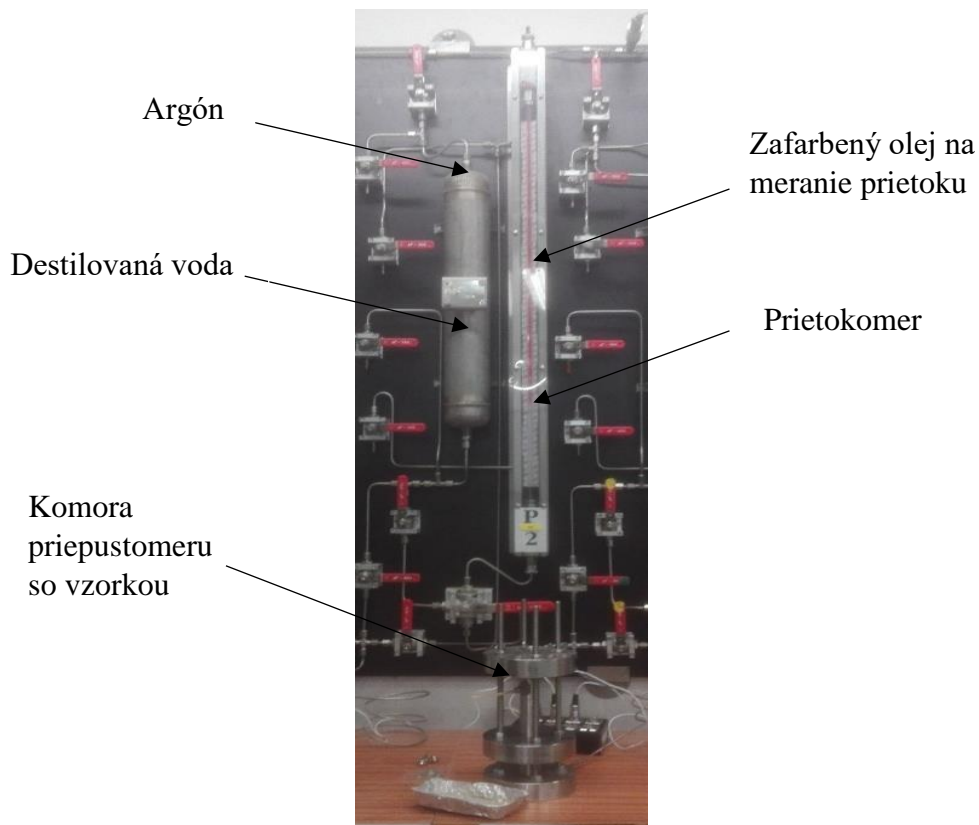
g – gravitačné zrýchlenie [m/s²].

Stanovenie hydraulickej vodivosti

Metódy merania hydraulickej vodivosti sú popísané v norme ČSN CEN ISO/TS 17892 - 11. Delia sa na merania v priepustomeri s konštantným spádom, merania v priepustomeri s premenlivým spádom a merania v triaxiálnej komore s konštantným spádom.

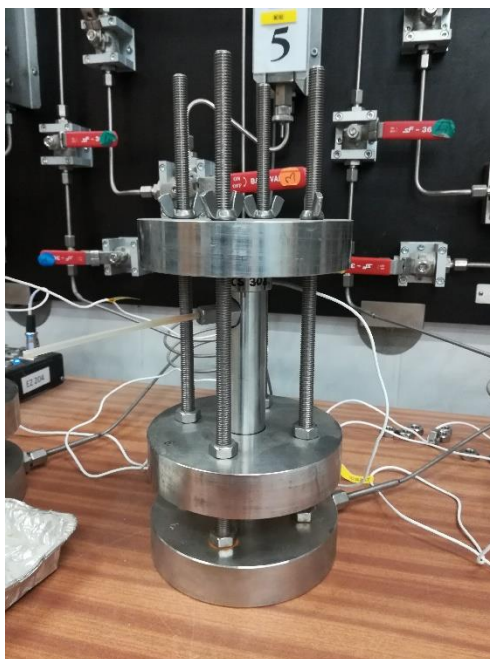
Bentonity majú nízku hydraulickú vodivosť. Preto vo výskumnej časti práce bolo na meranie použité špeciálne zariadenie – priepustomer s konštantným spádom (Obrázok 6), ktorý používa tlakové sýtenie. Tento spôsob je špecifický pre túto meraciu aparatúru.

Meracia aparatúra priepustomeru je zložená z komory, v ktorej je umiestnená vzorka, sýtiaceho systému, prietokomeru s kapilárou a ústredne, ktorá zaznamenáva namerané dáta.



Obrázok 6: Priepustomer CEG

Meranie prebieha nasledovne: Vzorka sa skonsoliduje na požadovanú objemovú hmotnosť a umiestni sa do oceľového prstenca. Prstenec je nasadený do komory (obr.7), kde je vzorka zabránená zmena objemu.



Obrázok 7: Komora so vzorkou CEG

Pomocou plynu stlačeného v tlakovej nádobe sa vháňa voda do komory so vzorkou cez prietokomer. Prietokomer je zložený zo sklenenej kapiláry so stupnicou (kapilára obsahuje zafarbený olej, pomocou ktorého sa sleduje objem vody vtláčenej do vzorky). Jeden dielik na stupnici kapiláry má veľkosť 0,01 ml. Silovým čidlom umiestneným na konci piestu sa meria sila, z ktorej sa vypočíta totálne napätie.

2.3 Bobtnanie a konsolidácia (stlačiteľnosť)

Pri kontakte vody a bobtnavej zeminy voda vyplňa pórovitý priestor a priestor v medzivrstvách. Dochádza k oddiaľovaniu vrstiev (zväčšovaniu objemu zrn) – bobtnaniu. Bobtnanie je charakterizované bobtnacím tlakom $\sigma_{sw}[kPa]$, ktorý vzniká, keď je bobtnavému materiálu zabránené zväčšiť svoj objem.

Na zmeranie bobtnacieho tlaku sa používajú dve metódy, pri ktorých:

1. je vzorka *zabránené meniť objem* – čo najviac sa zabraňuje objemovým zmenám zavodnenej vzorky; v tejto práci bol zmeraný tlak touto metódou v priepustomeroch viz kapitola 5.3
2. vzorka *mení objem* (merania s riadeným napätím) - meranie pomocou klasických oedometrov. V tejto práci bol zmeraný bobtnací tlak touto metódou viz kap.5.4.

2.3.1 Stanovenie bobtnacieho tlaku skúškou s konštantným objemom vzorky

V tejto práci boli na zmeranie bobtnacieho tlaku použité špeciálne upravené priepustomery s možnosťou merania totálneho napätia. Vzorka bola zhutnená priamo do prstenca, aby sa predišlo vzniku trhlin alebo medzier medzi vzorkou a prstencom a bolo tak zabránené zmene jej objemu. Následne prebehla skúška hydraulického vodivosti materiálu a vzorka sa tak úplne nasýtila. Tlak, ktorý vyvíjala vzorka na piest, bol meraný silovým čidlom. V aparátúre, kde je zabránené zmene objemu vzorky, sa bobtnací tlak rovná sile nameranej na čidlo (za neprítomnosti pórového tlaku):

$$\sigma_{sw} = \frac{F}{A} \quad (8)$$

Kde: σ_{sw} – bobtnací tlak [kPa]

F – sila nameraná na čidlo [kPa]

A – plocha vzorky [m^2]

Na totálne napätie má počas testu v priepustomeroch vplyv sýtiaci tlak (Hausmanová, 2017) a preto sa hodnota bobtnacieho tlaku odčíta z silového čidla až po ukončení sýtenia vzorky.

2.3.2 Stanovenie bobtnacieho tlaku a konsolidácie skúškou s riadeným napätím

Skúška pozostáva z dvoch častí. V prvej časti sa vzorka plne nasýti a nechá sa voľne bobtnať, pokiaľ sa deformácia neustáli. V druhej časti sa postupne konsoliduje (prebieha ekvivalent skúšky stlačiteľnosti).

Stlačiteľnosť patrí medzi základné deformačné charakteristiky zemín. K stlačeniu dochádza prírastkom napätia v zemine, kedy sa mení pôvodný stav napätosti a častice zeminy sa začnú preskupovať.

Meranie stlačiteľnosti je presne popísané v ČSN EN ISO 17892-5 Geotechnický prieskum a skúšanie zemín – Laboratórne skúšky zemín – Časť 5: Skúška stlačiteľnosti v oedometri postupným priťažovaním. Typy skúšok sa líšia podľa spôsobu zaťažovania vzorky na skúšku s riadeným napätím (plynule a skokové) a skúšku s riadenou deformáciou.

V tejto práci bola stlačiteľnosť meraná na oedometri s riadeným napätím. Základom skúšky je meranie jednoosej deformácie zeminy v závislosti na známom napätí a čase.

Vzorka je uložená do oedometrickej krabice (obr.8), kde je postupne zaťažovaná respektívne odľahčovaná (vzorka musí byť súčasne zaliata vodou). Počas merania na vzorku pôsobí konštantné napätie, ktoré sa vyvodzuje cez kladkový systém (obr.10) a sleduje sa deformácia vzorky v čase. Na zmeranie deformácie sa používajú indikátorové hodinky (obr.9).



Obrázok 10: Kladkový systém.



Obrázok 8: Oedometrická krabica.



Obrázok 9: Indikátorové hodinky.

2.4 Swell index

Tento index určuje základnú bobtnaciu charakteristiku bobtnacích materiálov. Slúži ako kvalitatívny indikátor pre ílovité zeminy. Nebola však preukázaná jeho korelácia s hydraulickými vlastnosťami.

Swell index - stanovenie

Do odmerného valca sa naleje 100 ml destilovanej vody. Na uskutočnenie skúšky sú potrebné 2 g pripravenej vysušenej vzorky zeminy, ktorá sa postupne po 0,1 g pridáva do odmerného valca s vodou. Aby došlo k úplnej hydratácii a usadeniu zeminy na dne valca,

musia byť medzi jednotlivými krokmi 10 minútové prestávky. Po pridaní celého množstva vzorky (2 g) sa odmerný valec zakryje na dobu 16 – 24 hodín, počas ktorej dôjde k úplnému usadeniu a nabobtnaniu. Ako vyhodnotenie skúšky slúži odčítanie objemu nabobtnanej zeminy z odmerného valca, čo odpovedá indexu bobtnania.

3. Bentonit

Názov bentonit vznikol na konci 19-teho storočia podľa ložiska Fort Benton v USA, kde bol poprvýkrát nájdený.

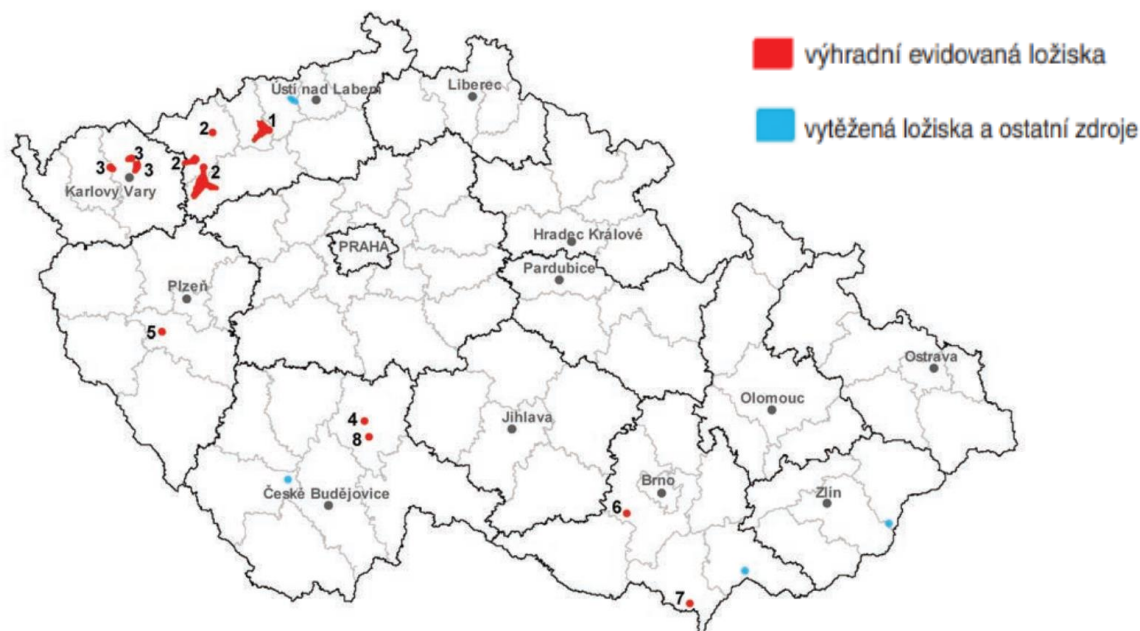
Bentonit je reziduálna ílovitá zemina, ktorá vzniká zvetrávaním sopečného popola a sopečných hornín ako tufy, tufity, čadiče. Zložený je z veľkej časti z minerálu montmorillonit, ktorý je nositeľom jeho charakteristických vlastností, ktorými sa vyznačuje a to sorpčnou schopnosťou, plasticitou, bobtnaním.

3.1 Výskyt

Bentonit sa ťaží skoro na celom svete, najviac však v USA vo Wyomingu; zdroj (5) uvádza, že z celkovej produkcie bentonitu produkuje USA až 70%. Ďalšie krajiny s ložiskami bentonitu sú Grécko, Japonsko, Mexiko, Taliansko atď.

V Českej republike sa ťaží bentonit od roku 1941. Ťažba prebieha prevažne na západnej časti v Českom stredohorí (obr. 11), kde sa nachádza najvýznamnejšie ložisko - konkrétne na ložisku Braňany u Mostu. Ďalšie náleziská sa nachádzajú v Karlovarsku, Kadaňsku, Podboransku, Třeboňskej panve (Maršov u Tábora), Plzeňskej panve. Najväčší producent bentonitu je v Českej republike firma Keramost, a. s.

V roku 2016 bolo v ČR podľa štatistických údajov Ministerstva životného prostredia 38 ložísk bentonitu

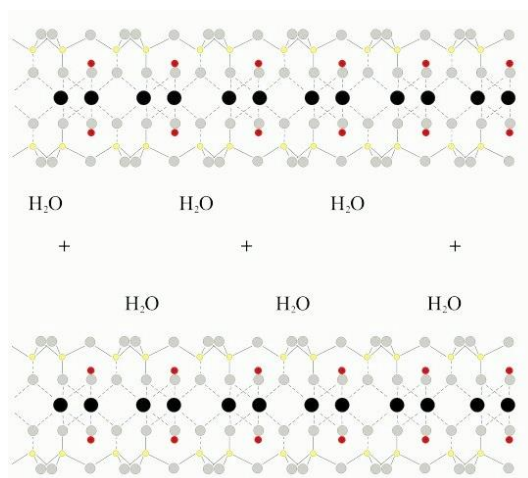


Obrázok 11: Výskyt ložísk bentonitu v ČR k roku 2017(3)

3.2 Zloženie

Presné mineralogické a chemické zloženie bentonitu je premenlivé a závisí od miesta jeho ložiska. Jeho hlavnú zložku však tvorí minimálne zo 60% minerál montmorillonit; ďalšie minerály, ktoré obsahuje, sú illity, kaolinity, beidellity a iné.

Montmorillonit patrí do skupiny trojvrstevnatých minerálov. Tieto minerály tvoria tri vrstvy, ktoré sú rozdielne vzdialené. V prostrednej vrstve montmorillonitov sa nachádzajú výmenné kationy, ktoré ovplyvňujú ich sorpčnú schopnosť. Bobtnaciu schopnosť bentonitov ovplyvňuje práve montmorillonit. Vplyvom tepla sa môže montmorillonit nevratne meniť na illit.



Obrázok 12 Kryštáľová mriežka montmorillonitu (4)

Illit je taktiež trojvrstevnatý minerál. V prostrednej vrstve sa však nachádza namiesto výmenných katiónov draslík, preto tento minerál skoro vôbec nebobtná.

Kaolinity patria medzi dvojvrstevnaté minerály. Sú tvorené dvomi vrstvami, ktoré sa vzájomne silno priťahujú. Často tvoria súčasť sedimentov a používajú sa pri výrobe porcelánu.

3.3 Vlastnosti

Vďaka svojmu zloženiu má bentonit špecifické vlastnosti a to bobtnanie, vysokú sorpčnú schopnosť, plasticitu a schopnosť výmeny katiónov. Jeho vlastnosti sú stále (nemienia sa dobu dlhšiu ako 1 000 rokov). Pre tieto vlastnosti je možné bentonit využiť v rôznych oblastiach, viac v kapitole 3.4.

3.3.1 Sorpčná schopnosť

Sorpčia je proces, kedy je jedna látka viazaná inou látkou procesom absorpcie alebo adsorpcie.

- absorpcia (objemové pohlcovanie) – schopnosť viazať molekuly inej látky vo svojom objeme.
- adsorpcia (povrchové pohlcovanie) – schopnosť viazať iné látky na svojom povrchu.

Bentonity majú vysokú sorpčnú schopnosť t. j. dokážu prijať vodu, ktorá sa viaže na povrch zrna alebo sa ukladá medzi zrnami, poprípade vstúpi do medzivrstvia, kde sa viaže na molekuly katiónov.

3.3.2 Bobtnanie

Bobtnanie je schopnosť materiálu zväčšovať svoj objem prijímaním vody (kap.2.3). Pri bentonite je bobtnanie závislé na schopnosti viazania molekúl vody do medzivrstvia, kde sa voda naviaže na katióny, tým oddiali vrstvy od seba a dôjde k zväčšeniu objemu materiálu – bobtnaniu.

Bentonity sa podľa ich bobtnacej schopnosti delia na silno bobtnavé (výmenný katión je Na^+) a menej bobtnavé (výmenný katión je K^+ , Ca^+ , Mg^+).

Mieru bobtnania bentonitu z veľkej miery ovplyvňuje *objemová hmotnosť*. Čím väčšia je objemová hmotnosť sušiny, tým väčší bobtnací tlak bude vzorka vykazovať (Villar, 2008).

Teplota má vplyv na bobtnací tlak, ktorý klesá s rastúcou teplotou (Villar a Lloret, 2003). Táto práca sa v experimentálnej časti zaoberá práve touto problematikou.

3.3.3 Hydraulická vodivosť

Veľkosť hydraulickej vodivosti vo veľkej miere závisí od objemovej hmotnosti bentonitu – s narastajúcou objemovou hmotnosťou klesá hydraulická vodivosť.

Hydraulickú vodivosť ďalej závisí od typu výmenného katiónu v medzivrství bentonitu. Bentonity s viacmocným katiónom vykazujú vyššiu hydraulickú vodivosť (vápenatý bentonit Ca^{2+} má vyššiu hydraulickú vodivosť ako sodný bentonit Na^+).

Teplota taktiež vplýva na hydraulickú vodivosť – s rastúcou teplotou rastie hydraulická vodivosť (Villar, 2003), avšak nie v takej miere ako ovplyvňuje bobtnací tlak.

3.3.4 Plasticita

Plasticitu bentonitov popisuje index plasticity I_p (2.1.3). Jeho veľkosť závisí od spracovania bentonitu – aktivované bentonity nadobúdajú vyššie hodnoty a všeobecne majú lepšie vlastnosti. Medza plasticity referenčnej vzorky, na ktorej boli uskutočnené merania v experimentálnej časti práce mala hodnotu I_p okolo 168 %, čo znamená, že bentonity sú vysoko plastické.

Práve vďaka svojej plasticite sa bentonit používa na tesnenie, pretože je odolný voči mechanickému poškodeniu a deformácii.

3.4 Využitie

Bentonit je prírodný materiál a má vďaka širokej škále vlastností (kap. 3.3) využitie v rôznych oblastiach (stavebníctvo, priemysel, potravinárstvo...).

- *priemysel* – najviac sa bentonit využíva v priemysle kvôli bobtnacím schopnostiam, pretože jeho fyzikálne vlastnosti sa menia s pomerom obsahu vody. Zmesi bentonitu a vody sa používajú ako suspenzie, spojivá, plastifikátory (tieto spojivá musia mať určité adhezívne vlastnosti, ktoré sa docielia pridaním len malého množstva vody).

- *potravinárstvo* – v potravinárstve slúži bentonit na čistenie, stabilizáciu a odfarbovanie rastlinných a živočíšnych tukov a olejov. Ďalej má využitie vo vinárstve pri čírení vín, adsorbuje proteíny a odstraňuje bielkovinový zákal. Jeho účinnosť závisí od zloženia (Na bentonity s väčšou bobtnacou schopnosťou adsorbujú viac bielkovinových molekúl) a od pH, kedy nízke pH má pozitívny vplyv pri adsorpcii bielkovinových molekúl na bentonit.

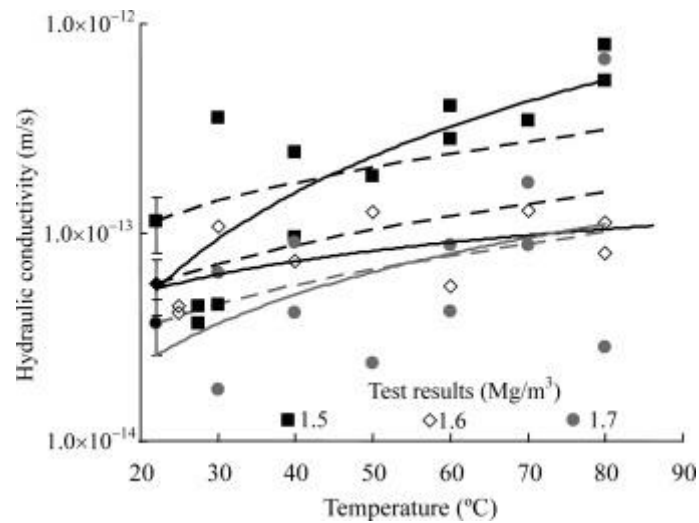
- *stavebníctvo* – bentonit sa v stavebníctve využíva predovšetkým v tesniacich vrstvách skládok odpadu (geosyntetické ílové rohože), tunelov a priehrad, na zlepšenie zemín injektážou. Pridáva sa do betónov a využíva sa pri vrtných prácach, pažení podzemných stien..

- *Bentonit ako tesniaca bariéra v HÚ* - bentonity sa čoraz častejšie používajú ako materiál slúžiaci na tesnenie pri navrhovaní zariadení na skladovanie rádioaktívneho odpadu. Vytvárajú bariéru, ktorá má zabrániť prechodu znečisťujúcich látok do okolitého prostredia. Vďaka svojej nízkej hydraulickej vodivosti a vysokej sorpčnej kapacite je bentonit považovaný za vhodný materiál na tesnenie HÚ. Hydraulická vodivosť zhutneného bentonitu sa znižuje s rastúcou počiatočnou objemovou hmotnosťou, preto sa odporúča vysoko zhutnený bentonit, ktorý vďaka jeho nízkej hydraulickej vodivosti pri narušení nádoby na rádioaktívny odpad spomaľuje prechod rádionuklidu cez tesniacu vrstvu

4. Vplyv tepla na geotechnické vlastnosti bentonitu

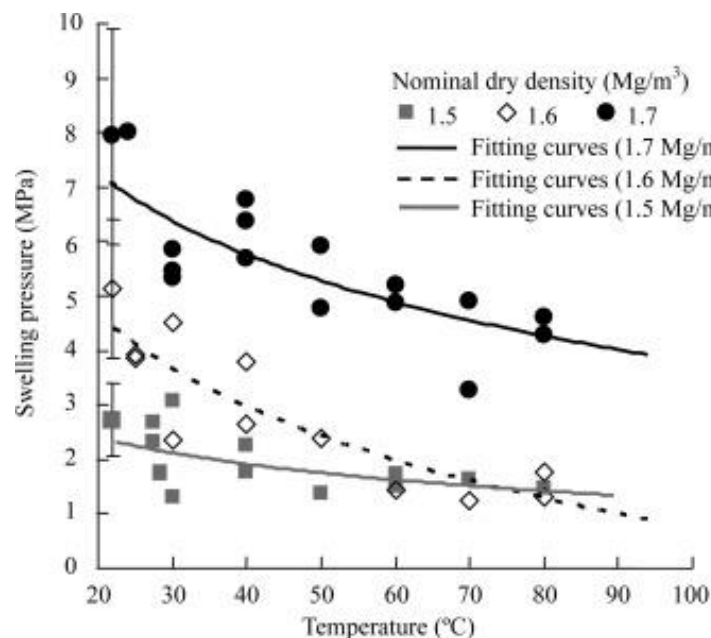
Veľkosť vplyvu teploty na ílované zeminy závisí na tom, ako sú skonsolidované, na ich plasticite, bobtnacej schopnosti a obsahu vody. V závislosti od odlišných vlastností má teplota rôzny vplyv na zeminy – môže sa zmrašťovať alebo bobtnať, nadobúdať rôznu konzistenciu... Tieto účinky môžu byť vratné aj nevratné. Napríklad objem bežne skonsolidovaných ílov sa zmrašťuje pri zahrievaní, zatiaľ čo vysoko skonsolidované íly sa rozpínajú (Baldi a kol., 1988, Romero a kol., 2001).

Ouyang a Daemen (1992) skúmali hydraulicкую vodivosť bentonitu pri zmene teploty až do 90°C. Výsledky práce však nepreukázali veľkú závislosť vplyvu teploty na vlastnosti zeminy – hydraulická vodivosť pri teplote 90°C bola iba dvakrát vyššia ako pri 20°C. Vplyv teploty na hydraulicкую vodivosť je menej zjavný ako na bobtnací tlak (M.V Villar, A Lloret, 2004 – skúmaný bentonit s objemovou hmotnosťou 1,58 g/cm³). Hydraulická vodivosť má tendenciu stúpať so stúpajúcou teplotou, pretože vplyvom teploty sa znižuje viskozita vody. Z grafu na obr.13 (Villar, 2010) je viditeľný vplyv tepla na hydraulicкую vodivosť.



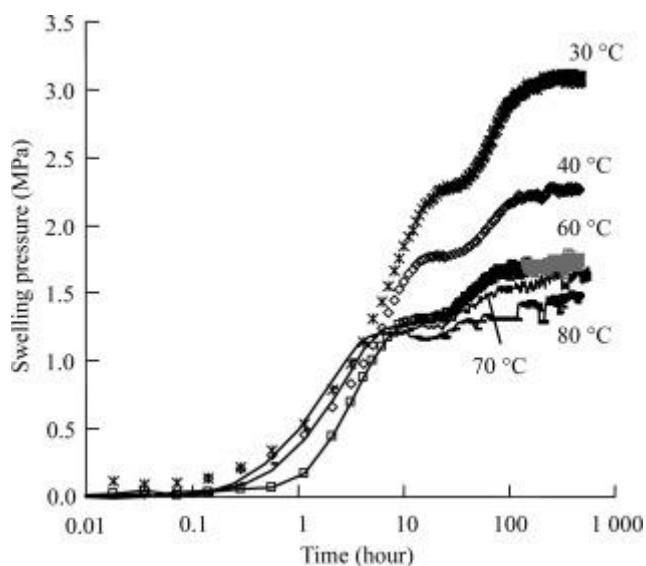
Obrázok 13: : Vplyv teploty na hydraulickú vodivosť pre vzorky s počiatočnými objemovými hmotnosťami 1,5; 1,6 a 1,7 Mg/m³ (M.V.Villar 2010)

M.V.Villar, A.Lloret skúmali vplyv teploty na bobtnací tlak bentonitu s objemovými hmotnosťami 1,5 kg/m³ 1,6 a 1,7 kg/m³. Výsledky ukázali, že s narastajúcou teplotou bobtnací tlak klesá. Vplyv teploty sa taktiež mení v závislosti od objemovej hmotnosti – čím je vyššia, tým väčší vplyv má teplota na pokles hodnôt bobtnacieho tlaku (obr.15).



Obrázok 14: Bobtnací tlak ako funkcia teploty (M.V.Villar)

Na obr. 15 je graf priebehu bobtnacieho tlaku pri rôznych teplotách. Pre vzorku s objemovou hmotnosťou $1,5 \text{ Mg/m}^3$ je zmena veľkosti bobtnacieho tlaku pri 30°C a pri 60°C takmer dvojnásobná. V práci sa taktiež porovnával bobtnací tlak pri týchto teplotách



Obrázok 15: vývoj bobtnacieho tlaku pri rôznych teplotách vzorku s počiatočnou objemovou hmotnosťou $1,5 \text{ Mg/m}^3$ (M.V.Villar 2010)

5. Výsledky laboratórneho výskumu

Cieľom práce bolo skúmanie do akej miery má teplo vplyv na bentonit na vybrané geotechnické vlastnosti českého bentonitu B75 2010.

V prvej časti práce zisťoval vplyv tepla na hodnoty Atterbergerových medzí a Swell indexu. Testy prebiehali na vzorke vystavenej dlhodobému pôsobeniu tepla a porovnával sa s nezaťažou vzorkou.

Ďalšia časť práce bola zameraná na sledovanie vplyvu teploty na priebeh voľného bobtnania a konsolidácie počas zaťažovacieho testu v oedometroch rôzne zhutnených vzoriek. Boli umiestnené do meracích aparátú do laboratória pri teplote okolo 20°C a do tepelného laboratória špeciálne postaveného pre tieto merania pri teplote 60°C . Zisťovali sa zmeny ich objemových hmotností v závislosti na čase a na napätí.

Posledná časť práce bola zameraná na merania hydraulikkej vodivosti a bobtnacieho tlaku rôzne zhutnených vzoriek na priepustomeroch. Pôvodne sa mali zmerať hodnoty pri laboratórnej teplote, potom v tepelnom laboratóriu a získané hodnoty mali byť porovnané. Testovanie materiálu v tepelnej saune na oedometroch však trvalo dlhšie ako bolo očakávané a kvôli časovému sklzu sa zamýšľané merania nestihli počas písania tejto práce uskutočniť.

Hodnoty sa použili v záveroch na porovnanie bobtnacieho tlaku nameraného na oedometroch a priepustomeroch.

5.1 Atterbergerove medze

Bol zisťovaný vplyv teploty na medzu tekutosti a plasticity. Pre bentonity sú tieto vlastnosti kľúčové. Z ich hodnôt sa určuje index plasticity, ktorého vysoké hodnoty sú charakteristické pre túto zemínu.

5.1.1 Testovaný materiál

Vplyv tepla na konzistenčné medze v tejto práci sa skúmal na vzorke horečnato - vápenatého bentonitu B75-2010 ťažený firmou Keramost, a. s. na ložiskách Černý vrch a Rokle, priemyselne spracovanou a premlitou. Materiál bol umiestnený v peci s teplotou okolo 200°C (ďalej ako zaťažný (obr.16). Namerané hodnoty sa porovnávali s referenčnou vzorkou bentonitu (ďalej ako nezaťažný (obr. 17)),



Obrázok 16: Zaťažná vzorka



Obrázok 17: Nezaťažná vzorka.

5.1.2 Medza tekutosti

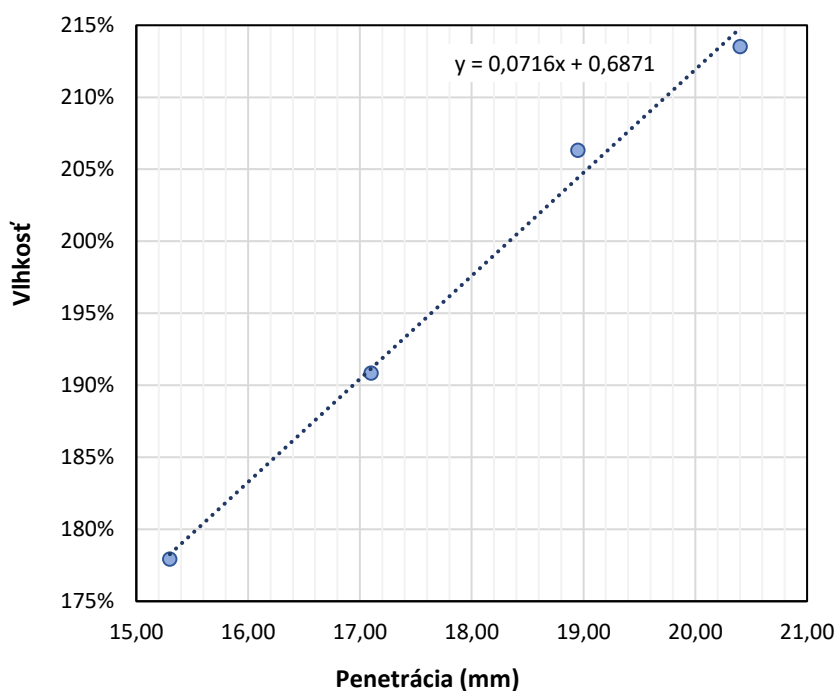
Pre stanovenie medze tekutosti bol použitý postup v kap 2.1.1. Boli uskutočnené dve série meraní. Prvá séria meraní na referenčnej vzorke sa uskutočnila 8 hodín od prípravy pasty a na vzorke zaťaženej vplyvom tepla bola uskutočnená prvá séria meraní po 24 hodinách od prípravy pasty. V prvej sérii meraní nebol dodržaný normový postup (vzorka nemala dostatočný čas na homogenizáciu), preto sa uskutočnila druhá séria meraní, v ktorej boli vzorky homogenizované presne podľa normy. Obidve merania sa uskutočnili dva dni od prípravy pasty. Výsledky druhej série meraní (hodnoty jednotlivých penetrácií a príslušných vlhkostí vzoriek) sú uvedené v Tabuľka 3. Tieto merania boli vynesené do grafov (obr.18 a obr.19) a boli nimi preložené spojnice trendu. Z rovníc priamok trendov sa

zistili medze tekutosti w_{l_1} – *nezaťažený* a w_{l_2} – *zaťažený*, zodpovedajúce penetrácií 20 mm. Medze tekutosti nezaťaženého vzorku zodpovedá hodnota $w_{l_1} = 221 \%$. Zistená medza tekutosti pre vzorku vystavenú pôsobeniu tepla $w_{l_2} = 196 \%$.

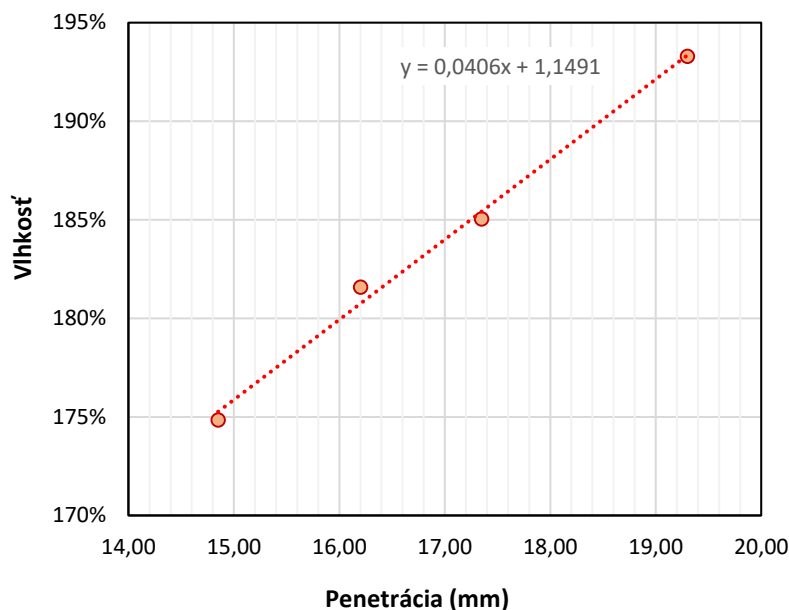
V prvej sérii meraní, kedy sa nedodržel potrebný čas na homogenizáciu vzoriek, boli namerané hodnoty minimálne o 10 percentných bodov nižšie.

Tabuľka 3: Hodnoty penetrácií a príslušných vlhkostí vzoriek.

Nezaťažená vzorka	Priemerná penetrácia (mm)	15,30	17,10	18,95	20,40
	Vlhkosť (%)	117,9	190,8	206,3	213,5
Zaťažená vzorka	Priemerná penetrácia (mm)	14,85	16,20	17,35	19,30
	Vlhkosť (%)	174,8	181,6	185,0	193,3



Obrázok 18: Závislosť penetrácie od vlhkosti (nezaťažená vzorka).



Obrázok 19: Závislosť penetrácie od vlhkosti (zaťažená vzorka).

5.1.3 Medza plasticity

Na zistenie medze plasticity vzoriek bol použitý postup v kap. 2.1.2. Presný postup merania bol pomerne náročný a pri val'kaní valčekov s priemerom 3 mm sa pasta lepila na sklo. Mohli pre to vznikajú nepresnosti v meraní. Ostatné kroky boli uskutočnené podľa normy a namerané hodnoty boli dosadené do vzorca pre výpočet medze plasticity (2). Výsledky testu sú uvedené v Tabuľka 4. Zistená medza plasticity pre vzorku vystavenú pôsobeniu tepla bola $w_{p_1} = 45 \%$. Medze plasticity nezaťaženého vzorku zodpovedá hodnota $w_{p_2} = 53 \%$.

Tabuľka 4: Hmotnosti vzoriek bentonitu a výsledné medze plasticity.

	Nezaťažený	Zaťažený	
m_w [g]	18,53	18,4	17,9
m_d [g]	12,11	12,87	12,34
w_p [%]	53,0	43,0	45,0

5.1.4 Záver

Meranie Atterbergerových medzí je citlivé na postup. Pre konzistentné výsledky je nutné, aby boli dodržané normové postupy. V práci boli uskutočnené dve série meraní na vzorkách bentonitu, z ktorých je to jasne viditeľné.

Hodnota medze tekutosti vzorky, ktorá bola vystavená pôsobeniu tepla ($w_{l_2} = 196\%$) bola o 25 percentných bodov nižšia ako hodnota referenčnej vzorky bentonitu ($w_{l_1} = 221\%$). Z toho vyplýva, že zvyšovanie tepla má negatívne účinky na požadované vlastnosti bentonitu.

Z výsledkov meraní nie je viditeľný vplyv teploty na medzu plasticity. Hodnota zaťaženej vzorky je mierne nižšia, avšak veľkosť tohto rozdielu pri určovaní vlastnosti bentonitu nie je kľúčová, taktiež dochádzalo k pomerne veľkým nepresnostiam merania.

Pôsobením vysokej teploty sa znižuje index plasticity I_p zo 178 % na 148 %. Bentonity, ktoré sa používajú na tesnenie a zaplňovanie trhlín a spár, by mali mať čo najvyšší index plasticity. Aj napriek vplyvu pôsobenie vysokej teploty patrí bentonit stále do skupiny zemín s extrémne vysokou plasticitou (Tabuľka 1).

5.2 Swell index

Stanovenie Swell indexu slúži na orientačné účely ako kvalitatívna charakteristika bentonitu. Skúška bola uskutočnená na zistenie vplyvu tepla na bobtnanie materiálu.

5.2.1 Materiál

Meranie Swell indexu sa uskutočnilo na dvoch vzorkách bentonitu B75. Prvá vzorka bola vystavená pôsobeniu tepla 105°C v období 3 mesiacov (vzorka 1). Druhá vzorka bola umiestnená v peci pri teplote 206°C okolo 2 rokov (vzorka 2). Bola preosiata cez sito s veľkosťami oka pre väčšiu frakciu ako vzorka 1.

5.2.2 Postup

Vzorka sa rozdelila na dve časti. Prvá časť vzorky materiálu bola zvážená a umiestnená na 24 hodín do pece pri teplote 105°C pre zistenie aktuálnej vlhkosti. Postupovalo podľa normy ČSN EN ISO 17892-1. Z nameraných hodnôt sa určili vlhkosti a zapísali sa do Tabuľka 5. Vlhkosti sa vypočítali podľa vzorca (1).

Tabuľka 5: Hmotnosti vzoriek a výsledná vlhkosť.

	Vzorka 1	Vzorka 2
$m_w[g]$	17,90	13,09
$m_d[g]$	18,87	13,05
$w[\%]$	1,56	0,31

Na druhej časti vzoriek bolo uskutočnené meranie Swell indexu. Kvôli náročnosti postupu popísaného v kap.2.4, kde sa v jednotlivých krokoch sype do odmerného valca po 0,01 g materiálu a kvôli typu odmerného valca, ktorý mal stupnicu od 10 ml (vzorka o 2 g by zrejme nenabobtnala do objemu, ktorý je možné odčítať z stupnice) sa na uskutočnenie skúšky použila vzorka s väčšou hmotnosťou. Celková hmotnosť vzorky, ktorá sa testovala, bola 3 g. Materiál sa sypal do valca spôsobom, aby sa nevytvorili hrudy. Výsledok skúšky bol prepočítaný pre 2 g materiálu. Swell index SI [$ml/2g$] sa vypočítal pomocou vzorca (9) a výsledok skúšky je zobrazený na obrázku 20.

$$SI = \frac{z}{m_d} \cdot V \quad (9)$$



Obrázok 20: Odmerné valce po skúške merania Swell indexu. Vľavo vzorka z pece pri teplote 105°C, vpravo vzorka z pece pri teplote 206°C.

5.2.3 Záver

Hodnoty namerané počas skúšky sú uvedené v Tabuľka 6.

Tabuľka 6: Hodnoty namerané na vzorkách testovaných na Swell index.

	Vzorka 1	Vzorka 2
<i>m</i> [g]	3,0	3,04
<i>m_d</i> [g]	2,95	3,03
<i>w</i> [%]	1,56	0,31
<i>Objem</i> [ml]	15	21
<i>Swell index</i> [ml/2g]	10,2	13,9

Výsledný Swell index bol vyšší u vzorky 2, ktorá bola dlhodobejšie vystavená vyššej teplote. Porovnanie hodnôt medzi sebou nepotvrdilo predpoklad vyššej bobtacej schopnosti pre vzorku 1. Výsledok mohla ovplyvniť príprava vzorky (rozdielne veľkosti zŕn) a prevedenie testu na vzorku 1, kedy sa do odmerného valca nasypalo v niekoľkých krokoch mierne väčšie množstvo materiálu, čo mohlo ovplyvniť veľkosť nabobtnania vzorky.

Obidve hodnoty namerané v tejto práci na vzorkách zaťažených vplyvom tepla sú nižšie oproti referenčnej hodnote SI nezaťaženej vzorky bentonitu B75 2010 SI = 22 ml/2g (CEG), z čoho je možné usúdiť, že teplo má vplyv na bobtanciu schopnosť materiálu.

5.3 Hydraulická vodivosť a bobtnací tlak

Na zmeranie hydraulickej vodivosti a bobtnacieho tlaku sa uskutočnili testy v priepustomeroch na troch vzorkách zhutnených s počiatocnými objemovými hmotnosťami sušiny 1300 kg/m^3 , 1500 kg/m^3 , 1700 kg/m^3 . Znalosť priebehu hydraulickej vodivosti bentonitu použitého v tesniacej bariére HÚ je dôležitá – nízka vodivosť spomalí únik škodlivých látok z úložiska.

5.3.1 Príprava vzoriek a testovaný materiál

Vzorky potrebné na uskutočnenie testu sa lisovali priamo do prstenca meracej komory. Pre zlisovanie na požadované počiatocné objemové hmotnosti bolo nutné vypočítať hmotnosť navážky. Na výpočet hmotnosti navážky sa musela zistiť počiatocná hmotnostná vlhkosť testovaného bentonitu. Podľa normy ČSN EN ISO 17892-1 (Laboratórne stanovenie vlhkosti zemín) sa určila vlhkosť zo vzorca (1). Namerané hodnoty sú uvedené v tabuľke 7.

Tabuľka 7: Hmotnostná vlhkosť testovanej vzorky bentonitu B75 2010.

	Prvé meranie	Druhé meranie
m_w [g]	6,77	6,59
m_d [g]	6,16	6,00
w [%]	9,90	8,83

Hmotnostná vlhkosť sa zaokrúhlila na $w = 10 \%$ a vypočítali sa hmotnosti navážok. Podľa vzorca (10) sa vypočítala hmotnosť vzorky m_d v suchom stave. Následne sa podľa vzorca (11) vypočítala hmotnosť navážky, ktorá bola potrebná, aby sa vzorka zhutnila na požadované objemové hmotnosti.

$$m_d = \rho_s \cdot V \quad (10)$$

Kde: ρ_s – požadovaná objemová hmotnosť [kg/m^3]

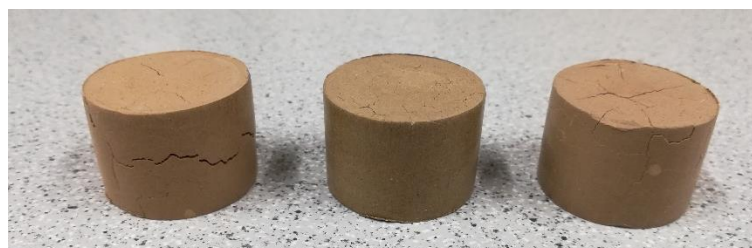
V – objem vzorky [m^3]

$$m = m_d \cdot (1 + w) \quad (11)$$

Vypočítané množstvo sypkého materiálu (navážka) sa zhutnilo priamo do prstenca v meracej komore (obr.22). Skutočné ρ_d sú uvedené v tabuľke :

Tabuľka 8: Skutočné počiatočné objemové hmotnosti sušiny ρ_d vzoriek určených na test v priepustomeri

	Vzorka 1	Vzorka 2	Vzorka 3
Vlhkosť [%]	10	10	10
Objem [m^3]	$1,39958 \cdot 10^{-5}$	$1,4066 \cdot 10^{-5}$	$1,38 \cdot 10^{-5}$
Hmotnosť [kg]	$20,47 \cdot 10^{-3}$	$23,46 \cdot 10^{-3}$	$26,45 \cdot 10^{-3}$
m_d [kg]	$18,61 \cdot 10^{-3}$	$32,33 \cdot 10^{-3}$	$24,05 \cdot 10^{-3}$
ρ_d [kg/m^3]	1330	1517	1745

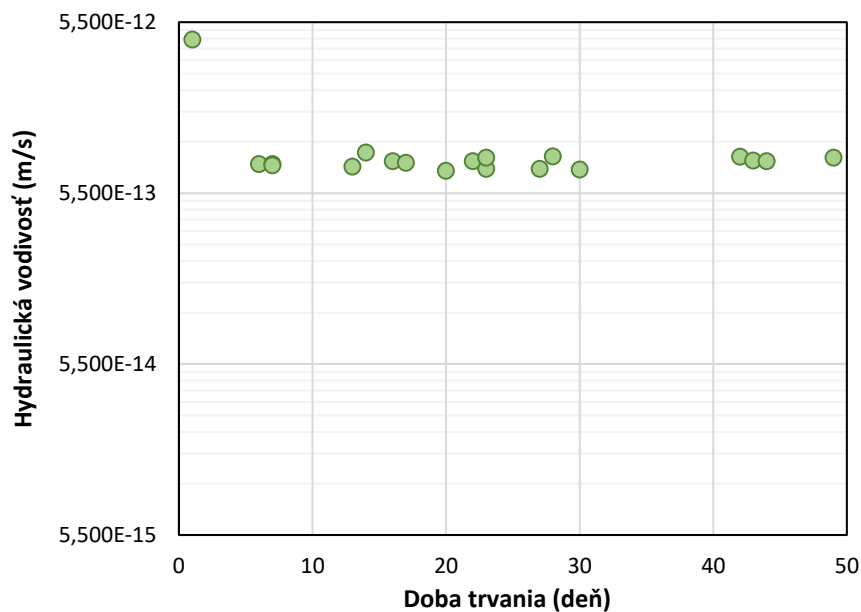


Obrázok 21: Zhutnený bentonit z prstencov priepustomeru (po skúške)

5.3.2 Postup

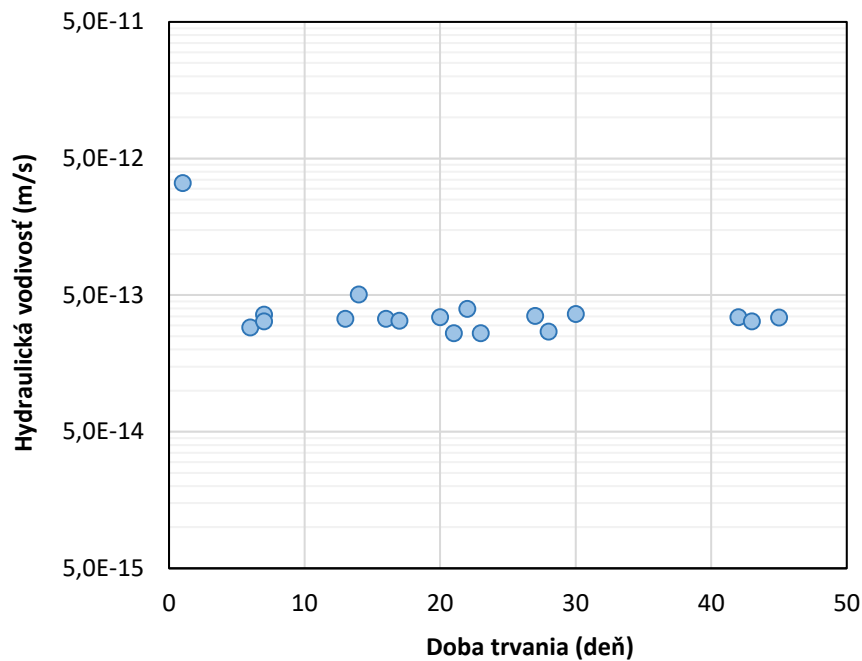
Zhutnené vzorky sa umiestnili do komory priepustomeru (obr.7) a začali sa sýtiť tlakom medzi 960 až 970 kPa. Na začiatku testu prebiehalo sýtenie vzorky bez merania prietoku (úvodné sýtenie). Následne sa začal z prietokomeru odčítavať prietok kvapaliny

vzorkou. V závislosti prietoku od času sa vyhodnotil vývoj hydraulickej vodivosti (vzorce 5-7) pre jednotlivé objemové hmotnosti. Test prebiehal, pokiaľ sa hodnoty hydraulickej vodivosti a totálneho napätia neustálili.

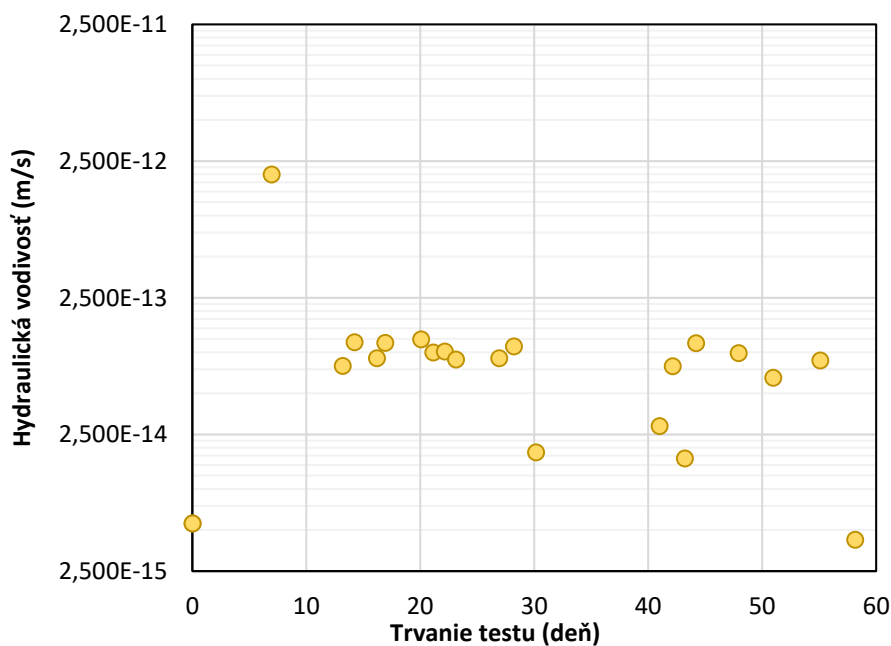


Obrázok 22: Vyhodnotenie hydraulickej vodivosti (objemová hmotnosť 1330kg/m³)

Hydraulická vodivosť vzorky s počiatočnou objemovou hmotnosťou 1330 kg/m³ sa počas merania pohybovala v rozmedzí hodnôt 7,5. 10⁻¹³ až 8,2. 10⁻¹³ m/s. Chýbajúce intervaly počas merania sú hodnoty, kedy bolo meranie vypnuté (sýtenie pokračovalo). Meranie prebiehalo, pokiaľ nedošlo k ustáleniu hodnoty priepustnosti. Výsledná $k_1 = 8,06 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ sa určila ako priemer z posledných hodnôt. Postup bol totožný pre zvyšné dva priepustomery, ktorých priebeh hydraulickej vodivosti je znázornený na obr.23 a obr.24.



Obrázok 23: Vyhodnotenie hydraulickej vodivosti (objemová hmotnosť 1517kg/m³)



Obrázok 24: Vyhodnotenie hydraulickej vodivosti (objemová hmotnosť 1745kg/m³)

Rozptyl hodnôt nameraný na priepustomeri so vzorkou s pôvodnou objemovou hmotnosťou sušiny 1745 kg/m³ je spôsobený vplyvom teploty, pretože pre priepustnosti s hodnotami $k = 1 \cdot 10^{-14}$ m/s a nižšie je meracia aparátúra vplyvom tepelnej rozťažnosti citlivá na výkyvy teploty. Výkyvy v meraniach teda nie sú spôsobené chybnou vzorkou, ale aparátúrou.

Počas testu sa na silovom čidle meralo totálne napätie. Totálne napätie počas testu je súčtom bobtnacieho tlaku a tlaku vyvolaným sýtením. Po ukončení skúšky priepustnosti sa komora odpojila od sýtenia a po ustálení hodnoty na silovom čidle sa odčítalo napätie. Táto hodnota zodpovedala bobtnaciemu tlaku. Namerané hodnoty bobtnacieho tlaku pre jednotlivé objemové hmotnosti sú uvedené v (Tabuľka 9).

Tabuľka 9: Bobtnací tlak vzoriek s testovanými počiatočnými objemovými hmotnosťami

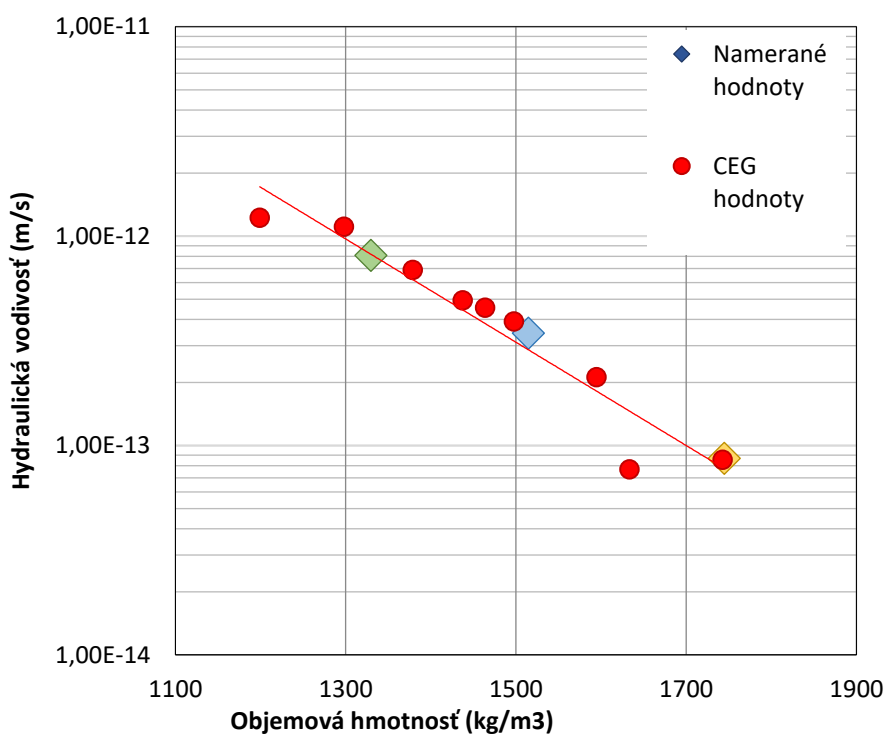
Počiatočná ρ_d [kg/m ³]	1330	1517	1745
Tlak [kPa]	1040	2600	9760

5.3.3 Záver

Namerané hodnoty hydraulickej vodivosti a bobtnacieho tlaku vzoriek bentonitu počas skúšky na priepustomeroch sú uvedené v Tabuľka 9 a Tabuľka 10. Pre overenie správnosti údajov boli hodnoty porovnané s hodnotami z CEG (obr.25 a obr.26).

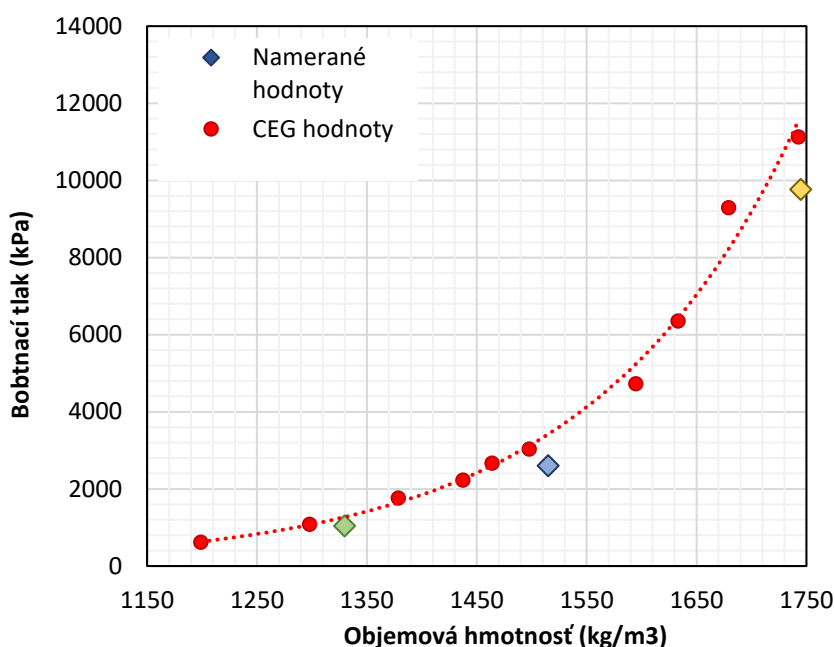
Tabuľka 10: Hydraulická vodivosť vzoriek s testovanými počiatočnými objemovými hmotnosťami.

Počiatočná ρ_d [kg/m ³]	1330	1517	1745
Hydraulická vodivosť' [m/s]	$8,06 \cdot 10^{-13}$	$3,43 \cdot 10^{-13}$	$8,67 \cdot 10^{-14}$



Obrázok 25: Závislosť hydraulickej vodivosti od objemovej hmotnosti (exponencionálna spojnicia trendu).

Z grafu vyplýva, že hydraulická vodivosť je závislá na objemovej hmotnosti. S narastajúcou objemovou hmotnosťou klesá hydraulická vodivosť. Táto závislosť vykazuje exponenciálny trend. Hodnoty namerané v tejto práci a hodnoty dostupné od CEG vykazujú rovnaký trend.



Obrázok 26: Vývoj bobtnacieho tlaku na testovaných vzorkách (porovnanie s hodnotami nameranými v CEG).

Z grafu vyplýva, že bobtnací tlak je závislý na objemovej hmotnosti. S narastajúcou objemovou hmotnosťou sa zvyšuje bobtnací tlak. Táto závislosť vykazuje exponenciálny trend. Hodnoty namerané v tejto práci a hodnoty dostupné od CEG vykazujú rovnaký trend, čo potvrdzuje správnosť merania.

5.4 Voľné bobtnanie a konsolidácia

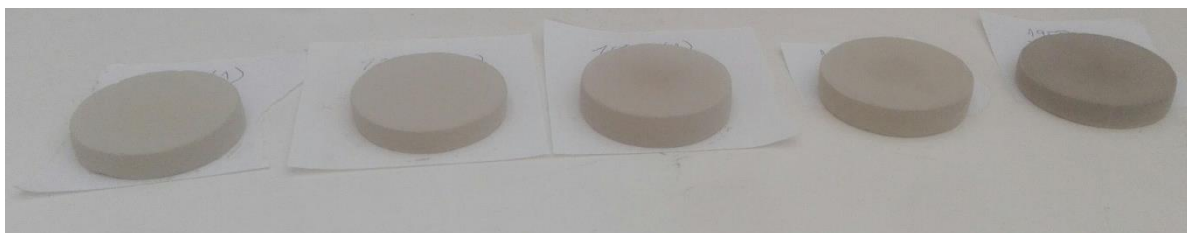
5.4.1 Príprava vzoriek a testovaný materiál

Na zmeranie voľného bobtnania a konsolidácie bolo potrebné vypočítať hmotnosti navážky pre vzorky s objemovými hmotnosťami 1250 kg/m^3 , 1800 kg/m^3 a 1950 kg/m^3 postupom popísaným kap.5.3.1. Hmotnosti navážky do jednotlivých oedometrov sú uvedené v Tabuľka 11.

Tabuľka 11: Hmotnosť navážky.

Požadovaná počiatočná ρ_d [kg/m^3]	1250	1800	1900
Hmotnosť navážky [g]	27,0	38,88	42,12

Materiál bol zhutnený do valčekov s priemerom 50 mm a výškou 10 mm na požadované objemové hmotnosti sušiny ρ_d .



Obrázok 27: Vzorky pripravené do oedometrov (zľava dva valčeky s požadovanou počiatočnou obj.hmotnosťou $1250 kg/m^3$, dva s obj. hmotnosťou $1800 kg/m^3$ a vpravo valček s obj.hm $1950 kg/m^3$).

Valčeky (obr. 27) sa zmerali a podľa ich rozmerov bola vypočítaná skutočná objemová hmotnosť vzoriek (tab. 12). Kvôli zložitému procesu lisovania nebolo možné vzorky zhutniť na presne požadované objemové hmotnosti (chyba v meraní 1 mm = 10 %). Rozdiel v objemovej hmotnosti vzoriek, ktoré mali byť zhutnené na $1250 kg/m^3$, sa ukázal byť neskôr dôležitý pri vyhodnotení, kedy sa porovnával vývoj bobtnacieho tlaku a priebeh zaťažovacieho testu.

Tabuľka 12: Skutočné počiatočné objemové hmotnosti vzoriek pre test v oedometroch.

Požadovaná počiatočná ρ_d [kg/m^3]	Objem V [m^3]	m_d [kg]	Skutočná počiatočná ρ_d [kg/m^3]
1950	$1,78 \cdot 10^{-5}$	$33,71 \cdot 10^{-3}$	1890
1800	$1,97 \cdot 10^{-5}$	$34,26 \cdot 10^{-3}$	1585
1250	$1,53 \cdot 10^{-5}$	$23,45 \cdot 10^{-3}$	1400
1250	$1,62 \cdot 10^{-5}$	$20,93 \cdot 10^{-3}$	1300
1800	$2,08 \cdot 10^{-5}$	$31,62 \cdot 10^{-3}$	1525

5.4.2 Postup a priebeh testu

Meranie priebehu voľného bobtnania a konsolidácie sa uskutočnilo na zhutnených vzorkách, ktoré sa umiestnili do oedometrov. Aby sa mohol skúmať vplyv tepla na tieto

parametre, dve meracie aparatúry boli umiestnené do laboratória s teplotou okolo 20°C a tri vzorky do tepelného laboratória pri teplote 60°C. Prvým krokom testu bolo meranie voľného bobtnania. Počas tohto testu bola vzorka nezaťažená a sýtená pitnou vodou.

Druhým krokom testu bola konsolidačná skúška s riadeným zvyšovaním napätia. Bolo uskutočnených 5 zaťažovacích stupňov (tab.13). Test prebiehal za stáleho sýtenia vzoriek pitnou vodou.

Tabuľka 13: Zaťažovacie kroky testu konsolidácie.

Zaťaženie vzoriek v oedometroch					
Požadované			Skutočné		
Tlak	Sila	Závažie	Závažie	Sila	Tlak
kPa	kN	kg	Kg	kN	kPa
250	0,491	4,91	5	0,50	255
750	1,473	14,73	15	1,50	764
1250	2,454	24,54	25	2,50	1273
2500	4,909	49,09	50	5,00	2546
3750	7,363	73,63	75	7,50	3820

Priebeh deformácií vzoriek bol meraný na indikátorových hodinkách a na digitálnych čidlách. Dĺžka a priebeh testu sú uvedené v tabuľke 14.

Tabuľka 14: Priebeh testu voľného bobtnania a konsolidácie.

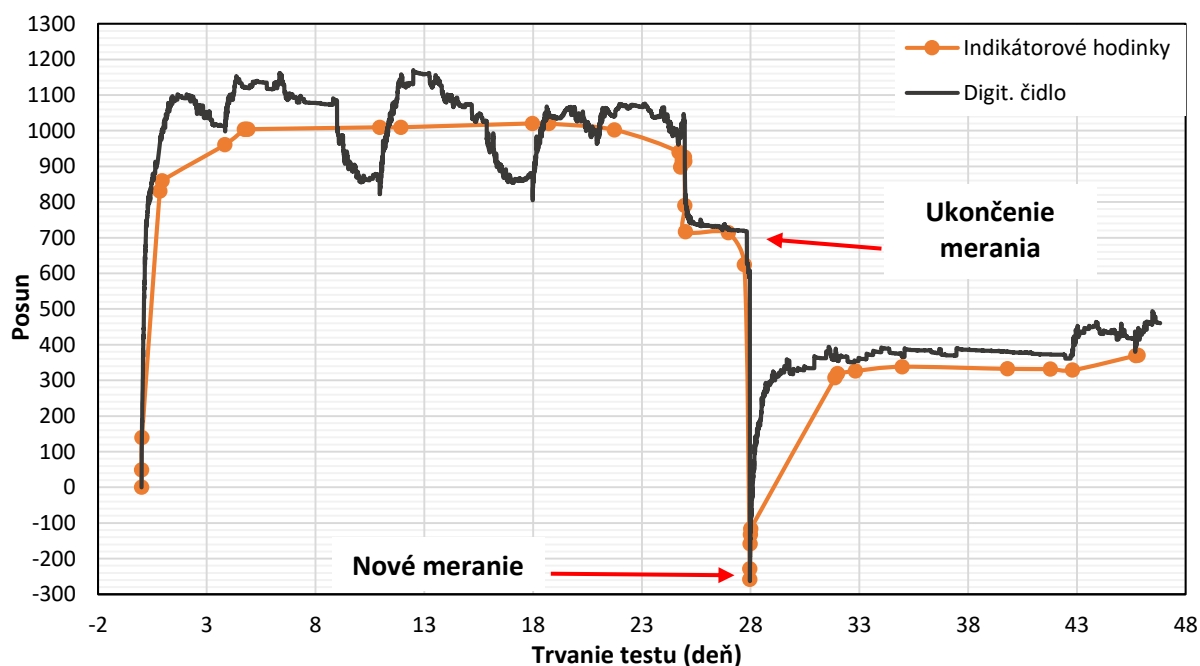
Číslo oedomet.	Počiatková ρ_d [kg /m³]	Začiatok testu	255 [kPa]	764 [kPa]	1273 [kPa]	2546 [kPa]	3820 [kPa]	Koniec testu
OE101	1890	22.2.	19.3.	-	-	-	-	22.3
OE101	1560	22.3.	-	-	-	-	-	9.4.
OE102	1585	22.2.	19.3.	27.3.	19.4.	4.5.	11.5.	17.5.
OE103	1400	22.2.	19.3.	27.3.	19.4.	4.5.	-	11.5.
OE104	1300	22.2.	19.3.	27.3.	19.4.	4.5.	11.5.	12.5.
OE105	1525	22.2.	19.3.	27.3.	19.4.	4.5.	11.5.	17.5.

Testovanie voľného bobtnania a konsolidácie bentonitu v oedometroch umiestnených pri vyššej teplote nie je štandardný postup a počas merania nastalo niekoľko technických problémov:

- vyparovanie sýtiaceho média z oedometrických krabíc;
- zaseknutie aparatúry;
- rozdielne namerané hodnoty na čidlách a na indikátorových hodinkách.

OE101

Meranie priebehu voľného bobtnania a konsolidácie na vzorke s počiatočnou $\rho_d = 1890 \text{ kg/m}^3$ bolo uskutočnené na prvej oedometrickej meracej aparatúre (ďalej OE101) umiestnenej v tepelnom laboratóriu so stálou teplotou 60°C . Priebeh testu bol nameraný na indikátorových hodinkách a digitálnom čidle. Priebeh je znázornený v grafe (obr.28).



Obrázok 28: Priebeh deformácií vzorky s počiatočnou $\rho_d = 1890 \text{ kg/m}^3$ v tepelnom laboratóriu.

Z grafu vyplýva, že priebehy posunov nameraných na čidle a na hodinkách nie sú totožné. Odlišnosti v nameraných hodnotách mohli vzniknúť kvôli rozdielnej frekvencii zaznamenávania dát čidlom (každých 5 minút) a indikátorovými hodinkami (každých pár dní). Posuny získané meraniami na čidle presnejšie popisujú priebeh deformácie vzorky, avšak nie sú kalibrované pre merania pri vyšších teplotách. Preto sú tieto hodnoty orientačné a v práci sa uprednostňujú posuny namerané na hodinkách.

Voľné bobtnanie vzorky sa podľa meraní získaných na hodinkách začalo ustáľovať piaty deň testu. Hodnoty na čidle však kolísali a preto sa čakalo s prvým zaťažovaním. Posuny na čidle stále nadobúdali kolísavé hodnoty.

Po 24-tich dňoch bol uskutočnený prvý krok zaťažovacieho testu. Počas 28-eho dňa testu sa vzorka začala vytláčať z oedometrického prstenca (obr.29).

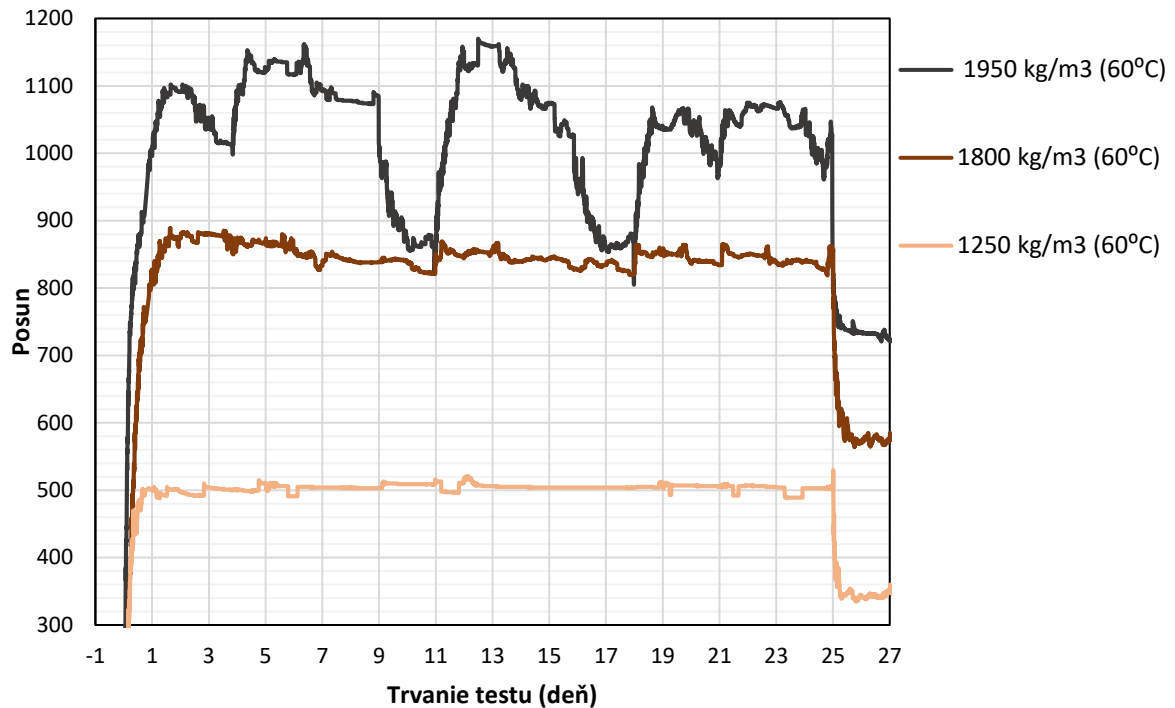


Obrázok 29: Oedometer - neúspešné meranie.

Tento problém mohol vzniknúť kvôli zlému zhutneniu vzorky (výška vzorky sa pohybovala od 8,4 mm až po 9,6 mm). Bentonit sa začal vytláčať z meracej aparatury a nebolo možné pokračovať v meraniach. Test bol ukončený a do oedometra sa umiestnila nová vzorka, pripravená rovnakým postupom. Počiatočná objemová hmotnosť sušiny novej vzorky bola kvôli nepresnému zhutneniu len 1560 kg/m^3 .

Nová vzorka umiestnená v oedometri OE101 však hneď zo začiatku vykazovala chyby v meraní, pretože hodnoty nameraných posunov voľného bobtnania vzorky boli nízke (obr.27). Skúška bola definitívne ukončená a v meraní sa pokračovalo na zvyšných meracích aparaturách.

Porovnanie priebehov voľného bobtnania vzoriek v oedometroch umiestnených v tepelnom laboratóriu je v grafe na obrázku 30.

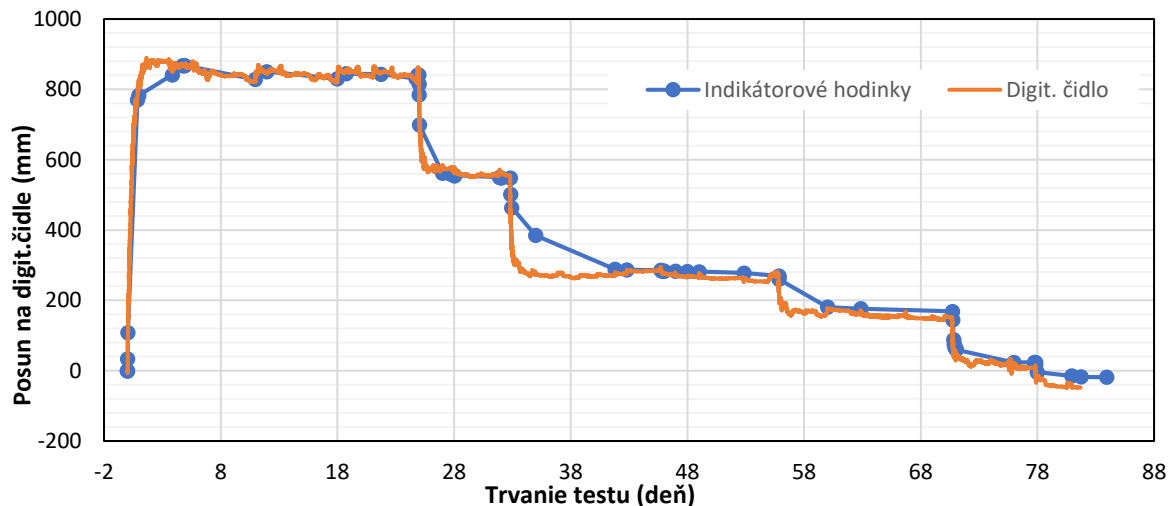


Obrázok 30: Priebeh voľného bobtnania vzoriek s rôznymi počiatočnými objemovými hmotnosťami umiestených s teplom laboratóriu (merané digitálnymi čidlami).

Počas priebehu testu sa nepodarilo jednoznačne identifikovať príčiny výkyvov namerané na čidle. Čiastočne boli spôsobené vysychaním vzorky – v tepelnom laboratóriu spôsobila vysoká teplota rýchlejšie vyparovanie vody z oedometra. Vysychanie však nevysvetľuje veľkosť rozdielnych hodnôt nameraných na čidle a hodinkách (na ostatných oedometroch sú merané hodnoty rovnaké). Pravdepodobne ide o problém meracej aparatúry.

OE102

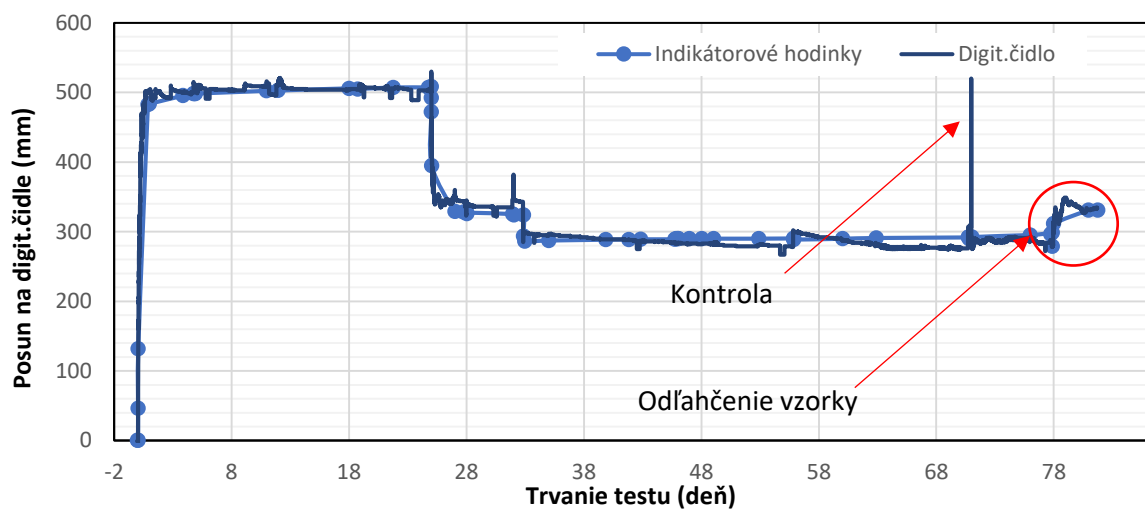
Priebeh meraní na oedometri OE102 s počiatočnou $\rho_d = 1585 \text{ kg/m}^3$ je zobrazený na grafe (obr.31). Mierne výkyvy v meraniach počas voľného bobtnania vzorky sú spôsobené vysychaním sýtiaceho média, vzorka nie je úplne nasýtená celú dobu. Priebeh meraní nameraný na hodinkách a čidle je zhodný.



Obrázok 31: Priebeh voľného bobtnania a zaťažovacieho testu v OE102 s počiatočnou $\rho_d = 1585 \text{ kg/m}^3$ v tepelnom laboratóriu.

OE103

Merania v oedometri OE103 so vzorkou o objemovej hmotnosti 1400 kg/m^3 umiestnenej v tepelnom laboratóriu spočiatku prebiehali podľa predpokladov (obr.32). Po druhom stupni zaťaženia sa hodnota posunu meraného na obidvoch meracích zariadeniach ustálila. Vzniknutý problém sa dá vysvetliť jedine mechanickým zaseknutím meracej aparatury.



Obrázok 32: Priebeh voľného bobtnania a zaťažovacieho testu v OE103 s počiatočnou $\rho_d = 1400 \text{ kg/m}^3$ v tepelnom laboratóriu.

V oedometrickej krabici OE103 sa počas testu začala tvoriť suspenzia neznámeho charakteru (obr.33). Odobrala sa vzorka a poslala sa na analýzu na SURAO. Výsledky neboli dostupné počas vypracovania práce. Táto látka by nemala mať vplyv na meranie.



Obrázok 33: Suspenzia vytvorená v oedometrickej krabici OE103 počas testu

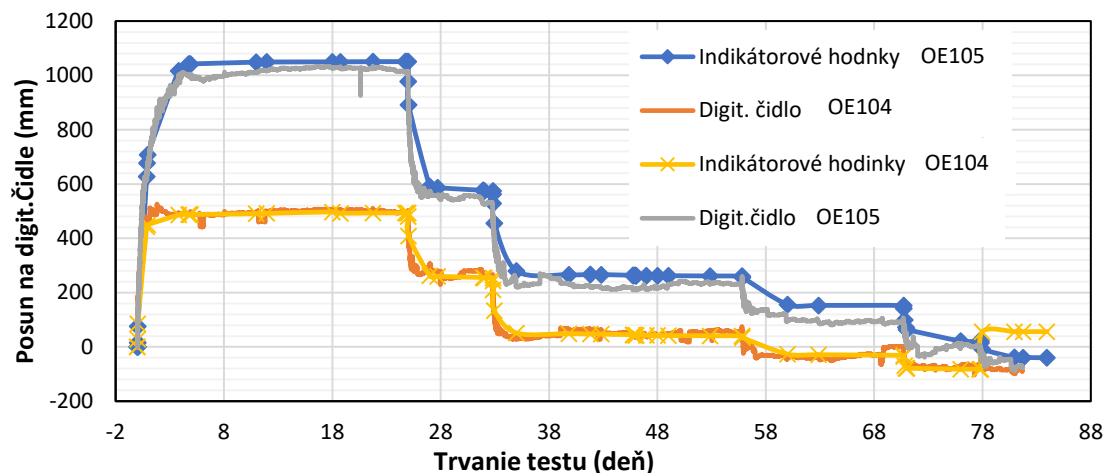
Hodnoty posunov boli aj po odľahčení vzorky a skontrolovaní meracej aparatury nezmenené. Skúška sa ukončila a vzorka sa odľahčila. Došlo k miernemu nabobtnaniu. Vzorka bola zaseknutá iba pri stlačovaní. Po rozobraní aparatury sa zistilo, že horný piest začal korodovať, čo mohlo spôsobiť zaseknutie (obr.34).



Obrázok 34: Rozobraná oedometrická krabica OE103 po ukončení skúšky –viditeľná korózia.

OE104 a OE105

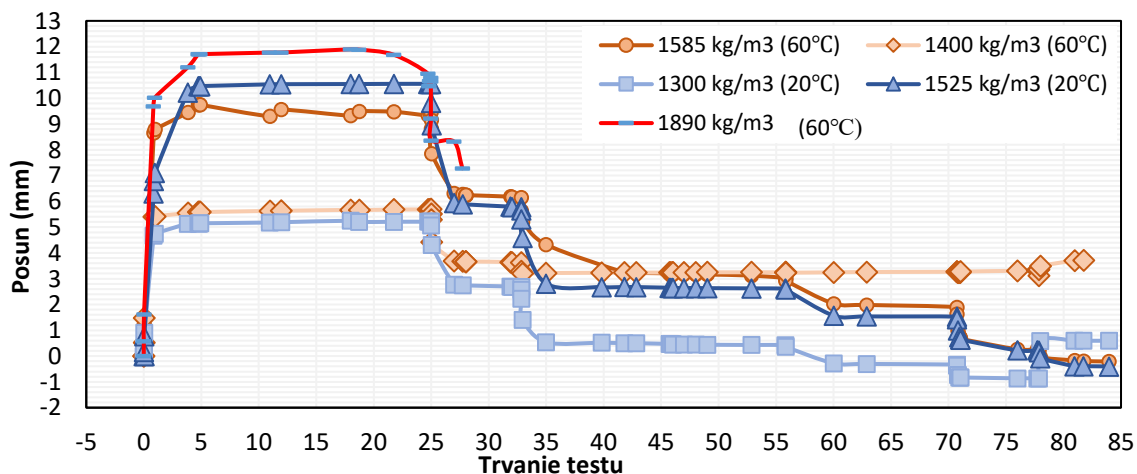
Priebeh testu voľného bobtnania a konsolidácie ukutočnený na oedometroch umiestnených v laboratóriu s teplotou okolo 20°C nameraný na čidlách a indikátorových hodinkách je v grafe na obrázku 35.



Obrázok 35: Priebeh voľného bobtnania a zaťažovacieho testu v OE104 s počiatočnou $\rho_d = 1290 \text{ kg/m}^3$ a v OE105 s počiatočnou $\rho_d = 1525 \text{ kg/m}^3$ v laboratóriu pri 20°C

Priebeh skúšky na oedometroch pri teplote 20°C prebiehal podľa predpokladov a bez zjavných chýb meraní.

V grafe na obrázku 36 je zobrazený priebeh testu na všetkých oedometroch. Z grafu vyplýva, že veľkosť voľného bobtnania závisí od počiatočnej objemovej hmotnosti sušiny (vzorky zhutnené na vyššie ρ_d nabobtnali viac). Najväčšie zmeny deformácii nastali na vzorke s počiatočnou $\rho_d = 1525 \text{ kg/m}^3$, a to tak počas voľného bobtnania ako aj počas testu konsolidácie.



Obrázok 36: Porovnanie priebehu skúšok na všetkých eodometroch. nameraný indikátorovými hodinkami

Po ustálení deformácie v zaťažovacom kroku sa konsolidačné napätie rovná bobtnaciemu tlaku. Počas testu konsolidácie sa v práci uskutočnilo 5 stupňov zaťaženia. Z príslušných deformácii vzoriek po ustálení konsolidácie sa vypočítali objemové hmotnosti. Zistené hodnoty sú v zapísané v tab.15.

Tabuľka 15: Závislosť objemovej hmotnosti a napätia..

	OE102	OE103	OE104	OE105
Napätie [kPa]	ρ_d [kg/m ³]			
1	812	793	772	758
255	976	935	945	977
764	1211	967	7118	1208
1273	1314	965	1285	1316
2547	1531	960	1377	1475
3820	1605	930	1560	1564

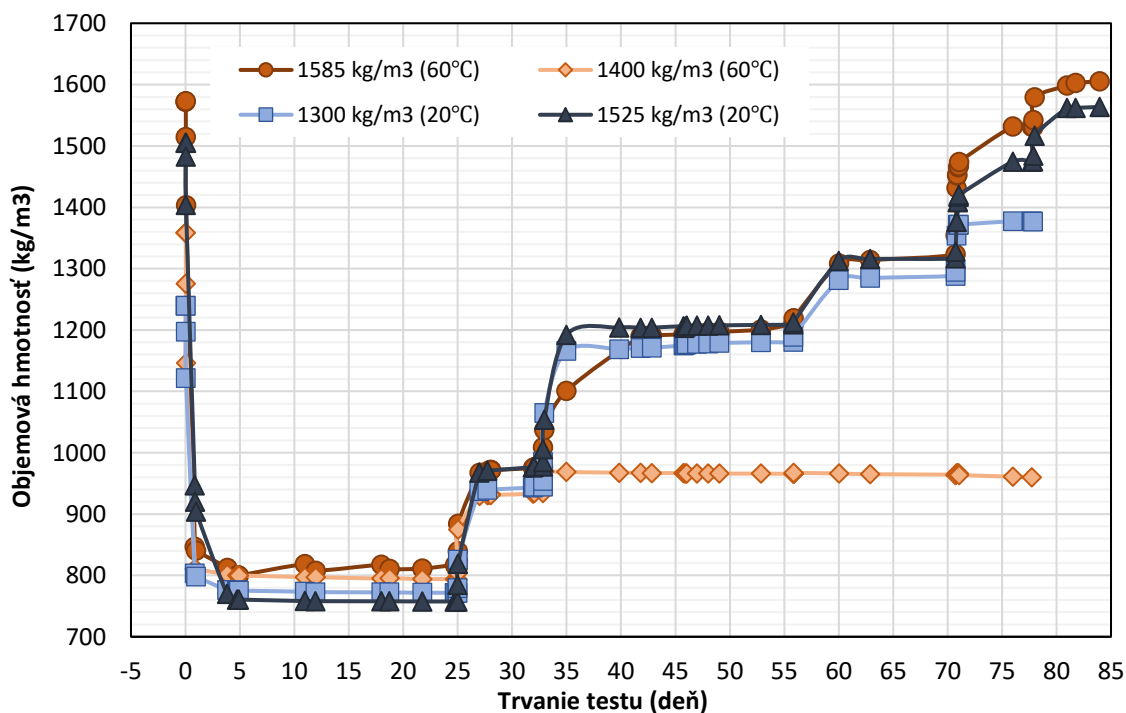
5.4.3 Záver

Vyhodnotenie testu vychádza z analýzy zmeny objemovej hmotnosti a napätia v čase. Na základe veľkosti posunov nameraných na indikátorových hodinkách a na digitálnych čidlách sa vypočítali príslušné výšky vzoriek a z toho ich objemy v čase. Podľa vzorca (12) sa vypočítala objemová hmotnosť sušiny ρ_d [kg/m³]. Jej závislosť na čase je znázornená v grafoch (obr.38 a obr.39)

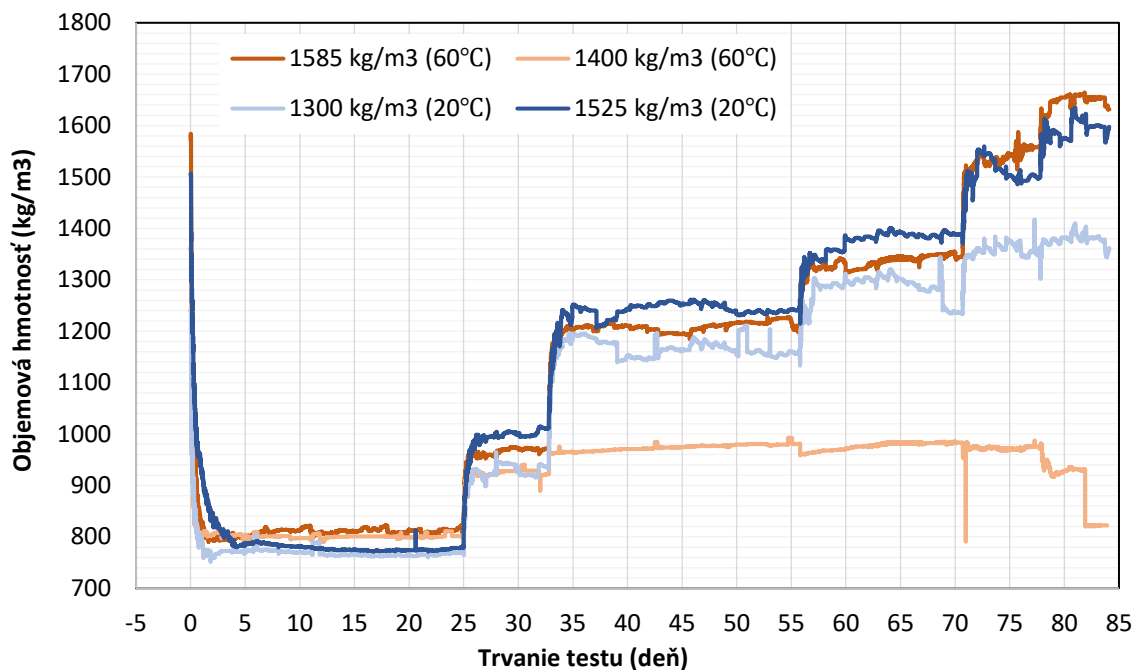
$$\rho_d = \frac{m_d}{V} \quad (12)$$

Kde: m_d – hmotnosť sušiny vzorky [kg]

V – objem vzorky [m³]

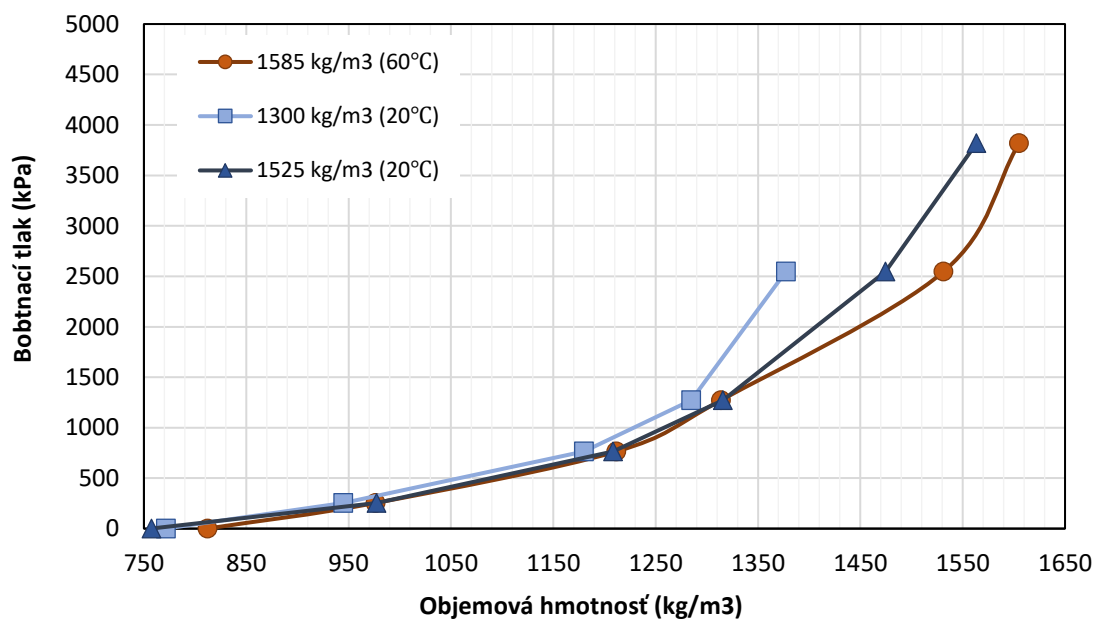


Obrázok 37: Graf priebehu zmien objemových hmotností (suchých) v čase – indikátorové hodinky.



Obrázok 38: Graf priebehu zmien objemových hmotností (suchých) v čase – digitálne čidlá

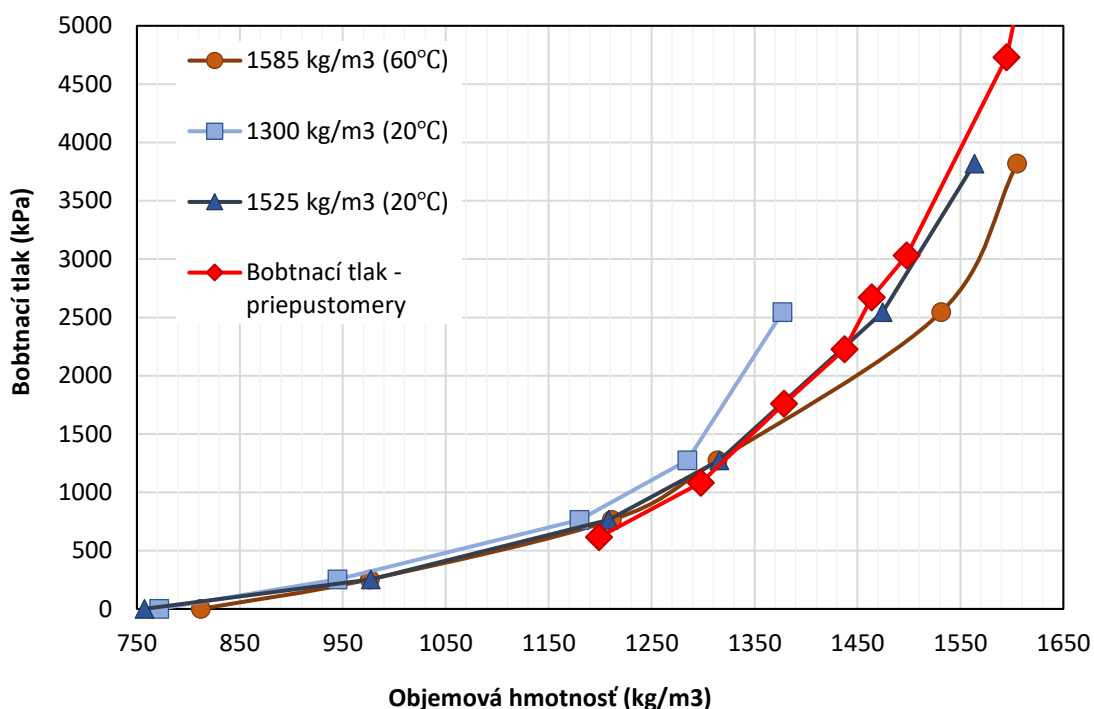
Z grafov vyplýva, že všetky vzorky nabobtnali do ustálenej objemovej hmotnosti v rozmedzí 800 – 750 kg/m³. Najväčšiu schopnosť bobtnania vykazovali vzorky umiestnené v oedometroch v laboratóriu pri teplote 20°C. Je teda možné usúdiť, že teplo malo vplyv na bobtnaciu schopnosť bentonitu bez ohľadu na mieru zhutnenia – vzorky vystavené pôsobeniu teploty 60°C mali nižšiu bobtnaciu schopnosť. Avšak proces úplného nabobtnania nastal rýchlejšie na vzorkách umiestnených v tepelnom laboratóriu.



Obrázok 39: Graf závislosti zmeny objemovej hmotnosti od napätia.

Podľa M.Villar má teplota vplyv na bobtnací tlak vzoriek (obr.14). S rastúcou teplotou by mal klesať bobtnací tlak. Z grafu (obr.39) však vyplýva, že spočiatku bol bobtnací tlak všetkých vzoriek takmer rovnaký. Po treťom stupni zaťaženia začal tlak klesať u vzorky zhutnenej na počiatočnú $\rho_d = 1585 \text{ kg/m}^3$ umiestnenej v tepelnom laboratóriu. Z hodnôt v grafe však nie je možné vyhodnotiť, či má teplota vplyv na vývoj bobtnacieho tlaku, kvôli malému počtu meraní a chybe v meraní na aparátúre v tepelnom laboratóriu .

Porovnanie bobtnacieho tlaku nameraného v priepustomeroch a v oedometroch je v grafe na obrázku 40.



Obrázok 40: Porovnanie bobtnacieho tlaku nameraného na oedometroch a priepustomeroch.

Pre odlišný spôsob merania nemusí byť tvar a hodnoty krivky závislosti bobtnacieho na objemovej hmotnosti totožný - vzorkám umiestneným v priepustomeroch bolo zabránené meniť objem a ide teda o odlišný spôsob merania. Avšak priebeh bobtnacieho tlaku pre počiatočnú $\rho_d = 1525 \text{ kg/m}^3$ sa javí takmer rovnaký ako bobtnací tlak nameraný na priepustomeroch.

6. Záver

Hlavným cieľom práce bolo skúmanie zmien vlastností českého bentonitu B75 2010 vplyvom tepla.

V prvej časti sa skúmali zmena medze tekutosti a plasticity, Swell index, bobtnací tlak, konsolidácia a hydraulická vodivosť. Na skúšky sa použili vzorky dlhodobo (približne 2 roky) vystavené pôsobeniu teploty 206°C a výsledky sa porovnávali s hodnotami nameranými na referenčnej vzorke bentonitu B75 2010.

Testovaním vzoriek skúškou na penetračnom kuželi bol zistený negatívny vplyv tepla na medzu tekutosti. Vzorka zaťažená vplyvom tepla nadobúdala nižšiu hodnotu medze tekutosti. Negatívny vplyv na medzu plasticity nebol preukázaný, aj keď sa javil mierny pokles jej hodnoty. Z rozboru uskutočnených skúšok Atterbergerových medzí sa môže konštatovať, že teplo zhoršuje tieto vlastnosti bentonitu.

Ďalej bol zistený pokles hodnoty Swell indexu na vzorkách vystavených pôsobeniu tepla. U bentonitu dochádza vplyvom tepla k znižovaniu jeho bobtnacej schopnosti.

V druhej časti sa skúmal vplyv teploty na priebeh voľného bobtnania a konsolidácie vzorky bentonitu počas zaťažovacieho testu v oedometroch umiestnených v tepelnom laboratóriu pri 60°C a v laboratóriu pri 20°C. Sledovali sa zmeny objemových hmotností vzoriek v čase a určila sa závislosť bobtnacieho tlaku a objemovej hmotnosti. Z rozboru výsledkov bolo zistené, že teplo malo negatívny vplyv na priebeh bobtnania vzoriek. Vzorky v tepelnom laboratóriu nabobtnali menej a rýchlejšie ako vzorky v laboratóriu s teplotou 20°C. Meranie vlastností na oedometroch v tepelnom laboratóriu nie je štandardný postup. Pre časovú náročnosť a technické problémy nebolo možné vyvodit' jednoznačné závery vývoja bobtnacieho tlaku a taktiež dokončiť niektoré skúšky.

Na priepustomeroch bola zistená hydraulická vodivosť rôzne zhutnených vzoriek a vyhodnotila sa závislosť počiatočnej objemovej hmotnosti a bobtnacieho tlaku. Bobtnací tlak bol ovplyvnený počiatočnou objemovou hmotnosťou sušiny. V práci mal byť porovnaný vplyv tepla aj na hydraulickú vodivosť a bobtnací tlak bentonitu nameraný na priepustomeroch, kvôli časovej náročnosti sa však toto meranie nestihlo uskutočniť.

Výsledky práce preukázali vplyv tepla na niektoré vlastnosti bentonitu. Vzhľadom na nedostatok času a pre zvolený nový postup merania v tepelnom laboratóriu, počas ktorého nastali technické problémy, sa však nepodarilo preskúmať všetky stanovené vplyvy. Za prínos práce je možné považovať skutočnosť, že zistenia, vyplývajúce z výskumov realizovaných v rámci tejto práce, nepochybne tvoria podklad pre poznanie vlastností bentonitu a ich zmien vplyvom tepla. K relevantnému preukázaniu vplyvov tepla na zmeny

vlastností bentonitu je však nutné uskutočniť viac skúšok a meraní, ktorých východiskom môže byť práve predmetná práca.

7. Zoznam obrázkov a tabuliek

Obrázok 1: Plynná, tekutá a pevná fáza zeminy(1).....	9
Obrázok 2: Konzistenčné medze (2)	10
Obrázok 3: Aparatúra na meranie medze tekutosti – penetračný kužel' 80g/30° v laboratóriu CEG.....	11
Obrázok 4: Valčeky pripravené do pece na zmeranie medze plasticity (laboratórium ČVUT).....	12
Obrázok 5: Diagram plasticity pre jemnozrnné zeminy podľa normy ČSN EN 1997-1.....	13
Obrázok 6: Priepustomer CEG	15
Obrázok 7: Komora so vzorkou CEG	16
Obrázok 8: Oedometrická krabica.....	18
Obrázok 9: Indikátorové hodinky.....	18
Obrázok 10: Kladkový systém.	18
Obrázok 11: Výskyt ložísk bentonitu v ČR k roku 2017(3).....	20
Obrázok 12 Kryštáľová mriežka montmorillonitu (4).....	20
Obrázok 13: : Vplyv teploty na hydraulickú vodivosť pre vzorky s počiatočnými objemovými hmotnosťami 1,5; 1,6 a 1,7 Mg/m ³ (M.V.Villar 2010)	24
Obrázok 15: Bobtnací tlak ako funkcia teploty (M.V.Villar).....	24
Obrázok 16: vývoj bobtnacieho tlaku pri rôznych teplotách vzorku s počiatočnou objemovou hmotnosťou 1,5 Mg/m ³ (M.V.Villar 2010)	25
Obrázok 17: Zaťažená vzorka	26
Obrázok 18: nezaťažená vzorka	26
Obrázok 19: Závislosť penetrácie od vlhkosti (nezaťažená vzorka).	27
Obrázok 20: Závislosť penetrácie od vlhkosti (zaťažená vzorka).....	28

Obrázok 21: Odmerné valce po skúške merania Swell indexu. Vľavo vzorka z pece pri teplote 105°C, vpravo vzorka z pece pri teplote 206°C.....	30
Obrázok 22: Zhutnený bentonit z prstencov priepustomeru (po skúške).....	32
Obrázok 23: Vyhodnotenie hydraulickej vodivosti (objemová hmotnosť 1330kg/m ³)	33
Obrázok 24: Vyhodnotenie hydraulickej vodivosti (objemová hmotnosť 1517kg/m ³)	34
Obrázok 25: Vyhodnotenie hydraulickej vodivosti (objemová hmotnosť 1745kg/m ³)	34
Obrázok 26: Závislosť hydraulickej vodivosti od objemovej hmotnosti (exponenciálna spojnice trendu).	35
Obrázok 27: Vývoj bobtnacieho tlaku na testovaných vzorkách (porovnanie s hodnotami nameranými v CEG).....	36
Obrázok 28: Vzorky pripravené do oedometrov (zľava dva valčeky s požadovanou počiatočnou obj.hmotnosťou 1250 kg/m ³ , dva s obj. hmotnosťou 1800 kg/m ³ a vpravo valček s obj.hm 1950 kg/m ³).	37
Obrázok 29: Priebeh deformácii vzorky s počiatočnou $\rho_d = 1890 \text{ kg/m}^3$ v tepelnom laboratóriu.....	39
Obrázok 30: Oedometer - neúspešné meranie.....	40
Obrázok 31: Priebeh voľného bobtnania vzoriek s rôznymi počiatočnými objemovými hmotnosťami umiestených s tepelnom laboratóriu (meraný digitálnymi čidlami).	41
Obrázok 32: Priebeh voľného bobtnania a zaťažovacieho testu v OE102 s počiatočnou $\rho_d = 1585 \text{ kg/m}^3$ v tepelnom laboratóriu.....	42
Obrázok 33: Priebeh voľného bobtnania a zaťažovacieho testu v OE103 s počiatočnou $\rho_d = 1400 \text{ kg/m}^3$ v tepelnom laboratóriu.	42
Obrázok 34: Suspenzia vytvorená v oedometrickej krabici OE103 počas testu.....	43
Obrázok 35: Rozobraná edometrická krabica OE103 po ukončení skúšky – viditeľná korózia.	43
Obrázok 36: Priebeh voľného bobtnania a zaťažovacieho testu v OE104 s počiatočnou $\rho_d = 1290 \text{ kg/m}^3$ a v OE105 s počiatočnou $\rho_d = 1525 \text{ kg/m}^3$ v laboratóriu pri 20°C	44
Obrázok 37: Porovnanie priebehu skúšok na všetkých oedometroch. nameraný indikátorovými hodinkami	44
Obrázok 38: Graf priebehu zmien objemových hmotností (suchých) v čase – indikátorové hodinky.....	45
Obrázok 39: Graf priebehu zmien objemových hmotností (suchých) v čase – digitálne čidlá	46

Obrázok 40: Graf závislosti zmeny objemovej hmotnosti od napätia.....	46
Obrázok 41: Porovnanie bobtnacieho tlaku nameraného na oedometroch a priepustomeroch.....	47
<i>Tabuľka 1: Plasticita zemín podľa ČSN EN 1997-1 (731000).....</i>	10
<i>Tabuľka 2: Konzistenčné stavy.....</i>	14
Tabuľka 3: Hodnoty penetrácií a príslušných vlhkostí vzoriek.....	27
Tabuľka 4: Hmotnosti vzoriek bentonitu a výsledné medze plasticity.	28
<i>Tabuľka 5:Hmotnosti vzoriek a výsledná vlhkosť'</i>	29
Tabuľka 6: Hodnoty namerané na vzorkách testovaných na Swell index.....	31
Tabuľka 7: Hmotnostná vlhkosť testovanej vzorky bentonitu B75 2010.	32
Tabuľka 8: Skutočné počiatkové objemové hmotnosti sušiny ρ_d vzoriek určených na test v priepustomeri.....	32
Tabuľka 9: Bobtnací tlak vzoriek s testovanými počiatkovými objemovými hmotnosťami	35
Tabuľka 10: Hydraulická vodivosť vzoriek s testovanými počiatkovými objemovými hmotnosťami.....	35
Tabuľka 11: Hmotnosť navážky.....	37
Tabuľka 12: Skutočné počiatkové objemové hmotnosti vzoriek pre test v oedometroch...	37
Tabuľka 13: Zaťažovacie kroky testu konsolidácie.	38
Tabuľka 14: Priebeh testu voľného bobtnania a konsolidácie.	38
Tabuľka 15:Závislosť objemovej hmotnosti a napätia.....	45

ZDROJE:

- Villar M.V. a Lloret A. (2008) Influence of dry density and water content on the swelling of a compacted bentonite. Applied Clay Science; č. 39, s. 38-49
- Dostupné online: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169131707000919>

- W.J. Cho, J.O. Lee, K.S. Chun. The temperature effects on hydraulic conductivity of compacted bentonite. Elsevier: Applied Clay Science, February 1999
- POWRIE, William. Soil mechanics: concepts and applications. 2nd ed. London: Spon, 2004. ISBN 0-415-31156-X
- VANÍČEK, Ivan. Mechanika zemin. Praha: ČVUT, 1982
- Lambe T. W. (1958) The Structure of Compacted Clay, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 84, No. SM2, 1654–1 to 1654–35.
- D. De Bruyn, J.-F. Thimus 1996, The influence of temperature on mechanical characteristics of Boom clay: The results of an initial laboratory programme, Engineering Geology, Elsevier. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0013795295000291>
- Villar M.V. a Lloret A. (2003) Influence of temperature on the hydro-mechanical behaviour of a compacted bentonite. Science direct, s. 337-350 [cit. 2012-04-24]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169131703002850>
- Castellanos, E., M.V. Villar, E. Romero, A. Lloret a A. Gens. (2008) Chemical impact on the hydro-mechanical behaviour of high-density FEBEX bentonite. Physics and Chemistry of the Earth, Volume 33, Strany 516-526. Dostupné online: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474706508003033>
- Pusch, R., 1980. Permeability of highly compacted bentonite. SKB Technical Report 80-16, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management.
- Haiquan Sun, David Mašín & Jan Najser: Investigation of the mechanical behavior of compacted bentonite, Institute of Hydrogeology, Engineering Geology and Applied Geophysics, Faculty of Science, Charles University, Albertov 6, 128 43 Praha, Czech Republic
- Pusch, R. (1982). Mineral-water interactions and their influence on the physical behaviour of highly compacted Na bentonite. Canadian Geotechnical Journal, 19, 381-387.
- M.V.Villar, R.Gómez-Espina, A.Lloret 2010, Experimental investigation into temperature effect on hydro-mechanical behaviours of bentonite, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, Pages 71-78
- Mingarro, E., Rivas, P., del Villar, L.P., de la Cruz, B., Gómez, P., Hernández, A., Turrero, M.J., Villar, M.V., Campos, R., Cozar, J., 1989. Characterization of clay (bentonite)/crushed granite mixtures to build barriers against the migration of radionuclides: diffusion studied and physical properties. Commission of the European Communities Report EUR 13666.
- Ouyang, J., Daemen, J.K., 1992. Sealing performance of bentonite and bentonite/crushed rock borehole plugs. NUREG/CR-5685, U.S. Nuclear Regulatory Commission, WA.

Fox P.J. (1996) Analysis of hydraulic gradient effects for laboratory hydraulic conductivity testing. Geotechnical testing journal Volume: 19 Issue: 2 Pages: 181-190

Hausmannová L., 2017, Disertační práce: Vliv sytícího tlaku na hydraulickou vodivost a bobtnací tlak českých bentonitů, 110 str.

Weiss Z., Kužvart M. (2005): Jílové minerály jejich nanostruktura a využití. – Univerzita Karlova. Praha. 281 s.

Rao N.S. and Mathew P.K. (1995) Effect of exchangeable cations on hydraulic conductivity of marine clay. Clays and Clay Minerals. 43(4), 433 - 437.

<http://ceg.fsv.cvut.cz/vyzkum/bentonit>

http://www.chemicalpapers.com/file_access.php?file=88a499.pdf

(5) <https://uwaterloo.ca/earth-sciences-museum/resources/detailed-rocks-and-minerals-articles/bentonite-clay>

https://is.muni.cz/th/327653/prif_b/Reserse_1.pdf

https://ceg.fsv.cvut.cz/vyuka/podklady-pro-studenty/220-lpg/05_BOBTNANI.pdf

<http://fbi.uniza.sk/kkm/files/admincasopis/KM%201%202016/09%20Orincak.pdf>

ROBERT W. DOEHLER, INDUSTRIAL APPLICATIONS OF BENTONITE by ARTHUR G. CLEIYI ANn American Colloid Company, Skokie, Illinois

https://ceg.fsv.cvut.cz/vyuka/podklady-pro-studenty/220-lpg/bobtnacitlak_CZ.pdf

http://geotech.fce.vutbr.cz/studium/mech_zemin/pod7_8c.pdf

(4)<http://www.naturbentonit.de/mobile/smartphone/was-istnaturbentonit/montmorillonit/index.php>

(3) <http://www.geology.cz/extranet/publikace/online/surovinove-zdroje/surovinove-zdroje-ceske-republiky-2017.pdf>

(1)http://svf.uniza.sk/kgz/zakladanie/GM_1.pdf

(2) <http://www.geotechnikacasopis.cz/index.php>