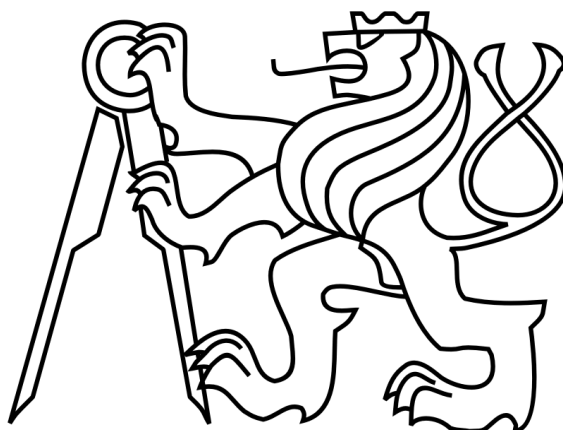


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STAVEBNÍ

Katedra 220 - centrum experimentální geotechniky



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Ověření využitelnosti odpadních jíílů v tamponážní
směsi vrtů tepelných čerpadel

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Pilařová** Jméno: **Eliška** Osobní číslo: **438979**
Fakulta/ústav: **Fakulta stavební**
Zadávací katedra/ústav: **Centrum experimentální geotechniky**
Studijní program: **Stavební inženýrství**
Studijní obor: **Konstrukce a dopravní stavby**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Ověření využitelnosti odpadních jíílů v tamponážní směsi vrtů tepelných čerpadel

Název bakalářské práce anglicky:

Potential Use of Waste Clays in Tamponage Mixtures for Heat Pumps Wells

Pokyny pro vypracování:

Přehled kritérií pro tamponážní směsi; příprava referenčních vzorků; popis a laboratorní charakterizace vybraných odpadních jíílů; laboratorní charakterizace referenčních vzorků; příprava a laboratorní zkoušky variantních vzorků směsí z odpadních jíílů; výběr směsí pro zkoušky instalace; návrh modelu pro ověření vlastností po instalaci

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Radek Vašíček, Ph.D., centrum experimentální geotechniky FSv

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **22.02.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **26.05.2019**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Radek Vašíček, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

_____ podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Jiří Máca, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Studentka bere na vědomí, že je povinna vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

_____ Datum převzetí zadání

_____ Podpis studentky

Anotační list

Jméno autora:	Eliška Pilařová
Název Bakalářské práce:	Ověření využitelnosti odpadních jíílů v tamponážní směsi vrtů tepelných čerpadel
Anglický název:	Potential Use of Waste Clays in Temponage Mixtures for Heat Pumps Wells
Akademický rok:	2018/2019
Studijní obor:	Konstrukce a dopravní stavby
Zadávací katedra:	K220 - centrum experimentální geotechniky
Vedoucí bakalářské práce:	Ing. Radek Vašíček, Ph.D.
Bibliografické údaje:	Počet stran: 83
	Počet obrázků: 37
	Počet tabulek: 44

Klíčová slova: *odpadní jíily, tamponážní směsi, tepelná čerpadla, pevnost v tlaku, tepelná vodivost, hydraulická vodivost, objemová hmotnost*

Keywords: *waste clays, tamponage mixtures, heat pumps wells, pressure strength, heat conductivity, hydraulic conductivity, density*

Abstrakt: *Tato bakalářská práce se zabývá využitelností odpadních jíílů do tamponážních směsí vrtů tepelných čerpadel. Hlavní náplní jsou laboratorní zkoušky, jejich průběhy, vyhodnocení a porovnávání. V první části práce se zabývám testováním vlastností odpadních jíílů. Ve druhé části jsou zde pak shrnuta kritéria na trhu běžně dostupných zálivkových směsí. Na základě těchto kritérií jsem vyhotovila několik variantních směsí z odpadních jíílů, jejichž vlastnosti jsem následně porovnála s vlastnostmi směsí od výrobců.*

Abstract: *This bachelors thesis is focused on the exploitability of the waste-clays in the mixtures for tamponage mixtures for heat pumps wells. The main content of my thesis is focused on laboratory experiments, their development, evaluation and comparison. The first part is dedicated to the testing of the extracted waste-clays. The second part is dedicated to the summarization of criteria related to the tamponage mixtures which are normally accessible on the regular market. On the basis of this criteria I prepared several variant mixtures from waste-clays. Further, I made a comparison of the mixtures obtained from the manufacturers.*

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracovala samostatně a použila jsem pouze literaturu uvedenou v příloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne

.....

podpis

Poděkování

Úvodem bych ráda poděkovala celému týmu Centra experimentální geotechniky. Zejména vedoucímu mé bakalářské práce, panu Ing. Radku Vašíčkovi, Ph.D., za pomoc při jejím zpracování, odborné vedení a podnětné rady. Taktéž děkuji i zástupcům firmy CHEMCOMEX. Dále bych chtěla poděkovat mým rodičům za podporu v průběhu celého studia.

Laboratorní práce byly provedeny s využitím Výzkumné infrastruktury RINGEN (Výzkumná infrastruktura pro geotermální energii, č. LM2015084), finančně podpořené Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy.

Obsah

1	Seznam použitých symbolů	10
2	Úvod a cíle	12
2.1	Cíle práce	13
3	Metodika	14
3.1	Laboratorní testování vlastností odpadních jíílů	14
3.2	Hlavní experimentální část pro tamponážní směsi	14
3.3	Návrh postupu dalších prací	15
3.4	Závěr	15
4	Definice použitých zkoušek dle norem	16
4.1	Hmotnostní vlhkost	16
4.2	Objemová hmotnost	16
4.3	Konzistenční meze (Atterbergovy meze)	17
4.3.1	Mez tekutosti stanovená kuželovou metodou	17
4.3.2	Mez plasticity	18
4.4	Swell index	19
4.5	Zdánlivá hustota pevných částic	20
4.6	Hydraulická vodivost; bobtnací tlak	21
4.6.1	Součinitel hydraulické vodivosti	22
4.6.2	Bobtnací tlak	23
4.7	Zrnitostní rozbor zemin	24
4.8	Stanovení tepelných vlastností	25
4.8.1	Součinitel tepelné vodivosti λ (tepelná konduktivita)	25
4.8.2	Objemová tepelná kapacita	25
4.9	Jednoosá pevnost v tlaku válcového vzorku	26
5	Laboratorní testování vlastností odpadních jíílů	28
5.1	Zajištění odpadních jíílů	28
5.2	Popis odpadních jíílů	29
5.3	Příprava jednotlivých vzorků a jejich samotné testování	30
5.3.1	170- Kaolín Bechyně	31

5.3.2	194- podsítné	32
5.3.3	195- odprašky z filtrů	33
5.3.4	196- šlika jemná	34
5.3.5	197- šlika hrubá	35
5.3.6	198- formy ze slévárny	36
5.4	Výsledky jednotlivých zkoušek a jejich porovnání	37
5.4.1	W- vlhkost zemin	37
5.4.2	W_L - mez tekutosti kuželovou metodou 80g/30°	38
5.4.3	W_P - mez plasticity	39
5.4.4	SI - swell index	40
5.4.5	ρ_S - zdánlivá hustota pevných částic	41
5.4.6	Hydraulická vodivost	42
5.4.7	Z- zrnitostní rozbor	44
5.5	Shrnutí výsledků	45
5.6	Celkové porovnání výsledků a závěr první části	46
6	Hlavní experimentální část pro tamponážní směsi	47
6.1	Současná situace na trhu	47
6.2	Výběr a popis referenční tamponážní směsi	48
6.3	Výběr odpadních jíílů na základě výsledků předchozích laboratorních zkoušek a kritérií pro tamponážní směsi	50
6.4	Příprava a testování referenčních vzorků a vzorků alternativních směsí s odpadními jíily	51
6.4.1	Referenční vzorky	53
6.4.2	Vzorky alternativních směsí s odpadními jíily	54
6.5	Vyhodnocení výsledků	55
6.5.1	REF- referenční materiál Zeo- Therm 1.0	55
6.5.2	194- podsítné	59
6.5.3	170- kaolín Bechyně	62
6.6	Porovnání výsledků	65
6.6.1	Porovnání výsledků po šesti dnech zrání	65
6.6.2	Porovnání výsledků po dvaceti-jedna dnech zrání	67

6.7	Popis a příprava vzorků přidáním dalších aditiv a s rozdílném mísení záměsi	69
6.7.1	Porovnání výsledků záměsi s grafitem po šesti dnech zrání	69
6.8	Celkové zhodnocení a závěr druhé části	73
7	Návrh postupu dalších prací	74
7.1	Návrh prací	74
7.2	Návrh modelu pro bližší testování	75
8	Závěr	76
	Použitá literatura	77
	Seznam obrázků	80
	Seznam tabulek	82

1 Seznam použitých symbolů

W	[%]	hmotnostní vlhkost
m_w	[g]	hmotnost vody v zemině
m_d	[g]	hmotnost vysušené zeminy
ρ	[kg/m ³]	objemová hmotnost
m	[kg]	hmotnost přirozeně vlhkého vzorku
V	[m ³]	objem vlhkého vzorku
W_L	[%]	mez tekutosti
W_P	[%]	mez plasticity
W_S	[%]	mez smrštění
SI	[ml/2g]	swell index
ρ_S	[Mg/m ³]	zdánlivá hustota pevných částic
m_d	[g]	hmotnost pevných částic vysušené zeminy
V_S	[cm ³]	objem pevných částic
m_1	[g]	hmotnost pyknometru
m_2	[g]	hmotnost pyknometru se vzorkem
m_3	[g]	hmotnost pyknometru se vzorkem a pomocnou kapalinou
V	[cm ³]	objem pyknometru
ρ_k	[Mg/m ³]	hustota pomocné kapaliny
k	[m/s]	koeficient hydraulické vodivosti
ν	[m/s]	rychlost proudění ve vzorku
i	[–]	hydraulický gradient
Δh	[m]	hydraulická výška
Δl	[m]	dráha, kterou musí vodní částice projít zeminou
p	[Pa]	sytící tlak
g	[m/s ²]	gravitační zrychlení
q	[m ³ /s]	množství kapaliny proteklé vzorkem za určitý čas
A	[m ²]	plocha
k_{10}	[m/s]	hydraulická vodivost přepočítaná k referenční teplotě

α	$[-]$	opravný součinitel
T	$[K], [^{\circ}C]$	teplota
σ_{sw}	$[kPa]$	bobtnací tlak
F	$[kN]$	síla
λ	$[W/m \cdot K]$	součinitel tepelné vodivosti
λ	$[-]$	štíhlost
q	$[W/m^2]$	vektor hustoty tepelného toku
c_p	$[MJ/m^3]$	objemová tepelná kapacita
R_p	$[MPa]$	jednoosá pevnost v tlaku
E_{def}	$[MPa]$	modul deformace

2 Úvod a cíle

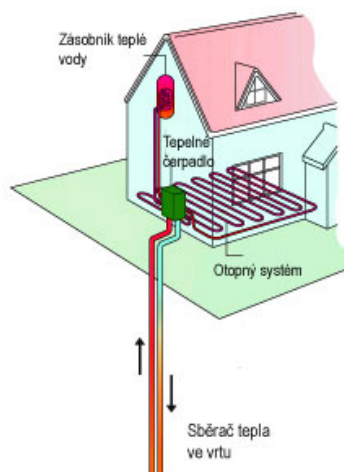
V této bakalářské práci se zabývám využitím odpadních jíílů z různých zdrojů průmyslu. Provedla jsem řadu laboratorních zkoušek, na jejichž základě a následném vyhodnocení výsledků vybírám odpadní jííl vhodný pro alternativní beztlakovou- gravitační zálivku. Zálivka se používá do vrtů tepelných čerpadel a slouží k optimálnímu přenosu tepla z půdního prostředí směrem k tepelnému sběrači. Úkolem je ověřit, zda je možné této recyklace odpadních jíílů využít a eliminovat tím přebytečný odpad.

Tepelná čerpadla

Na začátku je vhodné shrnout, k čemu tepelná čerpadla slouží. Tepelná čerpadla jsou v dnešní době vhodnou alternativou vytápění. Jejich benefity jsou jak na straně ekonomické, tak na straně ekologické. Vytápění pomocí tepelných čerpadel je uživatelsky velice přívětivé a údržbou nenáročné po celou dobu jeho fungování.

Tepelná čerpadla se dělí podle toho, z jakého prostředí (vody, vzduchu, země) tepelnou energii čerpají.

Jednou z výhod tepelných čerpadel je schopnost akumulace tepla i chladu. V zimním období slouží pro vytápění, v letním období naopak pro ochlazování. U tepelných čerpadel typu země- voda je výhodou i jeho tichý chod [19].



Obrázek 1: Tepelné čerpadlo se zemním vrtem (převzato z: [1])

Tato práce je zaměřená na čerpadla získávající energii z půdního prostředí, kde je pro efektivní přenos tepla nutná vhodná zálivka kolektoru.

Tepelná čerpadla se zemním kolektorem

Podstatou zemních tepelných čerpadel (země- voda) je vystrojený vrt, odkud je přenos tepla z půdního prostředí do tepelného čerpadla zajištěn cirkulující nemrznoucí kapalinou. Nemrznoucí kapalina cirkuluje ve speciálním potrubí, tzv. kolektoru. Pro optimální přenos tepla ze země musí být prostor ve vrtu mezi kolektorem a okolním půdním prostředím vyplněn v celé své délce speciální tamponážní směsí.

2.1 Cíle práce

Cílem mé práce je stanovení mechanických vlastností a dalších parametrů odpadních jíílů. Na základě výsledků z laboratorních zkoušek zvolím vhodné zástupce pro tvorbu záměsí tamponážních směsí. Z řad na trhu (pro tyto účely) běžně dostupných směsí dále vyberu referenční směs a porovnáím její vlastnosti s vlastnostmi mnou vytvořených záměsí.

3 Metodika

Mou práci jsem pro přehlednost rozdělila na dvě hlavní části:

- i. Laboratorní testování vlastností odpadních jíílů
- ii. Hlavní experimentální část pro tamponážní směsi

a to sice proto, že z výsledků části první vychází část druhá.

3.1 Laboratorní testování vlastností odpadních jíílů

- Testování jíílů
 - 1) Zajištění odpadních jíílů
 - 2) Popis odpadních jíílů
 - 3) Příprava jednotlivých vzorků a jejich samotné testování
 - 4) Výsledky jednotlivých zkoušek a jejich porovnání
 - 5) Shrnutí výsledků
- Celkové porovnání výsledků a závěr první části

3.2 Hlavní experimentální část pro tamponážní směsi

- Příprava
 - 1) Současná situace na trhu a shrnutí kritérií
 - 2) Výběr a popis referenční tamponážní směsi
 - 3) Výběr odpadních jíílů na základě výsledků z předchozích laboratorních zkoušek a kritérií pro tamponážní směsi
- Testování
 - 1) Příprava a testování referenčních vzorků a vzorků alternativních směsí s odpadními jíily
 - 2) Vyhodnocení výsledků daných z časových intervalů
 - 3) Porovnávání výsledků

4) Popis a příprava vzorků s přidáním dalších aditiv a s rozdílném mísení záměsí

5) Porovnání výsledků

- Celkové zhodnocení a závěr druhé části

3.3 Návrh postupu dalších prací

1) Návrh prací

2) Návrh modelu pro bližší testování vybrané směsí

3.4 Závěr

4 Definice použitých zkoušek dle norem

4.1 Hmotnostní vlhkost

Stanovení dle ČSN EN ISO 17892-1 (Geotechnický průzkum a zkoušení - Laboratorní zkoušky zemin - Část 1: Stanovení vlhkosti zemin).

Hmotnostní vlhkost (W) [%] je definována jako poměr hmotnosti vody v zemině k hmotnosti vysušené zeminy [2] [16].

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

m_w – hmotnost vody v zemině [g]

m_d – hmotnost vysušené zeminy [g]

4.2 Objemová hmotnost

Stanovení dle ČSN CEN ISO/TS 17892-2 (Geotechnický průzkum a zkoušení - Laboratorní zkoušky zemin - Část 2: Stanovení objemové hmotnosti jemnozrnných zemin).

Objemová hmotnost přirozeně vlhké zeminy (ρ) [kg/m^3] udává poměr mezi hmotností a celkovým objemem přirozeně vlhkého vzorku [3] [17].

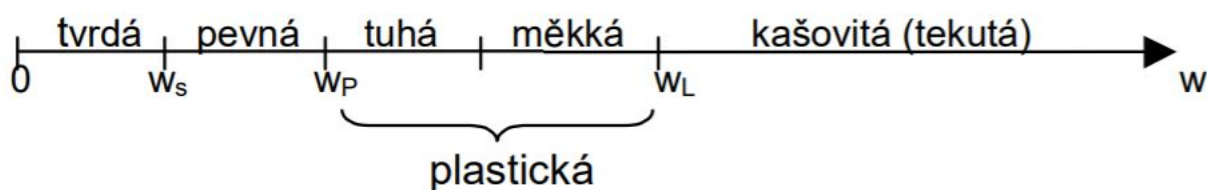
$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2)$$

m - hmotnost přirozeně vlhkého vzorku [kg]

V - objem přirozeně vlhkého vzorku [m^3]

4.3 Konzistenční meze (Atterbergovy meze)

Stanovení dle náhrady normy ČSN CEN ISO/TS 17892-12 [kat: 72635] (Geotechnický průzkum a zkoušení - Laboratorní zkoušky zemin - Část 12: Stanovení konzistenčních mezí). Na obr. č.2 jsou graficky znázorněny konzistenční stavy zemin. Jednotlivé fáze oddělují smluvní konzistenční (Atterbergerovy) meze [4].



Obrázek 2: Konzistenční meze (převzato z: [5])

Pro určitou zeminu nastává přechod z jednoho stavu do druhého vždy při stejných vlhkostech– konzistenčních mezích:

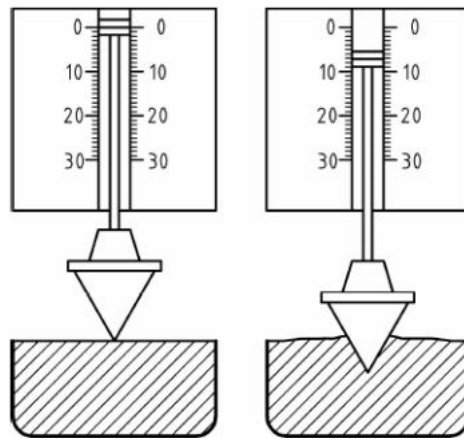
- Mezi stavem tekutým a plastickým je definována mez tekutosti W_L
- Mezi stavem plastickým a pevným je definována mez plasticity W_p
- Mezi stavem pevným a tvrdým je definována mez smrštění W_s

4.3.1 Mez tekutosti stanovená kuželovou metodou

Mez tekutosti (W_L) se stanovuje pomocí **penetrometru**. Součástí penetrometru je přesně obrobený kužel ($80g/30^\circ$), který se volným pádem zanoří (penetruje) do zkoumaného vzorku.

Ve výukových materiálech na stránkách Centra experimentální geotechniky (dále jen CEG) [17] je uvedeno: „Chování soudržné zeminy je závislé na její vlhkosti. Při vysoké vlhkosti se jílovitá zemina stává kašovitou až tekutou. Tekutý stav odpovídá případu, kdy zemina neklade prakticky žádný odpor proti smykovému přetvoření. Vlhkost, při které zemina již vykazuje určitou smykovou pevnost, je uvažována za hraniční mezi stavem tekutým a plastickým. Je označována jako mez tekutosti W_L . Udává se v %, při jaké vlhkosti dosáhne vzorek penetrace 20mm s pomocí kužele $80g/30^\circ$. Měření se vynášejí do souhrnného grafu závislosti vlhkosti vzorku W [%] na hodnotě penetrace [mm].”

Schéma penetrometru je znázorněno na obr. č. 3



Obrázek 3: Určování meze tekutosti pomocí penetrace (převzato z: [6])

Pomocí meze tekutosti rozlišujeme (dle ČSN 73 6133 [kat: 52174] (Navrhování a provádění zemního tělesa pozemních komunikací); ČSN 73 1001 [kat: 31060] (Zakládání staveb - Základová půda pod plošnými základy)) zeminy s plasticitou [7] [8]:

L - nízkou $W_L < 35\%$

I - střední $W_L = 35-50\%$

H - vysokou $W_L = 50-70\%$

V - velmi vysokou $W_L = 70-90\%$

E - extrémně vysokou $W_L > 90\%$

4.3.2 Mez plasticity

Při výrazném snížení vlhkosti zemina nabývá charakteru křehké látky, a při přetváření dojde k jejímu porušení. Tento stav je označován jako stav pevný a přechodná vlhkost mezi stavem plastickým a pevným je označována jako mez plasticity (W_P).

Mez plasticity se určí tak, že se zemina prosytí vodou a na savé podložce se z ní vyválí válečky o průměru 3 mm. Začnou-li se tyto válečky drolit po délce cca 10 mm, má zemina vlhkost na mezi plasticity (W_P) [%] [17].

4.4 Swell index

Stanovení dle ASTM D5890 - 11 Standard Test Method for Swell Index of Clay Mineral Component of Geosynthetic Clay Liners [9].

Stanovení indexu bobtnavosti (SI) [$ml/2g$] se používá pro stanovení obecných bobtnacích vlastností bentonitového jílu- volného bobtnání v kapalině. Jedná se o méně přesnou zkoušku, při které je vzorek testován v odměrném válci naplněném destilovanou vodou. Do válce se v určitých časových intervalech přisypává malé množství materiálu (aby se předešlo shlukování zrn) tak, aby zrna mohla volně klesat ke dnu válce. Výsledkem zkoušky je hodnota objemu 2g. Provádí se opakovaná měření, výsledky z těchto měření se průměrují. Schopnost bobtnání je považována za dobrý indikátor kvality bentonitu. Bez ohledu na to může být tento testovací parametr použit jako jednoduchý kvalitativní indikátor základních jíílů.

4.5 Zdánlivá hustota pevných částic

Stanovení dle ČSN EN ISO 17892-3 (Laboratorní stanovení zdánlivé hustoty pevných částic zemin)[10].

Měrná (specifická) hmotnost zeminy (ρ_S) [Mg/m^3] je definovaná jako poměr hmotnosti jejich jednotlivých vysušených pevných částic a jejich objemu. Zjednodušeně řečeno se jedná o objemovou hmotnost samotných zrn bez vody a pórů [16].

$$\rho_S = \frac{m_d}{V_S} \quad (3)$$

m_d – hmotnost pevných částic vysušené zeminy [g]

V_S – objem pevných částic [cm^3]

Výpočet měrné hmotnosti (pomocí pyknometru- viz obr. č.4) je definován vztahem:

$$\rho_S = \frac{(m_2 - m_1)}{V \cdot \rho_k + m_2 - m_3} \cdot \rho_k \quad (4)$$

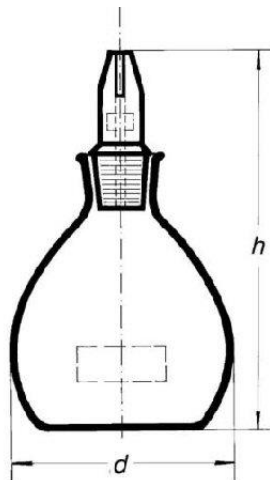
m_1 – hmotnost pyknometru [g]

m_2 – hmotnost pyknometru se vzorkem [g]

m_3 – hmotnost pyknometru se vzorkem a pomocnou kapalinou [g]

V – objem pyknometru [cm^3]

ρ_k – hustota pomocné kapaliny [Mg/m^3]



Obrázek 4: Pyknometr 25ml (převzato z: [11])

4.6 Hydraulická vodivost; bobtnací tlak

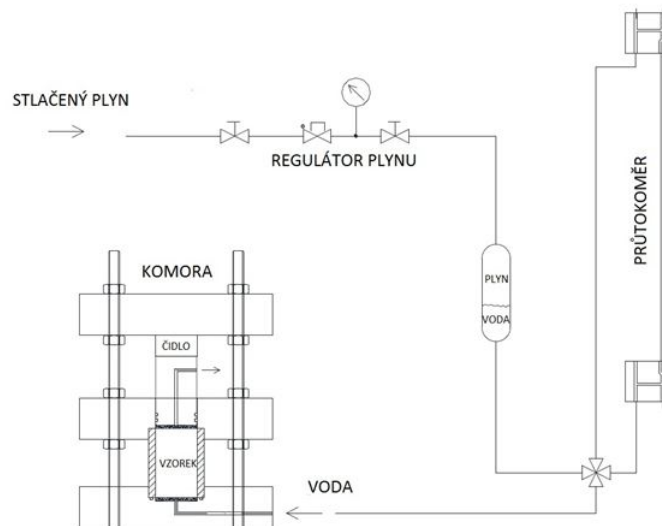
Stanovení dle ČSN CEN ISO/TS 17892-11 (Geotechnický průzkum a zkoušení - Laboratorní zkoušky zemin - Část 11: Stanovení propustnosti zemin při konstantním a proměnném spádu)[12].

Pro měření hydraulické vodivosti a bobtnacího tlaku se využívá speciálního zařízení (aparatury z obr. č.5).

Do systému je vtlačován plyn (argon), který je dle potřeby regulován (max. 6 MPa). V tlakové nádobě stlačený plyn působí na kapalinu (destilovanou vodu či mineralizovanou vodu, dále jen vodu), která je pod tlakem vháněna do vzorku přes průtokoměr.

Průtokoměr je ze skleněné trubičky se stupnicí, kde je sledován objem vody, který přitekne do vzorku.

Vzorek je z obou stran (horní a spodní) obklopen propustnými destičkami, které zamezují vyplavování vzorku. Takto připravený vzorek je umístěn do ocelového válečku, který je zasazen v komoře tak, aby nedocházelo ke změně objemu vzorku během testování.



Obrázek 5: Schéma aparatury pro společné měření hydraulické vodivosti a bobtnacího tlaku

4.6.1 Součinitel hydraulické vodivosti

Níže uvedené informace jsou uvedeny z [16].

Součinitel hydraulické vodivosti/koefficient filtrace (k) [m/s] charakterizuje hydraulickou vodivost. Stanovení (k) vychází z Darcyho filtračního zákona:

$$v = k \cdot i \quad (5)$$

v - rychlost proudění ve vzorku [m/s]

i - hydraulický gradient $[-]$

kde hydraulický gradient (i) se spočítá dle vztahu:

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

Δh - hydraulická výška [m]

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

a hydraulická výška (Δh) (pro používaný způsob měření) je definovaná dle vztahu:

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

p - sytící tlak [Pa]

ρ - objemová hmotnost kapaliny [kg/m^3]

g - gravitační zrychlení [m/s^2]

Hodnota hydraulické vodivosti (k) se vypočte jako:

$$k = \frac{q}{i \cdot A} \quad (8)$$

q - množství kapaliny proteklé vzorkem za určitý čas [m^3/s]

k - hydraulická vodivost [m/s]

i - hydraulický gradient [m/m]

A - plocha vzorku kolmá na směr proudění [m^2]

Během zkoušky se zaznamenává teplota, kvůli závislosti vlastností kapaliny na změně teploty. Pro převedení výsledků k referenční teplotě 10°C (teplota podzemní vody) se používá převedení pomocí Poisseulleovy empirické rovnice:

$$k_{10} = \alpha \cdot k \quad (9)$$

$$\alpha = \frac{1.359}{1 + 0.00337 \cdot T + 0.00022 \cdot T^2} \quad (10)$$

k_{10} - Hydraulická vodivost přepočítaná k ref. teplotě 10°C [m/s]

k - hydraulická vodivost [m/s]

α - opravný součinitel [—]

T - teplota vody v průběhu zkoušky [°C]

4.6.2 Bobtnací tlak

Je generován bobtnavým materiálem, jemuž je při kontaktu s vodou zabráněna změna objemu. Bobtnavé materiály se vyznačují schopností zvětšovat svůj objem sorbováním vody. U zemin je tento parametr ovlivněn objemovou hmotností sušiny (tedy jejím zhutněním) a zrnitostním a mineralogickým složením [16].

V rámci této bakalářské práce neprobíhalo měření klasickým způsobem v oedometrech, ale pomocí propustoměru (aparatura z obr. č.5). Měření bobtnacího tlaku (σ_{sw}) [kPa] pomocí propustoměrů je založeno na zaznamenávání hodnot tlaku silovými čidly při konstantním objemu dle interního značení ZK. Č. 182/22. Vypočte se dle vztahu:

$$\sigma_{sw} = \frac{F}{A} \quad (11)$$

F - síla měřená na čidle [kN]

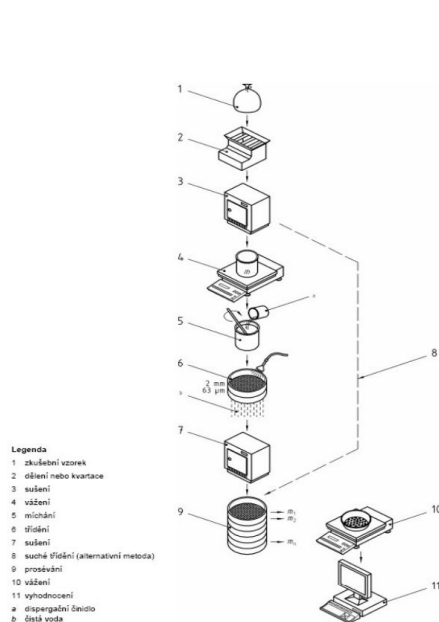
A - plocha vzorku, kde je přenášen tlak na čidlo [m^2]

4.7 Zrnitostní rozbor zemin

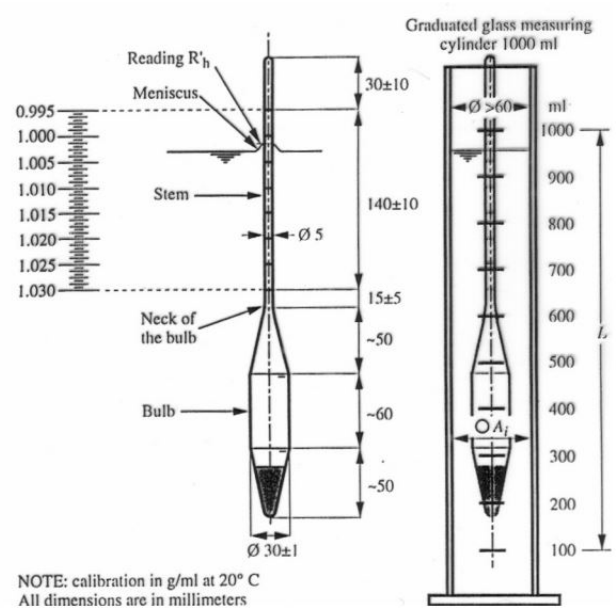
Stanovení dle náhrady normy ČSN EN ISO 17892-4 [kat: 501649] (Geotechnický průzkum a zkoušení - Laboratorní zkoušky zemin - Část 4: Stanovení zrnitosti zemin) [13].

Zrnitostní křivka (Z) je součtová čára. Každý její bod udává procentuální hmotnostní podíl zrn menších než určitý průměr zrna (d) ku celkové hmotnosti vzorku. Stanovení probíhá ve dvou fázích:

- **sítový rozbor** (obr. č.6) - prosévání na sítích standardizované řady pro zrna větší než 0,06 mm (písčítá až šterkovitá)
- **hustoměrná metoda** - pro zrna menší než 0,06 mm (prachovitá), vychází ze Stokesova usazovacího zákona, udávajícího vztah mezi průměrem zrn a rychlostí jejich usazování v kapalině. Měří se hustoměrem (viz obr. č.7) [17].



Obrázek 6: Prosévací zkouška
(převzato z: [6])



Obrázek 7: Rozbor zemin-
Casagrande- Hustoměr
(převzato z: [6])

4.8 Stanovení tepelných vlastností

4.8.1 Součinitel tepelné vodivosti λ (tepelná konduktivita)

Stanovení dle ČSN 72 7306 (Stanovení součinitele tepelné vodivosti stavebních materiálů a výrobků) [14].

Součinitel tepelné vodivosti (λ) [$W/m \cdot K$] vyjadřuje schopnost látky vést teplo. Číselně udává množství tepla, které v ustáleném stavu prochází jednotkovým průřezem látky, při jednotkovém teplotním gradientu za jednotku času.

Výpočet součinitele tepelné vodivosti je definován Fourierovým zákonem [17]:

$$q = \lambda \cdot \nabla T \quad (12)$$

q - vektor hustoty tepelného toku [W/m^2]

T - teplota [K]

4.8.2 Objemová tepelná kapacita

Objemová tepelná kapacita (c_ρ) [$MJ/m^3 \cdot K$] je definována jako podíl tepelné kapacity látky a jejího objemu [17]:

$$c_\rho = \frac{C}{V} \quad (13)$$

C - tepelná kapacita [J/K]

V - objem [m^3]

Tepelná kapacita je dána vztahem:

$$C = \frac{dQ}{dT} \quad (14)$$

Q - teplo [J] T - teplota [K]

Objemová tepelná kapacita je definována jako množství tepla potřebné k ohřátí $1m^3$ látky o $1K$.

V rámci mé bakalářské práce jsem hodnoty tepelné vodivosti získala z měřicího přístroje, který pro měření využívá plošnou sondu.

4.9 Jednoosá pevnost v tlaku válcového vzorku

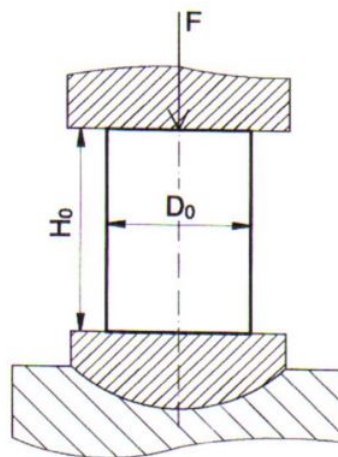
Stanovení dle normy pro zeminy ČSN CEN ISO/TS 17892-12 [kat: 72635] (Geotechnický průzkum a zkoušení - Laboratorní zkoušky zemin - Část 12: Stanovení meze tekutosti a meze plasticity) [15].

Průběh zkoušky

Zkušební vzorek tvaru rotačního válce je nejprve zvážen a jsou změřeny jeho rozměry. Dále se vypočítá objemová hmotnost tělesa. Zkušební vzorek je vložen pod hlavu zatěžovacího lisu (s možností automaticky řízené zkoušky) tak, aby zatěžovací síla působila v ose testovaného vzorku. Měří se přetvoření vzorku v závislosti na rostoucím zatížení a průběh síly v čase [17].

Zkoušky jsou prováděny pro určitou sadu vzorků. Vzorek je zatěžován až do porušení. V průběhu zkoušky je možné sledovat a zaznamenávat čas, přírůstek působící síly (resp. napětí) a deformaci [17].

Výsledkem zkoušky (obr. č.8) je hodnota jednoosé pevnosti v tlaku (R_p) [MPa] a hodnota modulu deformace E_{def} [MPa]. Zároveň se stanovuje maximální síla při porušení vzorku (F)



Obrázek 8: Jednoosá pevnost v tlaku (převzato z: [17])

Do výstupního protokolu zkoušky se často uvádí [17]:

- fyzikální parametry: vlhkost, objemová hmotnost
- údaje o druhu, přípravě a rozměrech zkoušeného vzorku

- údaje o rychlosti a způsobu zatěžování, údaje o způsobu porušení
- graf znázorňující závislost napětí (svislá osa) na poměrné svislé deformaci (vodorovná osa)

5 Laboratorní testování vlastností odpadních jíílů

Testování jíílů

5.1 Zajištění odpadních jíílů

Po poptávce odpadních jíílů u jednotlivých producentů (ze sléváren, z výroby kaolínu, bentonitů a steliv) jsem získala materiály pro následné testování. Množství jednotlivých materiálů je uvedené v tab. č.1. Každému materiálu jsem přiřadila identifikační číslo a výrobní označení.

Tabulka 1: Přehled materiálu projektu RECLAY

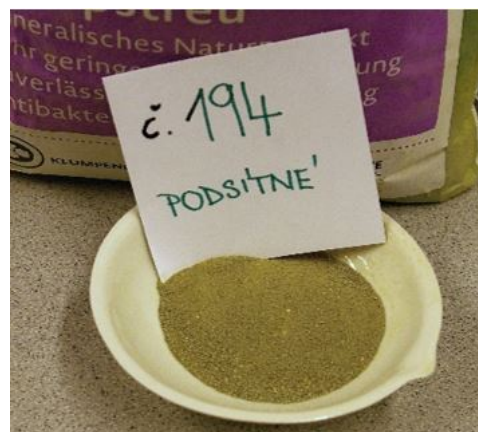
Číslo materiálu	Označení CEG	Výrobní označení	Dodáno	Dodané množství	dodavatel
170	Kaolín Bechyně	Bechyně	29.9.18	9kg	Kompostárna Jarošovice, s.r.o.
194	Podsítné	Podsítné	18.10.18	25kg	Keramost a.s.
195	Odprašky z filtrů	Odprašky z filtrů	18.10.18	2kg	Keramost a.s.
196	Šlika jemná	Šlika jemná	22.10.18	25kg	Keramost a.s.
197	Šlika hrubá	Šlika hrubá	22.10.18	25kg	Keramost a.s.

5.2 Popis odpadních jíílů

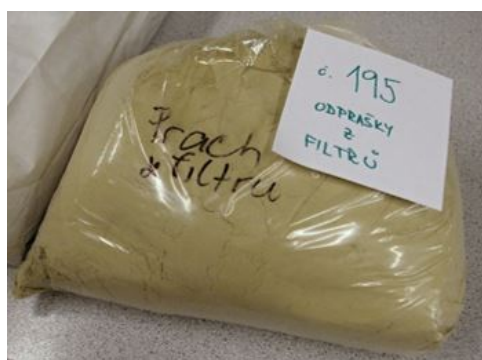
Na obrázcích níže jsou pod příslušným označením uvedeny všechny (zatím neupravené) testované materiály.



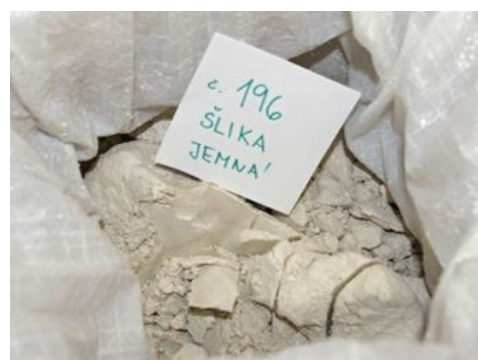
Obrázek 9: Kaolín Bechyně



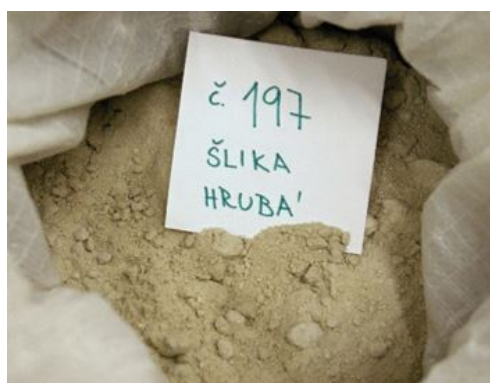
Obrázek 10: Podsítne'



Obrázek 11: Odprašky z filtrů



Obrázek 12: Šlika jemná



Obrázek 13: Šlika hrubá



Obrázek 14: Formy ze slévárny

5.3 Příprava jednotlivých vzorků a jejich samotné testování

Pro jednotlivé vzorky z tab. č.1 jsem provedla řadu zkoušek, jejichž princip byl vysvětlen v předchozí kapitole. Konkrétně:

- W - vlhkost zemin dle ČSN EN ISO 17892-1
- W_L - mez tekutosti kuželovou metodou dle ČSN CEN ISO/TS 17892-12
[kat: 72635]
- W_P - mez plasticity dle ČSN CEN ISO/TS 17892-12 [kat: 72635]
- SI - swell index dle ASTM D5890 - 11
- ρ_S - zdánlivá hustota pevných částic dle ČSN EN ISO 17892-3
- k - součinitel hydraulické vodivosti, bobtnací tlak dle ČSN CEN ISO/TS 17892-11
- Z - zrnitostní rozbor dle ČSN EN ISO 17892-4 [kat: 501649]

5.3.1 170- Kaolín Bechyně

W - na nerozemletém materiálu částečně vysušeném provedena 3x zkouška

W_L - rozemletý, 0.5mm podsítný, cca 14dní odleželý materiál namíchaný na penetraci 200mm byl následně podroben zkoušce- odebrány 4 vzorky na vlhkost

pozn: materiál měl při plnění misky chování jako pryž. Poslední vzorek se vychyluje z postupně vzrůstající přímky

W_P - dle náležitostí byla provedena zkouška na 0.5mm podsítném materiálu, následně 2 vzorky odebrány na vlhkost

SI - v 5 odměrných válcích prováděna na vysušeném vzorku zkouška. Materiál po 24h dokonání zkoušky lehce nabobtnal.

ρ_S - vysušený, rozemletý materiál zkoušen ve 3 pyknometrech s destilovanou vodou. Následně zchlazeno cca na 25°C. Proveden výpočet.

k - zkoumáno v propustoměru

Z - vysušený, rozdrčený vzorek byl proset na sítích 1; 0.5; 0.2; 0,1mm. Následně byla provedena hustoměrná zkouška. Vynesení do grafu.

5.3.2 194- podsítné

W- nerozemletý materiál podroben zkoušce

W_L - rozemletý, cca 48 hodin odleželý materiál namíchaný na penetraci 165mm byl následně podroben zkoušce- odebrány 4 vzorky na vlhkost

pozn.: materiál byl po předchozí zkušenosti se vzorkem č. 195_{odprašky z filtrů} nechán delší dobu homogenizovat, aby ve vzorku nebyly vzduchové bubliny. Materiály jsou si chováním velmi podobné.

W_P - dle náležitostí byla provedena zkouška na 0.5mm podsítném materiálu, následně 2 vzorky odebrány na vlhkost

SI - v 5 odměrných válcích prováděna na vysušeném vzorku zkouška. Materiál po 24h dokonání zkoušky značně nabobtnal.

ρ_S - vysušený, rozemletý materiál zkoušen ve 2 pyknomech s destilovanou vodou, zchlazeno na 24°C, následný den zkoušeno ještě v jednom pyknometru, zchlazeno na 22°C. Po dokončení varu měli vzorky v pyknomech vzhledově konzistenci pórovité houby, proto by byla třeba do vzorků před varem přidat více pomocné kapaliny. Vzorky velmi nabyli. Proveden výpočet.

pozn.: Vzorek byl zkoušen nadvakrát, kvůli převržení pyknometru při varu.

k - v propustoměru zkoumáno po dobu 6 týdnů

Z - provedena hustoměrná zkouška

5.3.3 195- odprašky z filtrů

W- materiál podroben zkoušce

W_L - cca 24 hodin odleželý materiál namíchaný na penetraci 150mm byl následně podroben zkoušce- odebráno 5 vzorků na vlhkost

pozn: materiál se obtížně plnil do penetrační misky, velmi snadno vytvářel malé vzduchové bublinky. Je třeba nechat materiál nechat delší dobu homogenizovat.

W_P - dle náležitostí byla provedena zkouška, následně 2 vzorky odebrány na vlhkost

SI - v 5 odměrných válcích provedena na vysušeném vzorku zkouška. Přidávání vzorku do odměrných válců bylo obtížné, vzorek je velmi jemný, na hladině plaval, při rychlém přidávání vytvářel hrudky. Po 24h dokonání zkoušky byl materiál silně nabobtnán.

ρ_S - vysušený, materiál zkoušen ve 3 pyknometrech s destilovanou vodou. Následně zchlazeno cca na 22°C. Proveden výpočet.

pozn.: k materiálu bylo po předchozí zkušenosti se vzorkem č. 194_{podsítné} přidáno před varem více pomocné kapaliny (ž 2cm nad vzorek), materiály jsou si chováním velmi podobné. Vzorek také při laboratorní zkoušce velmi nabyl. Po dokonání zkoušky bylo velmi obtížné odstranit saturovaný vzorek z pyknometru.

k- v propustoměru zkoumáno po dobu 6 týdnů Z- provedena hustoměrná zkouška

5.3.4 196- šlika jemná

W- materiál podroben zkoušce

W_L - cca 24 hodin odleželý materiál namíchaný na penetraci 150mm byl následně podroben zkoušce- odebrány 4 vzorky na vlhkost. Jeden z odebraných vzorků se vychyluje z postupně vzrůstající přímkou.

W_P - dle náležitostí byla provedena zkouška, následně 2 vzorky odebrány na vlhkost.

pozn.: materiál se velmi drobil SI- v 5 odměrných válcích provedena na vysušeném vzorku zkouška. Po 24h dokonání zkoušky byl materiál velmi slabě nabobtnán.

ρ_S - vysušený materiál zkoušen ve 2 pyknomech s destilovanou vodou, zchlazeno na 22°C, následný den zkoušeno ještě v jednom pyknometru, zchlazeno na 21°C. Proveden výpočet.

pozn.: Vzorek byl zkoušen nadvakrát, kvůli převržení pyknometru při varu.

k- v propustoměru zkoumáno po dobu 6 týdnů. Dosažené výsledky nejsou relevantní.

Vzorek netěsní, tudíž nebobtná.

Nyní zkoumáno ve speciálně upravené komoře i pro propustné zeminy.

Z- provedena hustoměrná zkouška

5.3.5 197- šlika hrubá

W - materiál podroben zkoušce

W_L - cca 24 hodin odleželý materiál namíchaný na penetraci 160mm byl následně podroben zkoušce- odebrány 4 vzorky na vlhkost.

pozn: materiál měl chování tekutých písků

W_P - vzhledem k písčité konzistenci vzorku nebyla zkouška prováděna. Zkoušku by nebylo možno provést.

SI - v 5 odměrných válcích provedena na vysušeném vzorku zkouška. Po 24h dokonání zkoušky nebylo patrné téměř žádné bobtnání vzorku.

ρ_S - vysušený, materiál zkoušen ve 3 pyknometrech s destilovanou vodou. Následně zchlazeno cca na 21°C. Proveden výpočet.

k - z výsledků swell indexu nebyla zkouška prováděna. Jedná se o nebobtnavý materiál.

Z - vysušený, rozdrcený vzorek byl proset na sítích 1; 0.5; 0.2; 0.1mm. Následně provedena hustoměrná zkouška. Vyneseno do grafu.

5.3.6 198- formy ze slévárny

W - nerozdrcený materiál podroben zkoušce

W_L - cca 24 hodin odleželý materiál namíchaný na penetraci 160mm byl následně podroben zkoušce- odebrány 4 vzorky na vlhkost.

pozn: materiál měl chování tekutých písků

W_P - vzhledem k písčité konzistenci vzorku nebyla zkouška prováděna. Zkoušku by nebylo možno provést.

SI - v 5 odměrných válcích provedena na vysušeném vzorku zkouška. Po 24h dokonání zkoušky nebylo patrné žádné bobtnání vzorku.

ρ_S - vysušený materiál zkoušen ve 2 pyknometrech s destilovanou vodou, zchlazeno na 24°C, následný den zkoušeno ještě v jednom pyknometru, zchlazeno na 22°C. Proveden výpočet.

k - z výsledků swell indexu nebyla zkouška prováděna. Jedná se o nebobtnavý materiál.

Z - vysušený, rozdrcený vzorek byl proset na sítích 1; 0.5; 0.2; 0.1mm. Vyneseno do grafu.

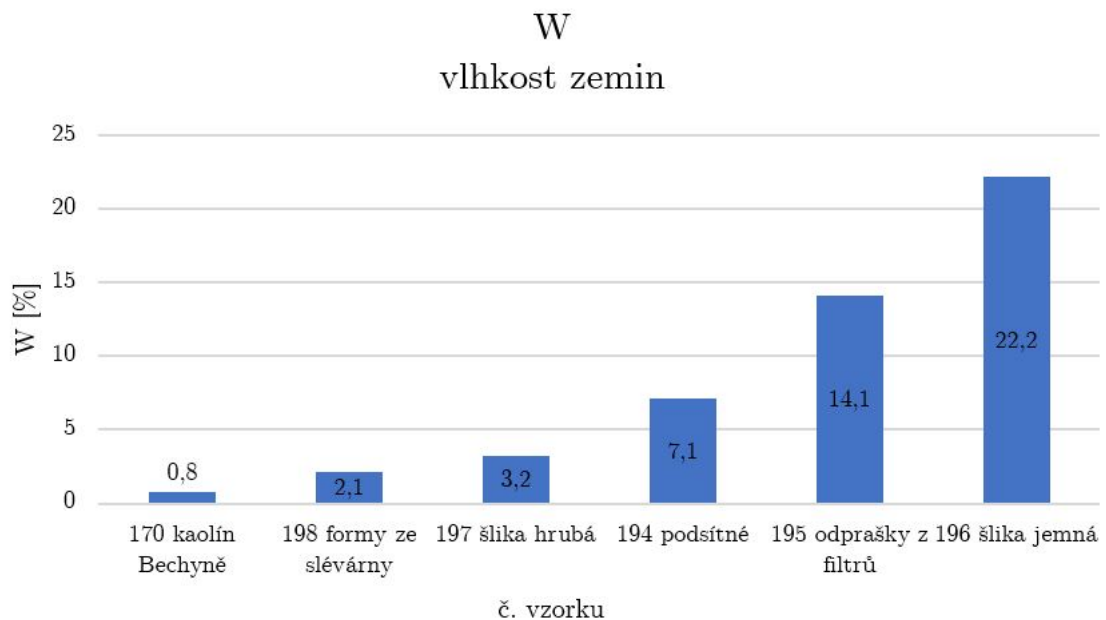
Všechny protokoly zkoušek a jejich vyhodnocení jsou k nahlédnutí na pracovišti CEG.

5.4 Výsledky jednotlivých zkoušek a jejich porovnání

5.4.1 W- vlhkost zemin

Tabulka 2: W- vlhkost zemin

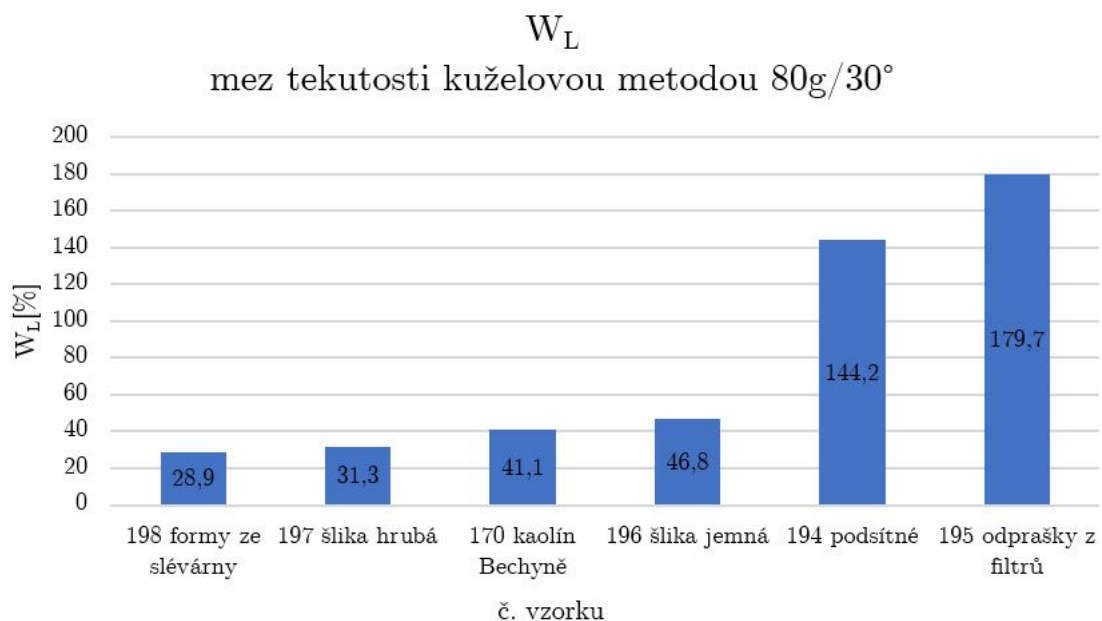
	170 kaolín Bechyně	194 podsítné	195 odprašky z filtrů	196 šlika jemná	197 šlika hrubá	198 formy ze slévárny
W[%]	0.8	7.1	14.1	22.2	3.2	2.1



Obrázek 15: W- vlhkost zemin

5.4.2 W_L - mez tekutosti kuželovou metodou 80g/30°Tabulka 3: W_L - mez tekutosti kuželovou metodou 80g/30°

	170 kaolín Bechyně	194 podsítné	195 odprašky z filtrů	196 šlika jemná	197 šlika hrubá	198 formy ze slévárny
W_L [%]	41.1	144.2	179.7	46.8	31.3	28.9

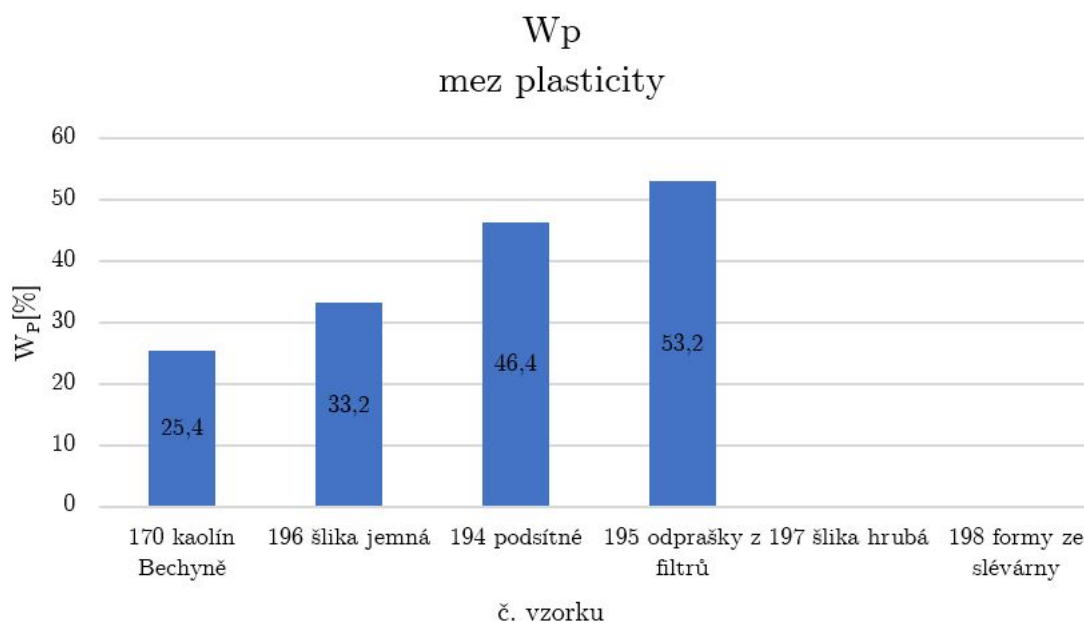
Obrázek 16: W_L - mez tekutosti kuželovou metodou 80g/30°

U některých vzorků nastaly chyby v měření a to výrazně u vzorku 170_{kaolín Bechyně} a u vzorku 196_{šlika jemná}. Vzorky 197_{šlika hrubá} a vzorek 198_{formy ze slévárny} mají podobný charakter tekutých písků. Materiály se snadno míchají a mění konzistenci po přidání pouze malého množství vody. Vzorky 194_{podsítné} a vzorek 195_{odprašky z filtrů} mají podobné vlastnosti a je třeba je nechat delší dobu homogenizovat, aby při plnění penetrační misky nevznikaly ve vzorku vzduchové bubliny. Oba materiály bylo výrazně složitější namíchat, neboť na rozdíl od výše zmíněných písčítých materiálů bylo nutno přidávat více vody.

5.4.3 W_P - mez plasticity

Tabulka 4: W_P - mez plasticity

	170 kaolín Bechyně	194 podsítné	195 odprašky z filtrů	196 šlika jemná	197 šlika hrubá	198 formy ze slévárny
W_P [%]	25.4	46.4	53.2	33.2	neprováděno	neprováděno

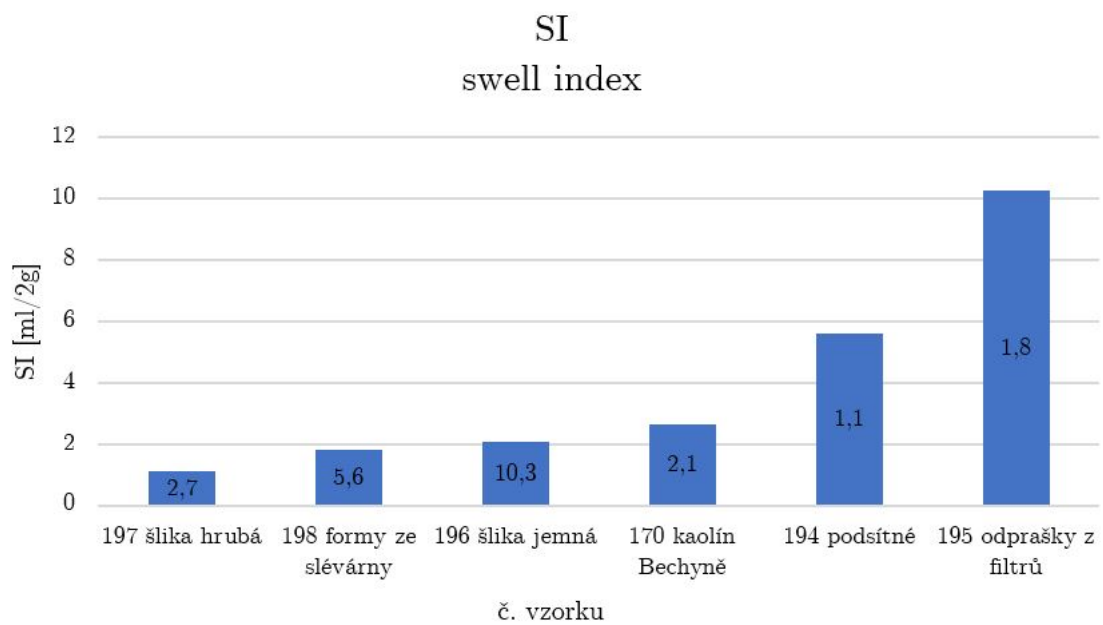
Obrázek 17: W_P - mez plasticity

Vzorky 194_{podsítné} a vzorek 195_{odprašky z filtrů} bylo velmi obtížné zpracovat a tudíž provést zkoušku plasticity. Vzorek 196_{šlika jemná} se sice na rozdíl od předešlých vzorků zpracovávala lépe, ale provádění zkoušky vzhledem ke konzistenci a nadměrnému drolení vzorku bylo obtížné. U vzorků 197_{šlika hrubá} a vzorku 198_{formy ze slévárny} jsem zkoušku neprováděla vzhledem k jejich písčitému charakteru.

5.4.4 *SI*- swell index

Tabulka 5: *SI*- swell index

	170 kaolín Bechyně	194 podsítné	195 odprašky z filtrů	196 šlika jemná	197 šlika hrubá	198 formy ze slévárny
<i>SI</i> [ml/2g]	2.7	5.6	10.3	2.1	1.1	1.8

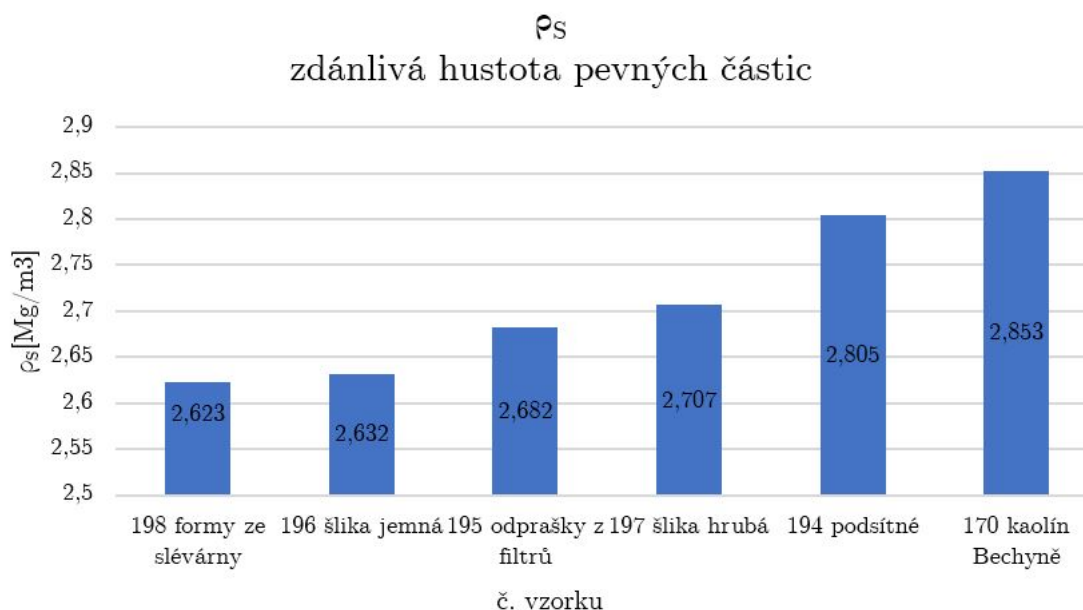


Obrázek 18: *SI*- swell index

5.4.5 ρ_S - zdánlivá hustota pevných částic

Tabulka 6: ρ_S - zdánlivá hustota pevných částic

	170 kaolín Bechyně	194 podsítné	195 odprašky z filtrů	196 šlika jemná	197 šlika hrubá	198 formy ze slévárny
$\rho_S [Mg/m^3]$	2.853	2.805	2.682	2.632	2.707	2.623



Obrázek 19: ρ_S - zdánlivá hustota pevných částic

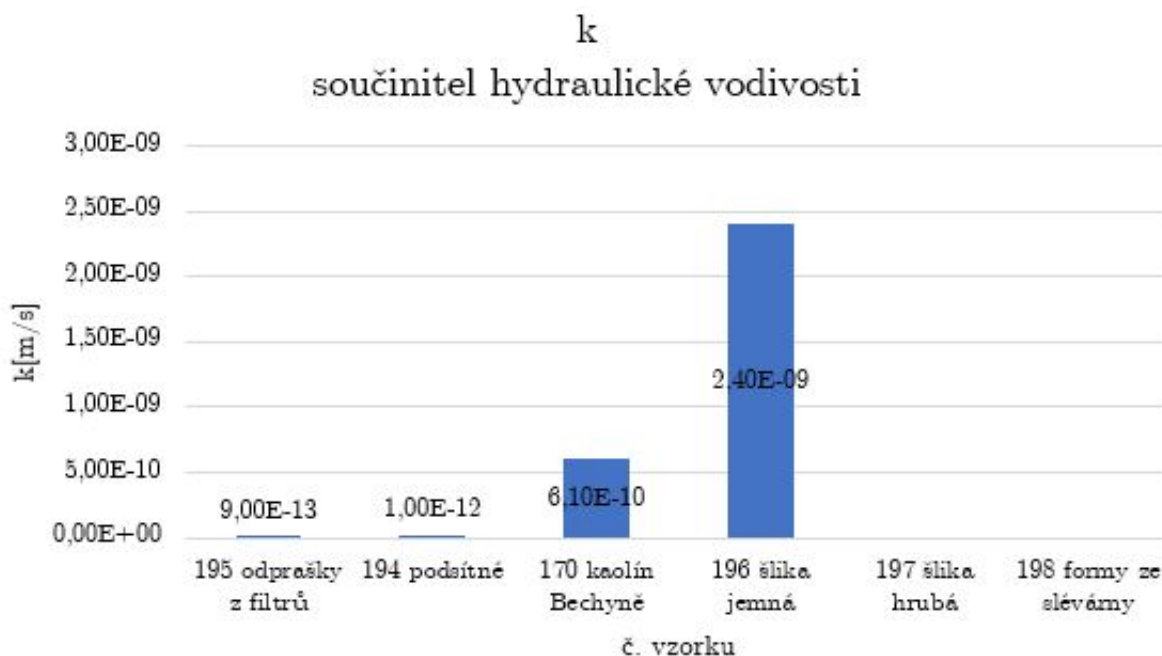
Kvůli úspěšnému průběhu zkoušky jsem musela ke vzorkům 194_{podsítné} a 195_{z textodprašky z filtrů} přidat do pyknometru před varem mnohem více pomocné kapaliny než je standardní. Oba materiály do sebe vstřebaly velké množství vody vzhledem k jejich malému objemu za vysušeného stavu.

5.4.6 Hydraulická vodivost

k -součinitel hydraulické vodivosti, bobtnací tlak

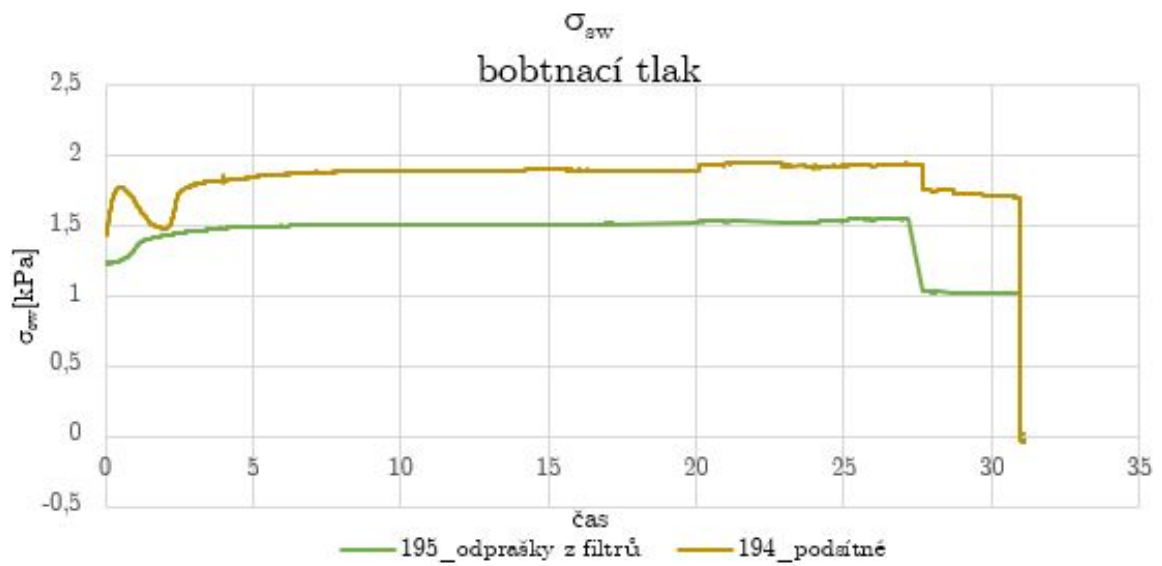
Tabulka 7: k - zdánlivá hustota pevných částic

	170 kaolín Bechyně	194 podsítné	195 odprašky z filtrů	196 šlika jemná	197 šlika hrubá	198 formy ze slévárny
k	6×10^{-10}	1×10^{-12}	9×10^{-13}	nebobtná 2×10^{-9}	neprováděno	neprováděno



Obrázek 20: k -součinitel hydraulické vodivosti

Pro představu naměřený součinitel hydraulické vodivosti pro cement byl: $k = 6 \times 10^{-13} \text{ m/s}$



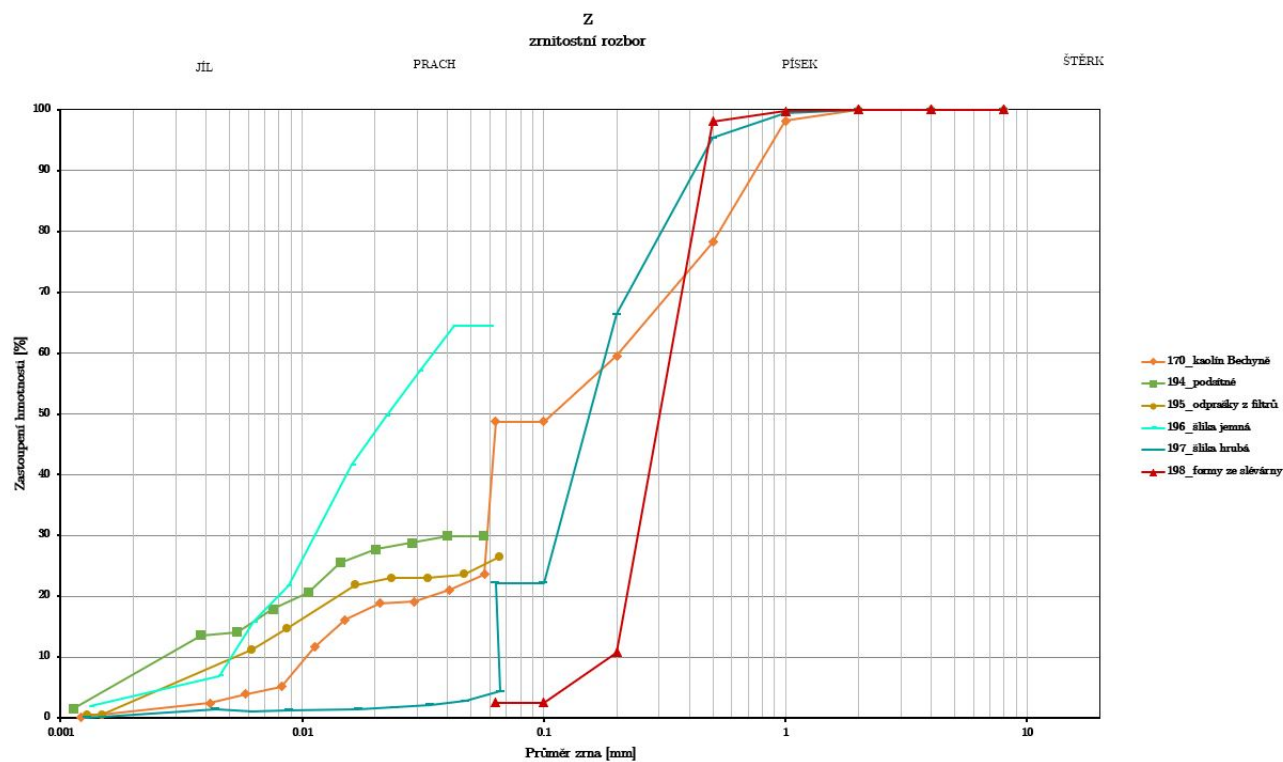
Obrázek 21: σ_{sw} - bobtnací tlak

Vzorky 196_{šliska jemná}, 197_{šliska hrubá} 198_{formy ze slévárny} jsou nebobtnavé materiály. Vzorky 197_{šliska hrubá}, 198_{formy ze slévárny} nebyly vzhledem k jejich výsledkům ze swell indexu podrobeny zkoušce- netěsní. Vzorek č. 170_{kaolín Bechyně} je propustný materiál.

5.4.7 Z- zrnitostní rozbor

Tabulka 8: Z- zrnitostní rozbor

	170 kaolín Bechyně	194 podsítné	195 odprašky z filtrů	196 šlika jemná	197 šlika hrubá	198 formy ze slévárny
Z	◆	■	●	-	-	▲



Obrázek 22: Z-zrnitostní křivka

5.5 Shrnutí výsledků

V tab. č.9 je přehled veškerých výsledků zkoušek.

Tabulka 9: Přehled výsledků laboratorních zkoušek

	W [%]	W_L [%]	W_P [%]	SI [ml/2g]	ρ_s [M/m ³]	k	Z
170 kaolín Bechyně	0.8	41.1	25.4	2.7	2.853	6×10^{-10}	graf
194 podsítné	7.1	144.2	46.4	5.6	2.805	1×10^{-12}	graf
195 odprašky z filtrů	14.1	179.7	53.2	10.3	2.682	9×10^{-13}	graf
196 šlika jemná	22.2	46.8	33.2	2.1	2.632	2×10^{-9}	graf
197 šlika hrubá	3.2	31.3	neprováděno	1.1	2.707	neprováděno	graf
198 formy ze slévárny	2.1	28.9	neprováděno	1.8	2.623	neprováděno	graf

5.6 Celkové porovnání výsledků a závěr první části

V tab. č.10 jsou závěrem v porovnání mezi sebou barevně rozřazeny výsledky zkoušek na jednotlivých materiálech, ve spektru zelená- **nejpříznivější** až červená- **méně příznivý**.

Tabulka 10: Z- zrnitostní rozbor

	W [%]	W_L [%]	W_P [%]	SI [ml/2g]	ρ_S [Mg/m ³]	k	Z
170 kaolín Bechyně	0.8	41.1	25.4	2.7	2.853	6×10^{-10}	graf
194 podsítné	7.1	144.2	46.4	5.6	2.805	1×10^{-12}	graf
195 odprašky z filtrů	14.1	179.7	53.2	10.3	2.682	9×10^{-13}	graf
196 šlika jemná	22.2	46.8	33.2	2.1	2.632	2×10^{-9}	graf
197 šlika hrubá	3.2	31.3	neprováděno	1.1	2.707	neprováděno	graf
198 formy ze slévárny	2.1	28.9	neprováděno	1.8	2.623	neprováděno	graf

Z výsledků je patrné, že vzorek 195_{odprašky z filtrů} je velmi bobtnavý materiál. Prakticky ve všech zkouškách vychází v porovnání s ostatními materiály nejlépe. V závěsu za ním je vzorek 194_{podsítné}. Oproti nim nejhůře dopadají vzorky 197_{šlika hrubá} a 198_{formy ze slévárny}. Mají veliký podíl písku a jsou to nebobtnavé materiály. Vzorky 194_{podsítné} a 195_{odprašky z filtrů} jsou si vlastnostmi velmi podobné. Jsou to velmi bobtnavé materiály. Naopak v případě sobě podobné vzorky 197_{šlika hrubá} a 198_{formy ze slévárny}, jsou materiály nebobtnavé, obsahující velký podíl písku.

6 Hlavní experimentální část pro tamponážní směsi

Testování

6.1 Současná situace na trhu

Po prozkoumání dostupných zdrojů mám možnost uvést stručný přehled běžně dostupných tamponážních směsí do vrtů tepelných čerpadel, též jejich hodnoty pevnosti v tlaku, tepelné vodivosti a recepturu- výslednou konzistenci záměsi s níž související objemová hmotnost a viskozita. Vše je uvedeno v tab. č.11, která je seřazena sestupně dle hodnot tepelné vodivosti.

Tabulka 11: Přehled výrobců směsí a jejich vlastnosti (převzato z: [20] [21] [22])

SMĚS	PEVNOST V TLAKU N/mm^2	TEPELNÁ VODIVOST $W/m \cdot K$	RECEPTURA
Fisher GeoSolid 240HS	10	2.4	1388kg \tilde{m}^3 — 720l/t
Fisher GeoSecure 240HS	10	2.4	1388kg \tilde{m}^3 — 720l/t
GeoSolid 235/240/240HS	10	2.35 - 2.40	1420- 1520kg \tilde{m}^3
GeoTherm2.0	6	2	810kg/650l \tilde{m}^3
Calidutherm EKO	10	2	1030kg/620l \tilde{m}^3
Stüwatherm Z		2	1 150kg \tilde{m}^3
Extro HS	1.5	2	820kg \tilde{m}^3 —
ThermoCem PLUS		2	810kg/650l \tilde{m}^3
Thermo HS	6	2	1250kg \tilde{m}^3
Fisher GeoCompact 140 HS	4	1.4	750kg \tilde{m}^3 — 1520l/t
Zeo- Therm 1.2		1.2	870kg/650l \tilde{m}^3
Zeo- Therm 1.0	6	1.2	873kg/698l
GeoThermLight	6	1	820kg/660l \tilde{m}^3
Daemo HS	0.5-3	1	750-1050kg \tilde{m}^3
Daemo 450HS	1	0.8-1.0	360 kg \tilde{m}^3

Tepelná vodivost je jedním z hlavních kritérií pro vhodnou volbu tamponážní směsi. Důležité jsou zejména: dokonalé propojení tepelného čerpadla s okolní zemínou a nízké tepelné ztráty. Tepelná vodivost se dá zvýšit přidáním nejrůznějších aditiv. Nejčastěji se uvádí křemenný písek, obecně kamenivo nebo také grafit a jiné. Některá aditiva mohou vést k obtížnější zpracovatelnosti a abrazivitě směsi [23].

Do výběru vhodné směsi mohou vstupovat i další kritéria. Například odolnost vůči mrazu a síranům a to především při diskuzi, ve kterém půdním či horninovém prostředí se bude vrt nacházet.

Tyto hodnoty jsou mým jakýmsi vodítkem, vstupními kritérii pro další výběr odpadního jíilu do směsi pro zálivku vrtů tepelných čerpadel [23].

6.2 Výběr a popis referenční tamponážní směsi

Jako referenční směs byla vybrána směs Zeo- Therm 1.0. Tato směs je v tab. č.11 vyznačena žlutou barvou. Příslušným hodnotám bych se měla přiblížit se směsmi s odpadními jíily. Referenční směs německého výrobce HAURI bude v dalším textu označovaná jako (REF). Tato směs byla vybrána jako zástupce ze směsí na jejichž hodnoty se dá dostat bez dalších aditiv zvyšující pevnost, tepelnou vodivost nebo jiné, jak je z některých výše uvedených hodnot ostatních výrobců zřejmé. Továrně vyráběná směs byla dodána po 25kg pytlích viz obr. č.23.

Tabulka 12: Referenční list ze stránek od výrobce (převzato z: [18])

		* w/s
obsah pytle		25 kg
granulace		0.0- 0.1 mm
produkt	na pytel	29 l *
	na tunu	1160 l *
množství vody	na pytel	25 l *
	na tunu	800 l *
tepelná vodivost		>1,2 W/m · K *
sypká hmotnost		810 kg/dm ³
hustota čerstvé malty		,55 kg/l *

Výrobce taktéž uvádí, že připravená suspenze má nízkou sedimentaci a nízké odlučování vody, maximálně do 1-2% [18].

Složení

Složení směsí včetně procentuální zastoupení jednotlivých složek podléhá obchodnímu tajemství (u všech výrobců). Avšak HAURI u Zeo- Therm 1.0 uvádí zevrubné složení [18]:

- hydraulické pojivo vyrobené z přírodních surovin
- aktivovaná fonolitová moučka
- cement
- přírodní přísady ke zvýšení tepelné vodivosti



Obrázek 23: Zeo- Therm 1.0- 2x 25kg

6.3 Výběr odpadních jíílů na základě výsledků předchozích laboratorních zkoušek a kritérií pro tamponážní směsi

Z výsledků laboratorních zkoušek uvedených v kapitole č.5 (Laboratorní testování vlastností odpadních jíílů, tab. č.10), jsem vybrala dva zástupce odpadních jíílů s nimiž budu v dalším postupu míchat alternativní tamponážní směsi. A sice:

- a) 194_{podsítné} - jako zástupce bobtnavého jíilu, pro jeho nepropustnost
- b) 170_{kaolín Bechyně} - jako zástupce nebobtnavého jíilu, pro jeho nesmrštitelnost

Pro představu uvádím bližší specifikaci produkce od producentů vybraných odpadních jíílů viz. tab. č.13.

Tabulka 13: Přehled produkce a variability produkovaných odpadních jíílů během roku

	Producent	Roční produkce [t]	Variabilita během roku
194 _{podsítné}	Keramost a.s.	přepřacovaná na produkci z výroby steliv ~ 25 000	v návaznosti na zpracováváný bentonit - minimální
170 _{kaolín Bechyně}	Kompostárna Jarošovice, s.r.o.	cca 4000 (v závislosti na ročním období převážně však zima/léto měsíčně cca 350)	výroba neumožňuje měnit strukturu ani jiné parametry již vyrobených produktů - žádná

6.4 Příprava a testování referenčních vzorků a vzorků alternativních směsí s odpadními jíily

Pro přípravu všech vzorků byla nutná důkladná zpracovatelnost jednotlivých směsí, při které jsem využila mechanických míchadel, aby směsi dosáhly homogennosti a v ideálním případě i izotropních vlastností. Dobrá zpracovanost je důležitá zejména i pro následné testování tepelné vodivosti, objemové tepelné kapacity, součinitele hydraulické vodivosti a zkoušek jednoosé pevnosti v tlaku, popsané v kapitole č.4 (Definice použitých zkoušek).

Pro realizaci zkoušky pevnosti v tlaku jsem vzorky směsí vylila do upravených polypropylenových trubek (o průměru $\varnothing 70\text{ mm}$ a výšce $h = \text{cca } 150\text{ mm}$). Pro zkoušky tepelných vlastností jsem použila hliníkové vaničky ($V = \text{cca } 650\text{ ml}$). Od každé záměsi jsem vylila vždy tři trubky, aby vznikla sada na dvojí intervalové testování. Z každé z trubek jsem následně vyjmula vzorek a rozdělila ho na dvě části. Ty byly seříznuty, jejich podstavy zarovnány a následně byly změřeny a zváženy.



Obrázek 24: Simulace stálého půdního prostředí- zrání vzorků

Výrobce referenční směsi uvádí hodnoty po šesti a dvaceti-osmi dnech. proto jsem zkoušky rozdělila do dvou časových intervalů zkoušení, a to právě po šesti dnech a z časových důvodů po dvaceti-jedna dnech (pro představu- pevnost betonu po dvaceti-jedna dnech odpovídá cca 95% výsledné pevnosti). Pro simulaci stálého podzemního půdního/ horninového prostředí, kde hraje roli především neměnná teplota, jsem čerstvě připravené vzorky záměsí uložila do podzemí laboratoře štoly Josef (obr. č.25. Zde se teplota pohybuje v rozmezí 8-10°C.



Obrázek 25: Pohled na štolu Josef

6.4.1 Referenční vzorky

Za účelem dosažení materiálových parametrů (především objemové hmotnosti) jsem postupovala dle pokynů výrobce (viz tab. č.14). Následovalo vylití připravených třech trubek. Po částečném vytvrdnutí (šesti dnech) jsem dva vzorky z trubek vyjmula, následně rozdělila na čtyři menší vzorky. Tři z nich jsem podrobila zkouškám po šesti dnech. Poslední vzorek byl vrácen do trubky a se zbylou plnou trubkou uložen zpět do podzemí k dalšímu dozrávání. Po uplynutí dalších patnácti dnů (tj. po uplynutí celkem dvaceti-jedna dnů), jsem znovu provedla zkoušky. Vstupní hmotnostní vlhkost byla: $w = 0.4\%$.

Tabulka 14: Referenční list na pytli

		vodní součinitel W/S
smíšený poměr		0.8
množství vody	kg/m^3	873
množství vody	l/m^3	698
produkt	l/t	1146
hustota suspenze	kg/dm^3	1.57
doba průtoku Marshova trychtýře	sec	41
změna hmoty	$vol.\%$	2 ± 1
pevnost v tlaku po 28 dnech	N/mm^2	6.0
pevnost v tlaku po 6 dnech při 10°C	N/mm^2	1.5

6.4.2 Vzorky alternativních směsí s odpadními jíílly

Jílovité materiály absorbují přebytečnou vodu a tím se z nich stává hustší směs. Pro následný výběr nejvhodnější směsi jsem připravila dvě sady tří záměsí s různými procentuálními podíly cementu (viz tab. č.15).

Tabulka 15: Receptura

	množství jíilu [g]	množství cementu [g]	množství vody [ml]	vizuální konzistence	produkt [g]
194 _{podsítné}					
10% CEM	1040	90	2400		~ 3500
20% CEM	1050	210	2400		
30%CEM	1050	315	2400		
170 _{kaolín Bechyně}					
10% CEM	2600	260	2000	obtížnější zpracovatelnost, zhutnitelnost	
20% CEM	2275	456	1950	dobrá zpracovatelnost, obtížnější zhutnitelnost	
30%CEM	2275	684	2000	velmi dobrá, skvělá zpracovatelnost, zhutnitelnost	~ 5000

Do alternativních směsí jsem použila portlandský směsný cement **CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R**.

Tabulka 16: Parametry uváděné výrobcem pro cement [24]

CEM	pevnost v tlaku R_p [MPa]
2 dny	19-24
28 dní	45-51

U jíílů podobajících se blíže vlastnostem bentonitu bylo patrné výrazných rozdílů v konzistenci v závislosti na rychlosti přípravy záměsí. Všechny tyto vzorky jsem mísila způsobem, že jsem nejdříve smíchala jííl s vodou a následně do takto připravené suspenze jsem teprve přisypala příslušný podíl cementu. Od každé záměsí jsem taktéž vylila tři trubky, jak již bylo popsáno na začátku této kapitoly. Uložení, doba zrání i následná úprava dílčích vzorků je shodná jako u vzorků referenčního materiálu.

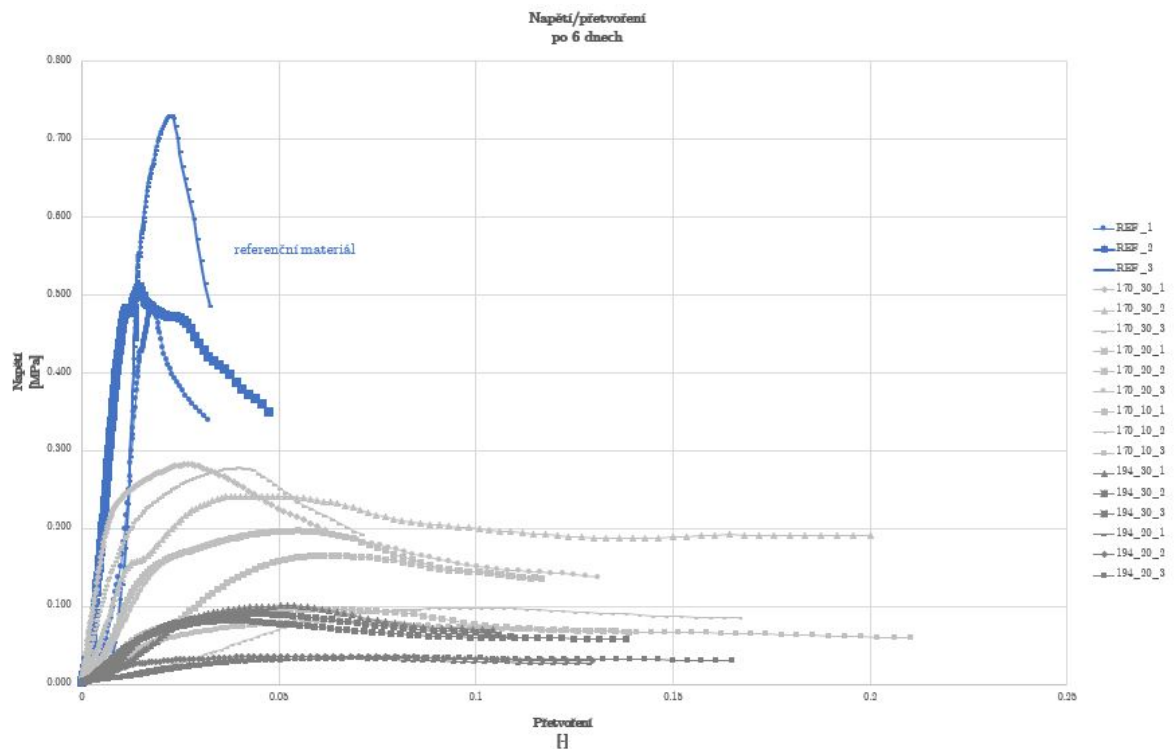
6.5 Vyhodnocení výsledků

6.5.1 REF- referenční materiál Zeo- Therm 1.0

Výsledky po šesti dnech zrání

Jednoosá pevnost v tlaku

Dle výrobce je uváděna pevnost v tlaku po šesti dnech $R_p = 1,5 N/mm^2$ což podle obr. č.32, jak vidno, nebylo dosaženo. Zdůvodněním je fakt, že se mi nepodařilo dohledat, jaký je v referenční směsi použit cement, na geometricky jakých vzorcích je garantovaná pevnost (uváděná výrobcem) získána, ani jaká je zvolena štíhlost (λ). V mém případě jsem všech vzorků tamponáže zvolila štíhlost $\lambda = 1$



Obrázek 26: Pevnost v tlaku po šesti dnech referenčního materiálu ve srovnání s alternativními tamponážními směsmi

Tabulka 17: Maximální dosažené hodnoty pevnosti referenčního vzorku po šesti dnech

	1	2	3	Ø hodnot
	[N]	[N]	[N]	[N]
REF	1894	1991	2835	2240

Tabulka 18: Objemové hmotnosti referenčního vzorku po šesti dnech

	1	2	3	∅ hodnot
	$[kg/m^3]$	$[kg/m^3]$	$[kg/m^3]$	$[kg/m^3]$
<i>REF</i>	1589	1556	1535	1560

Tepelné vlastnosti

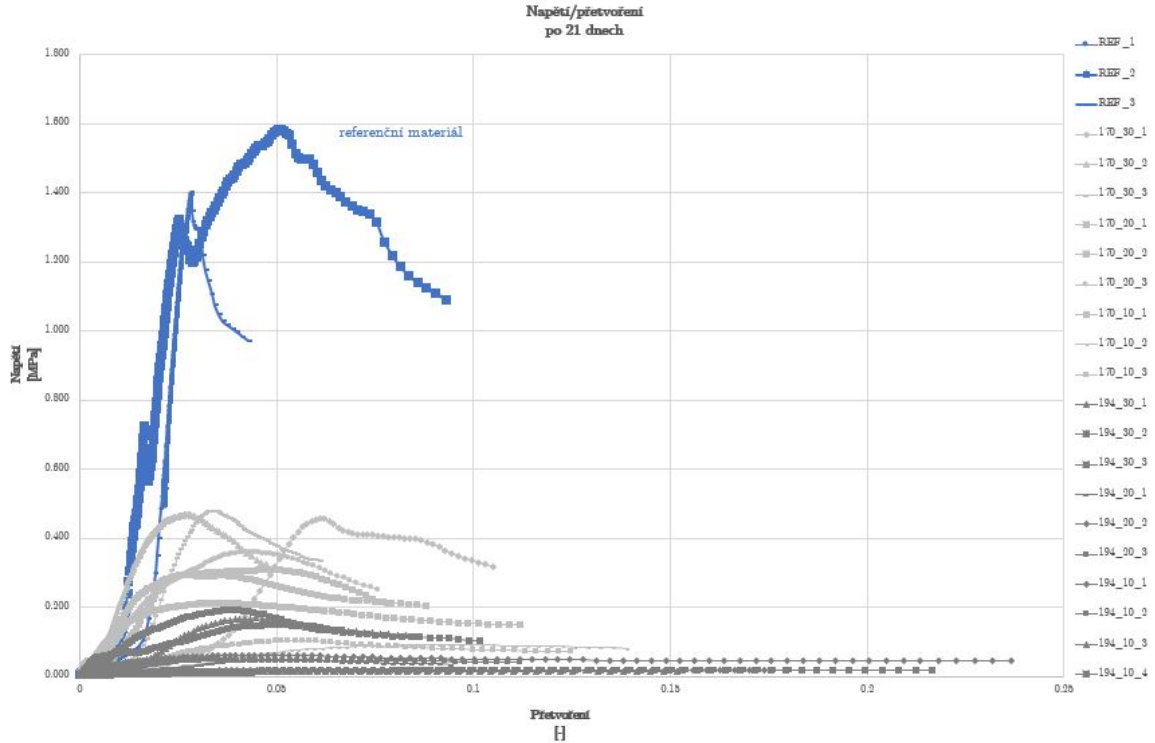
Tepelná vodivost je výrobcem uváděna jako $\lambda > 1.2W//M \cdot K$, což také (zatím) po šesti dnech zrání nebylo dosaženo (viz tab. č.19).

Tabulka 19: Výsledky průměrných hodnot tepelných vlastností referenčního vzorku

	∅ součinitel tepelné vodivosti $\lambda [W/M \cdot K]$	∅ objemová tepelná kapacita $c_p [MJ/m^3 \cdot K]$
<i>REF</i>	1.60	1.61

Výsledky po dvaceti-jedna dnech zrání

Jednoosá pevnost v tlaku



Obrázek 27: Pevnost v tlaku po dvaceti-jedna dnech referenčního materiálu ve srovnání s alternativními tamponážními směsmi

Tabulka 20: Maximální dosažené hodnoty pevnosti referenčního vzorku po dvaceti-jedna dnech

	1	2	3	Ø hodnot
	[N]	[N]	[N]	[N]
REF	70	6308	5624	5966

Tabulka 21: Objemové hmotnosti referenčního vzorku po dvaceti-jedna dnech

	1	2	3	Ø hodnot
	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]
REF	1487	1557	1526	1523

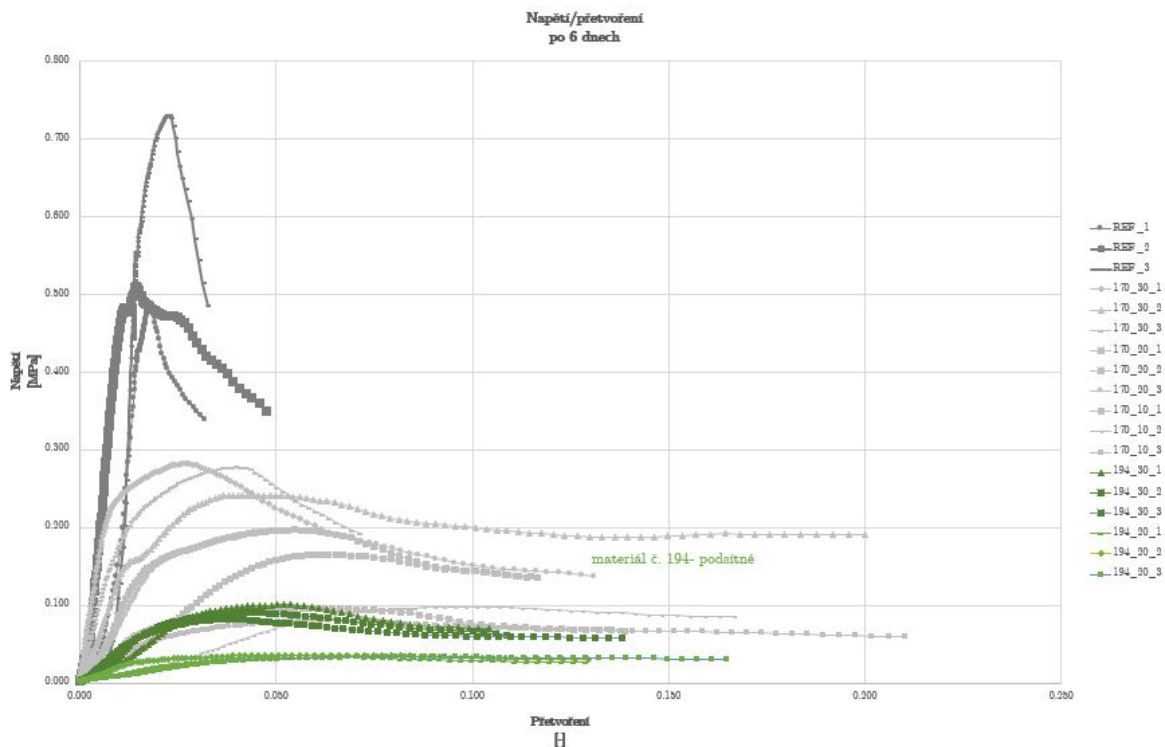
Zkoušení prvního vzorku sady není věrohodné. Nepočítala jsem ho tedy do průměrné hodnoty v tab. č.20. Nízké hodnoty pevnosti nejspíše vzorek dosáhl rozdílným zráním od vzorků v této sadě (vznik trhlin). Jedná se o vzorek, který dozrával po oddělení vzorku k předešlému měření. Tato část byla vrácena zpět do trubky na další zrání. Nejedná se o vzorek vyhotovený z celé trubky, jak je tomu u zbylých dvou vzorků v této sadě testování.

6.5.2 194- podsítné

Výsledky po šesti dnech zrání

Jednoosá pevnost v tlaku

Z důvodu nedostatečného vyzrání vzorku s 10%CEM nebylo možné provedení zkoušky pevnosti v tlaku.



Obrázek 28: Pevnost v tlaku po šesti dnech materiálu 194_{podsítné} ve srovnání s ostatními zkoušenými tamponážními směsmi

Tabulka 22: Maximální dosažené hodnoty pevnosti vzorku 194_{podsítné} po šesti dnech

194 _{podsítné}	1	2	3	Ø hodnot
	[N]	[N]	[N]	[N]
30%CEM	388	350	232	323
20%CEM	129	140	133	134
10%CEM	-	-	-	-

Tabulka 23: Objemové hmotnosti vzorku 194_{podsitné} po šesti dnech

194 _{podsitné}	1 [kg/m ³]	2 [kg/m ³]	3 [kg/m ³]	4 [kg/m ³]	Ø hodnot [kg/m ³]
30%CEM	1274	1378	1342		1365
20%CEM	1261	1286	1259		1268
10%CEM	-	-	-	-	-

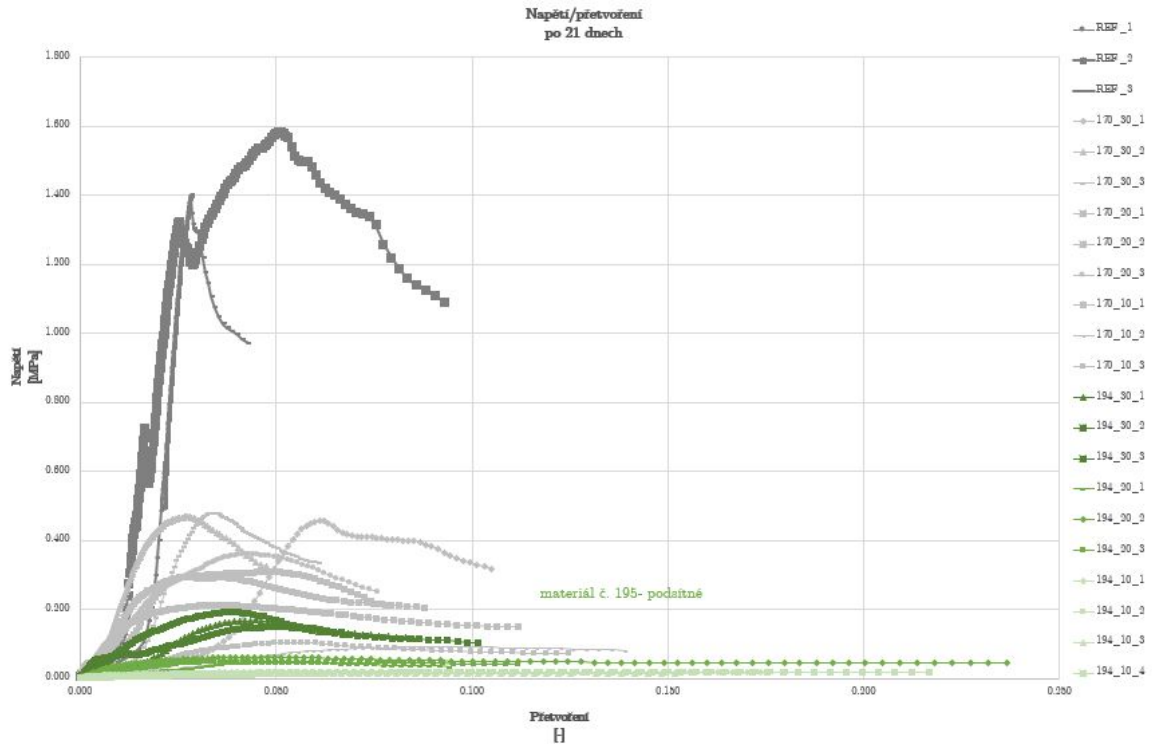
Tepelné vlastnosti

Tabulka 24: Výsledky průměrných hodnot tepelných vlastností vzorku 194_{podsitné}

194 _{podsitné}	Ø součinitel tepelné vodivosti λ [W/M · K]	Ø objemová tepelná kapacita c_p [MJ/m ³ · K]
30%CEM	0.89	1.68
20%CEM	0.98	1.66
10%CEM	0.88	2.05

Výsledky po dvaceti-jedna dnech zrání

Jednoosá pevnost v tlaku



Obrázek 29: Pevnost v tlaku po dvaceti-jedna dnech materiálu 194_{podsítné} ve srovnání s ostatními zkoušenými tamponážními směsi

Tabulka 25: Maximální dosažené hodnoty pevnosti vzorku 194_{podsítné} po dvaceti-jedna dnech

194 _{podsítné}	1	2	3	4	Ø hodnot
	[N]	[N]	[N]	[N]	[N]
30%CEM	650	742	583		658
20%CEM	193	233	180		202
10%CEM	75	73	62	69	70

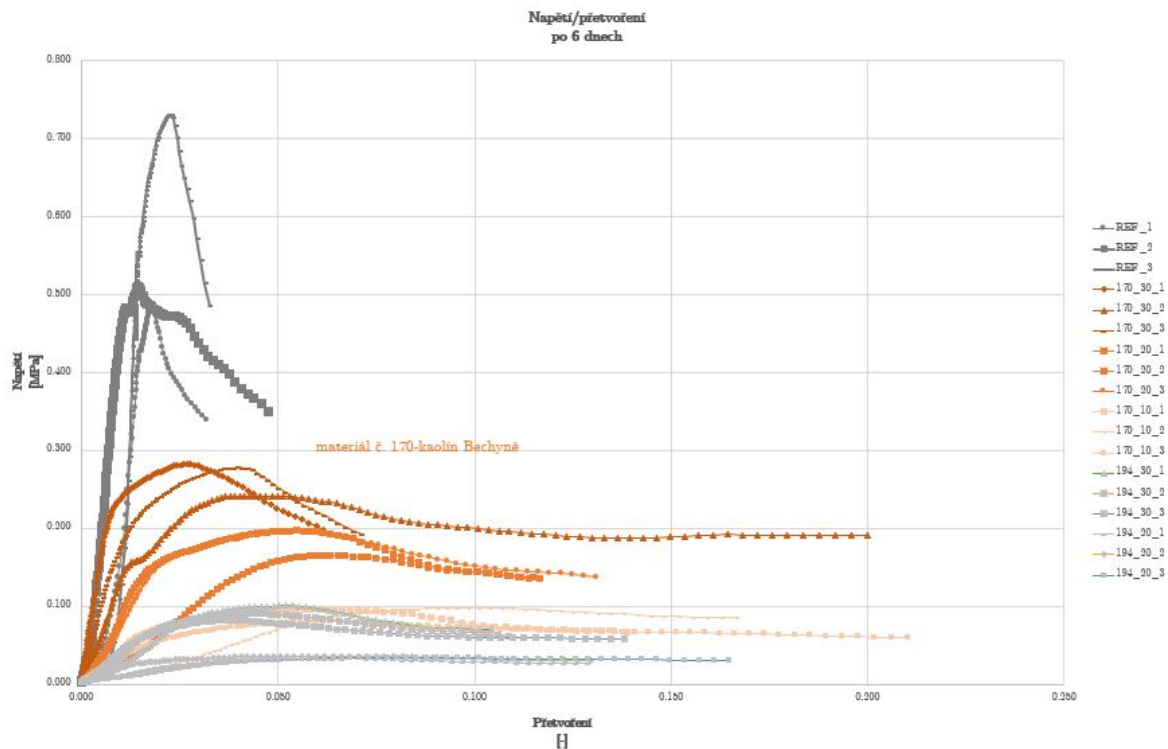
Tabulka 26: Objemové hmotnosti vzorku 194_{podsítné} po dvaceti-jedna dnech

194 _{podsítné}	1	2	3	4	Ø hodnot
	[kg/m³]	[kg/m³]	[kg/m³]	[kg/m³]	[kg/m³]
30%CEM	1350	1365	1377		1364
20%CEM	1242	1295	1257		1265
10%CEM	1241	1248	1244	1224	1239

6.5.3 170- kaolín Bechyně

Výsledky po šesti dnech zrání

Jednoosá pevnost v tlaku



Obrázek 30: Pevnost v tlaku po šesti dnech materiálu 170_{kaolín Bechyně} ve srovnání s ostatními zkoušenými tamponážními směsmi

Tabulka 27: Maximální dosažené hodnoty pevnosti vzorku 170_{kaolín Bechyně} po šesti dnech

170 _{kaolín Bechyně}	1	2	3	Ø hodnot
	[N]	[N]	[N]	[N]
30%CEM	1088	930	1071	1030
20%CEM	636	758	756	717
10%CEM	369	377	309	352



Obrázek 31: materiál 170_{kaolín Bechyně} po vyjmutí z lisu zkoušky na tlakovou pevnost

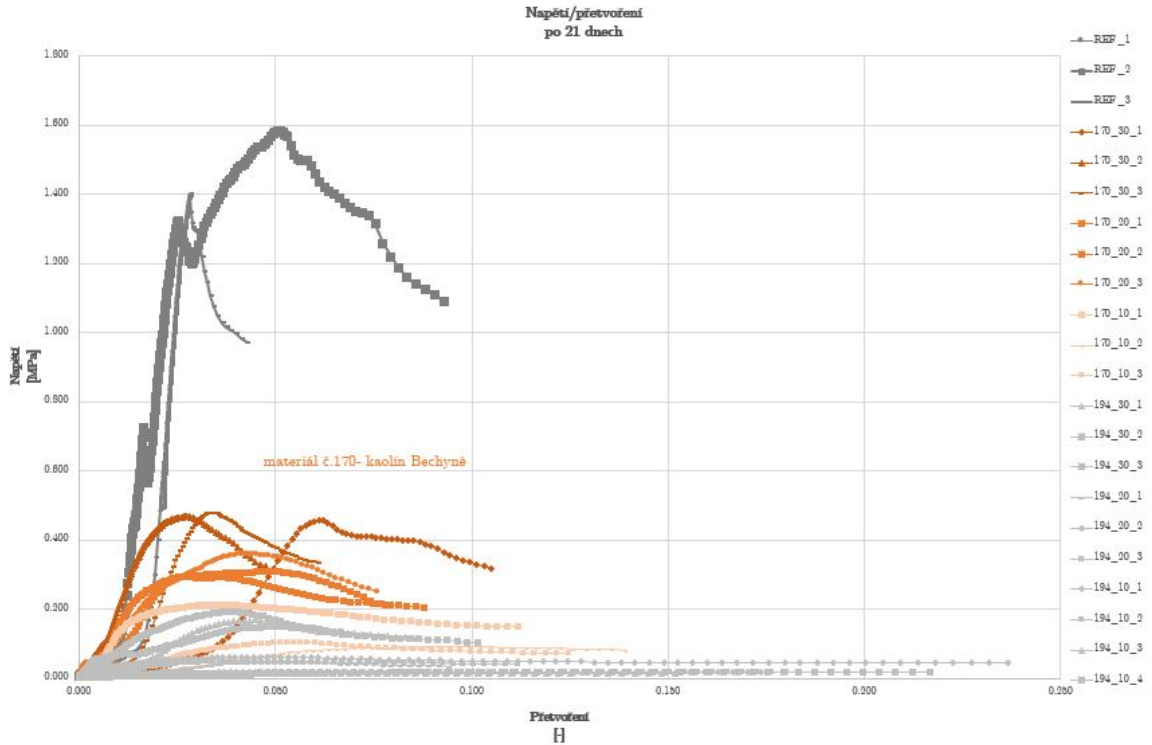
Tepelné vlastnosti

Tabulka 28: Výsledky průměrných hodnot tepelných vlastností vzorku 170_{kaolín Bechyně}

170 _{kaolín Bechyně}	Ø součinitel tepelné vodivosti λ [W/M · K]	Ø objemová tepelná kapacita c_p [MJ/m ³ · K]
30%CEM	1.11	1.79
20%CEM	1.23	1.65
10%CEM	1.25	2.23

Výsledky po dvaceti-jedna dnech zrání

Jednoosá pevnost v tlaku



Obrázek 32: Pevnost v tlaku po dvaceti-jedna dnech materiálu 170_{kaolín Bechyně} ve srovnání s ostatními zkušebními tamponážními směsmi

Tabulka 29: Maximální dosažené hodnoty pevnosti vzorku 170_{kaolín Bechyně} po dvaceti-jedna dnech

170 _{kaolín Bechyně}	1	2	3	Ø hodnot
	[N]	[N]	[N]	[N]
30%CEM	1782	1849	1867	1833
20%CEM	1206	1150	1403	1253
10%CEM	822	360	397	526

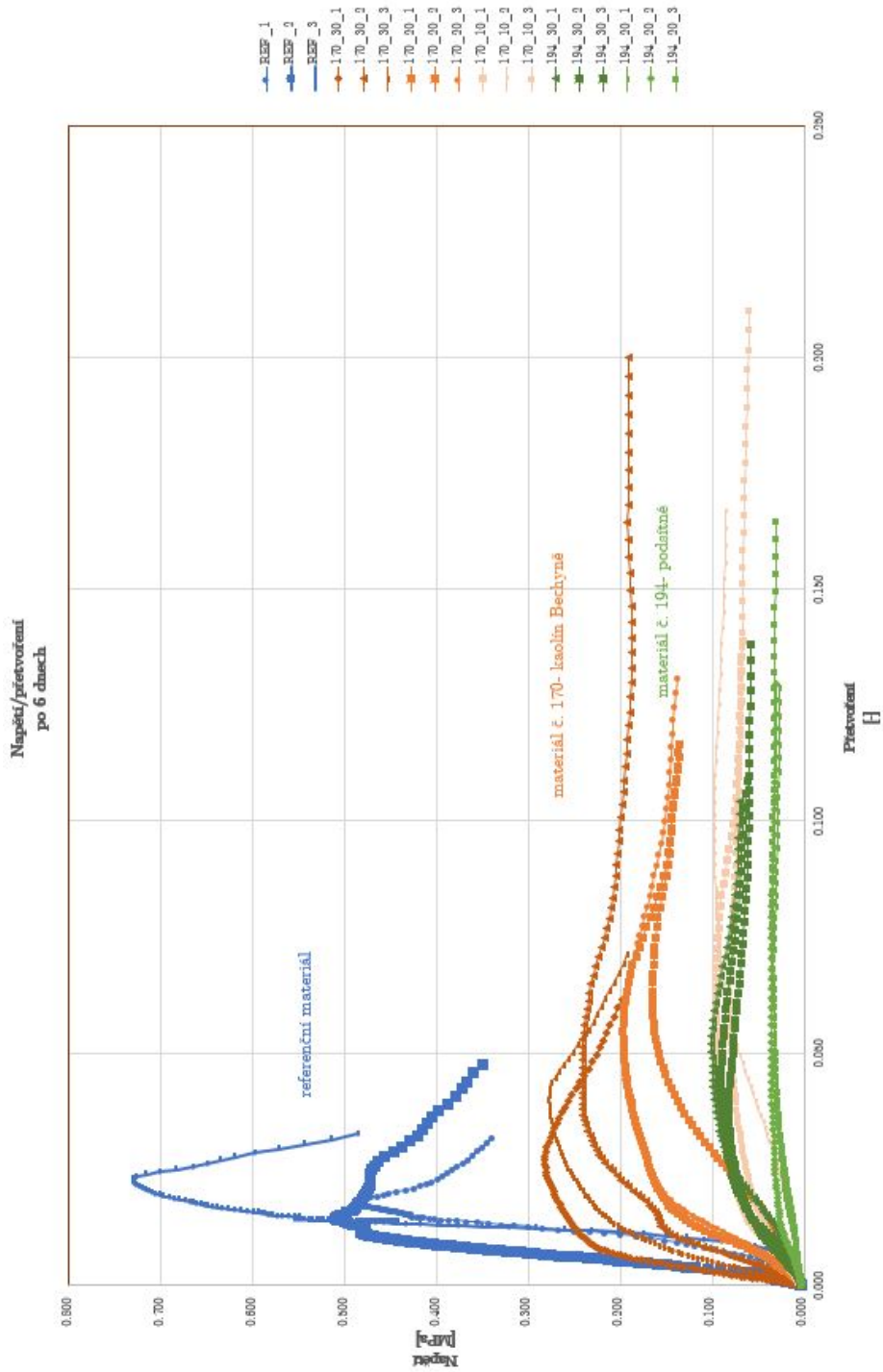
Tabulka 30: Objemové hmotnosti vzorku 170_{kaolín Bechyně} po dvaceti-jedna dnech

170 _{kaolín Bechyně}	1	2	3	Ø hodnot
	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]
30%CEM	1469	1497	1507	1491
20%CEM	1506	1521	1503	1510
10%CEM	1525	1512	1494	1510

6.6 Porovnání výsledků

6.6.1 Porovnání výsledků po šesti dnech zrání

Jednoosá pevnost v tlaku



Obrázek 33: Pevnost v tlaku po šesti dnech všech zkoušených materiálů

Pro přehlednost jsem vytvořila souhrnnou tabulku (viz tab. č.31), jak narůstá pevnost v závislosti na množství cementu.

Tabulka 31: Poměry nárůstů pevnosti v závislosti na množství cementu

	10 → 20 [%]	10 → 20 [%]
194 _{podsítné}	-	142
170 _{kaolín Bechyně}	104	44

Tepelné vlastnosti

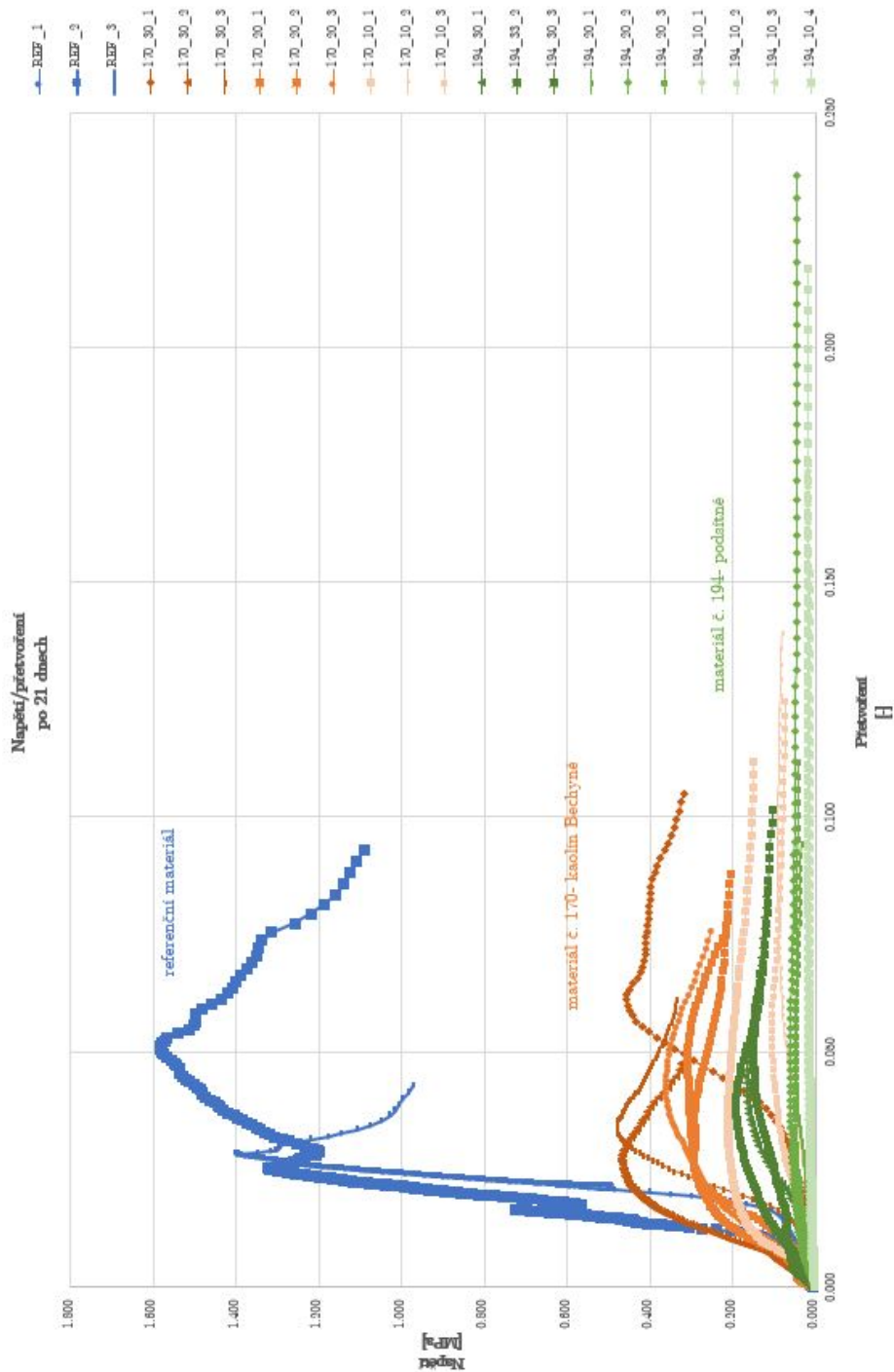
K porovnání uvádím souhrnnou tabulku výsledků (viz tab. č.32).

Tabulka 32: Souhrnná tabulka průměrných hodnot tepelných vlastností záměsí

	Ø součinitel tepelné vodivosti λ [W/M · K]	Ø objemová tepelná kapacita c_p [MJ/m ³ · K]
REF	0.84	1.61
194 _{podsítné} 30%CEM	0.89	1.68
20%CEM	0.98	1.66
10%CEM	0.88	2.05
170 _{kaolín Bechyně} 30%CEM	1.11	1.79
20%CEM	1.23	1.65
10%CEM	1.25	2.23

6.6.2 Porovnání výsledků po dvaceti-jedna dnech zrání

Jednoosá pevnost v tlaku



Obrázek 34: Pevnost v tlaku po šesti dnech všech zkoušených materiálů

Tabulka 33: Souhrn průměrných objemových hmotností po dvaceti-jedna dnech zrání

	\emptyset objemová hmotnost ρ [kg/m^3]
<i>REF</i>	1523
194 _{podšítné} 30%CEM	1364
20%CEM	1265
10%CEM	1239
170 _{kaolín Bechyně} 30%CEM	1491
20%CEM	1510
10%CEM	1510

Tabulka 34: Poměry nárůstů pevnosti v závislosti na množství cementu

	10 → 20 [%]	10 → 20 [%]
194 _{podšítné}	189	226
170 _{kaolín Bechyně}	138	46

6.7 Popis a příprava vzorků přidáním dalších aditiv a s rozdílném mísení záměsi

Z předchozích výsledků jsem vybrala jednoho zástupce, abych pro představu zjistila vliv přidávání aditiv do směsí. Byla vybrána záměs 194_{podsítné} + 20%CEM pro jeho plastičtější chování. Všechny náležitosti pro namíchání této směsi zůstaly stejné, jak tomu bylo v předešlých případech. S tím rozdílem, že do takto hotové záměsi se poté přimíchalo ještě 5% (z hmotnosti odpadního jílu) grafitu (viz tab. č.35). Pro další popis volím označení: 194 + 20%CEM + 5%grafit. Celým cílem tohoto pokusu bylo zjištění, do jaké míry ovlivní přidání grafitu vlastnosti záměsi. Především pak tepelné vlastnosti. Záměs jsem následně (prozatím- z časových důvodů) zkoušela pouze po šesti dnech doby zrání.

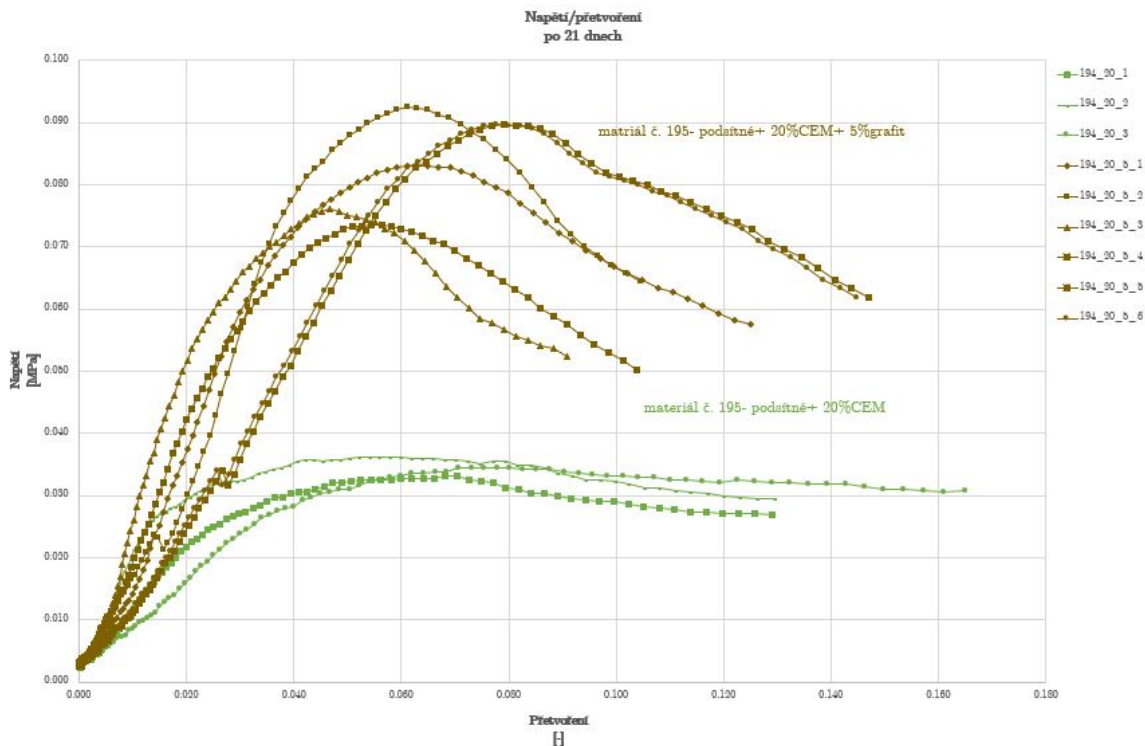
Tabulka 35: Receptura 194 + 20%CEM + 5%grafit

	množství jílu [g]	množství cementu [g]	množství vody [ml]	množství grafitu [g]	vizuální konzistence	produkt [g]
194 + 20%CEM + 5%grafit	1050	210	2000	53	dobrá zpracovatelnost obtížnější zhutnitelnost	~ 330

6.7.1 Porovnání výsledků záměsi s grafitem po šesti dnech zrání

Jednoosá pevnost v tlaku

Z obr. č.35 je patrný rozdíl pevností v tlaku vzorku s přidáním grafitem a bez grafitu.



Obrázek 35: Pevnost v tlaku po šesti dnech materiálu 194 + 20%CEM + 5%grafit ve srovnání s 194 + 20%CEM

Tabulka 36: Maximální dosažené hodnoty pevnosti vzorků 194 + 20%CEM po šesti dnech

194 + 20%CEM	1	2	3	4	5	6	Ø hodnot
	[N]	[N]	[N]	[N]	[N]	[N]	[N]
	129	140	133	-	-	-	134
+ 5%grafit	322	360	295	349	286	263	313

Tabulka 37: Objemové hmotnosti vzorků 194 + 20%CEM po šesti dnech

194 + 20%CEM	1	2	3	4	5	6	Ø hodnot
	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]
	129	140	133	-	-	-	134
+ 5%grafit	1313	1299	1322	1318	1325	1284	1310

Tabulka 38: Poměr nárůstu pevnosti v závislosti na přidání grafitu

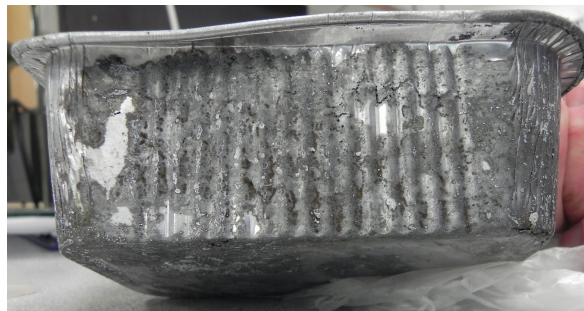
	194 + 20%CEM → +5%grafit
	[%]
194 + 20%CEM + 5%grafit	133

Tepelné vlastnosti

Pokus, jehož účelem bylo zjištění, jak přidání grafitu zvýší tepelné vlastnosti záměsi, jak je patrné z tab. č.39 nelze považovat za úspěšný. Test byl 2x proveden, výsledky obou testů se shodují. Zdůvodněním může být příliš rychlé vysychání s nedostatečným ošetřováním zrající záměsi, a tím zapříčeno i vznik trhlin uvnitř vzorku. Dalším ovlivňujícím činitelem může být i mě neznámá chemická reakce grafitu s hliníkovou miskou (viz obr. č.36), ve které vzorek zrál.

Tabulka 39: Výsledné průměrné hodnoty tepelných vlastností vzorku $194 + 20\%CEM + 5\%grafit$

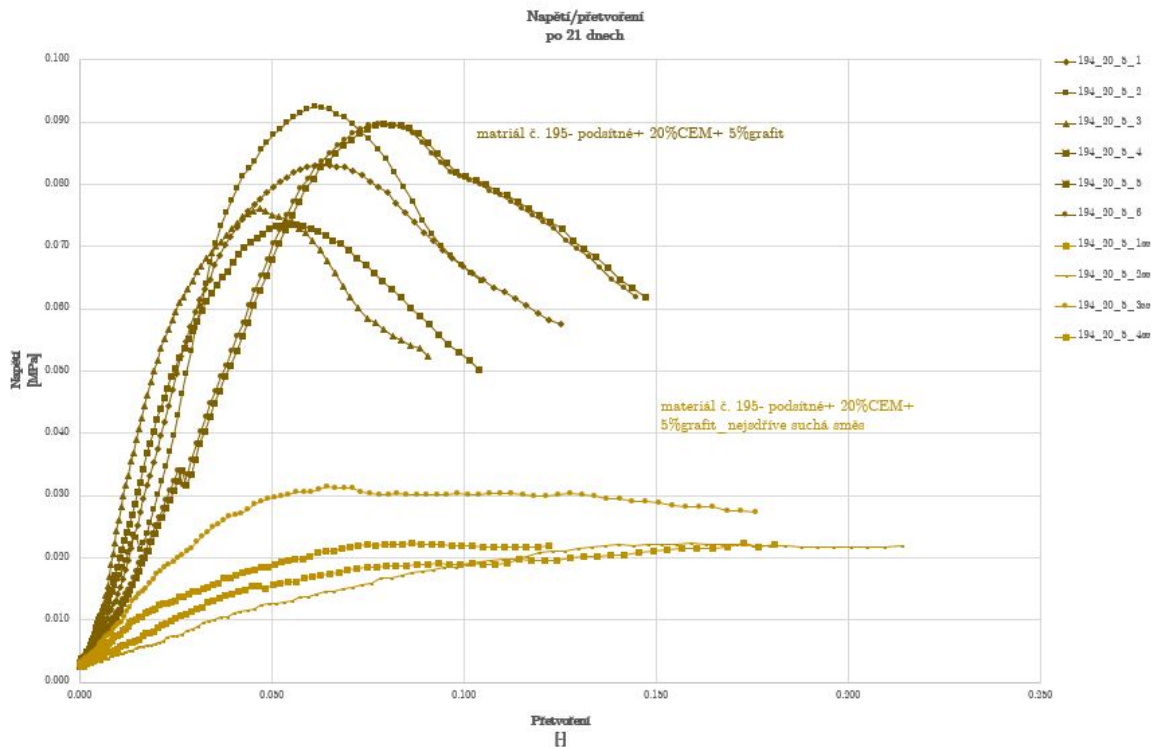
$194 + 20\%CEM + 5\%grafit$	Ø součinitel tepelné vodivosti $\lambda [W/M \cdot K]$	Ø objemová tepelná kapacita $c_p [MJ/m^3 \cdot K]$
	0.91	2.01



Obrázek 36: Zkoušený vzorek $194 + 20\%CEM + 5\%grafit$ ve zkorodované hliníkové misce

Rozdílný postup mísení záměsi

Pro představu jsem provedla i pokus, jaký vliv bude mít pořadí přidávání jednotlivých složek do záměsi. V tomto případě byla záměs znovu namíchána podle stejné receptury, pouze s rozdílem, že jsem nejdříve smíchala všechny suché složky a až poté přidala vodu. Konzistence výsledné záměsi byla velmi rozdílná od předešlých záměsí dřívějšího postupu. Záměs byla konzistenčně velmi řídká. Konzistencí byla srovnatelná se záměsí referenčního materiálu. Na obr. č.37 lze vidět rozdíl v pevnosti po šesti dnech u $194 + 20\%CEM + 5\%grafit$ s rozdílným postupem mísení záměsi.



Obrázek 37: Pevnost v tlaku po šesti dnech materiálu 194 + 20%CEM + 5%grafit s rozdílným postupem míchání záměsi

Tabulka 40: Maximální dosažené hodnoty pevnosti vzorků 194 + 20%CEM + 5%grafit s rozdílným postupem záměsi po šesti dnech

	1	2	3	4	5	6	Ø hodnot
	[N]	[N]	[N]	[N]	[N]	[N]	[N]
194 + 20%CEM +5%grafit	322	360	295	349	286	263	313
194 + 20%CEM +5%grafit rozdl	87	110	123	87	-	-	102

Tabulka 41: Objemové hmotnosti vzorků 194 + 20%CEM + 5%grafit s rozdílným postupem záměsi po šesti dnech

	1	2	3	4	5	6	Ø hodnot
	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]
194 + 20%CEM +5%grafit	1313	1299	1322	1318	1325	1284	1310
194 + 20%CEM +5%grafit rozdl	1248	1288	1337	1317	-	-	1298

Tabulka 42: Poměr nárůstu pevnosti vzorků $194 + 20\%CEM + 5\%grafit$ s rozdílným postupem záměsi

	$194 + 20\%CEM$ x $194 + 20\%CEM$ $+5\%grafit$ $+5\%grafit$ [%]
$194 + 20\%CEM + 5\%grafit$	207

6.8 Celkové zhodnocení a závěr druhé části

Závěrem druhé části (v tuto chvíli) není možné učít, která směs je nejvhodnější. Každá ze směsí vykazuje výraznou závislost svých vlastností na čase. Zde uvádím přehled (viz tab. č.43 a tab. č.44).

Tabulka 43: Poměry nárůstů pevnosti v čase

	6 → 21 dnů [%]
<i>REF</i>	166
$194_{\text{podsítné}}$	
30%CEM	104
20%CEM	51
10%CEM	-
$170_{\text{kaolín Bechyně}}$	
30%CEM	78
20%CEM	75
10%CEM	50

Tabulka 44: Změny objemové hmotnosti v čase

	6 → 21 dnů [%]
<i>REF</i>	2.43
$194_{\text{podsítné}}$	
30%CEM	0.07
20%CEM	0.24
10%CEM	-

Kvůli nedostatku dat z konečné fáze měření uvádím v následující kapitole č. 7 návrh postupu dalších prací, aby bylo možné tyto zkoušky doplnit a výsledky porovnat.

U referenčního materiálu jsem se k hodnotám, které výrobce uvádí, nedostala. Za alternativní směsi bych spíše považovala směsi s materiálem $170_{\text{kaolín Bechyně}}$.

Jedním z nejdůležitějších kritérií byla tepelná vodivost zálivky. Toto kritérium nejlépe splnil právě materiál $170_{\text{kaolín Bechyně}}$. Jeho výsledky tepelné vodivosti teoreticky odpovídají předem stanoveným kritériím. Následně lze počítat i s dalším nárůstem těchto hodnot. Například s přidáním aditiv v následujících pokusech.

Diskuzi se ale nebrání ani směsi s materiálem $194_{\text{podsítné}}$, který sice dosáhl hodnot tepelné vodivosti nižších (oproti $170_{\text{kaolín Bechyně}}$), ale lze předpokládat, že hodnot tohoto kritéria dosáhne.

7 Návrh postupu dalších prací

7.1 Návrh prací

Pro bližší poznání vlastností alternativních směsí by se pozdější práce měly zaměřit na vhodnou volbu objemových hmotností, aby směs co nejlépe splnila kritéria tamponážních směsí. Dále zpracovatelnost, zhutnitelnost, celkovou homogenitu. Pro tyto účely níže předkládám návrh modelu.

Další plán prací by mohl být následující:

- Doměření součinitelů hydraulických vodivostí
- Doměření tepelných vlastností
- Průzkum nejvhodnější volby objemových hmotností, s tím spojenou zpracovatelnost a zhutnitelnost vhodnou pro zálivku do vrtů- zkouška Marschova trychtýře
- Zaměřit se důsledněji ošetřování směsí v průběhu zrání
- Jak důležitá jsou kritéria pevnosti pro zálivku vrtu
- Rozvaha volby jiného referenčního materiálu
- Opakování zkoušky s přidáním aditiv zlepšujících vlastnosti směsi
- Bližší projednání ekonomické stránky- doprava, dostupnost, efektivita
- Testování na modelu
- Následné testování na skutečném vrtu

7.2 Návrh modelu pro bližší testování

Návrh modelu předchází zkonstruování skutečného modelu pro další zkoumání parametrů směsi. Jedná se především o zmiňovanou homogenitu, zpracovatelnost a gravitační hutnitelnost po celé délce (hloubce) modelu.

Navrhuji simulovat zrání modelu jako v předchozích případech, a to v prostředí štoly. Modely slouží k ověření získaných parametrů směsí.

- A) PPR trubka $\emptyset 70 \text{ mm}$ s $h = \text{cca } 2 \text{ m}$, kde následně po vytvrnutí bude model nařezán na několik dílů, které pak budou zkoušeny na objemovou hmotnost po výšce, tepelnou vodivost a pevnost v tlaku.
- B) KGEM trubka $\emptyset 110 - 160 \text{ mm}$; $h = \text{cca } 3 \text{ m}$, v druhém případě bude model rozměrově více odpovídat skutečnému vrtu pro tepelná čerpadla. Do vnější trubky většího průměru budou vloženy trubky menších průměrů pro simulaci kolektoru ve vrtu, aby bylo umožněno optimalizovat zatékavost směsi. Po zalití a vytvrnutí směsi v modelu se bude především testovat objemová hmotnost po výšce.

8 Závěr

Hlavním cílem této práce bylo studium vlastností odpadních jíílů a jejich a využitelností do tamponážních směsí vrtů tepelných čerpadel.

V první části práce jsem u získaných odpadních jíílů testovala jejich vlastnosti pomocí laboratorních zkoušek (zkouška hmotnostní vlhkosti, meze tekutosti kuželovou metodou, meze plasticity, swell indexu, zdánlivé hustoty pevných částic, hydraulické vodivosti, síťový rozbor a hustoměrná zkouška). Musela jsem se tyto laboratorní zkoušky naučit realizovat a pochopit jejich podstatu, především pro zaručení správnosti výsledků, které jsem následně vyhodnocovala.

V druhé části práce jsem vycházela z již vyhodnocených vlastností zkoumaných jíílů. Na základě shrnutí kritérií pro na trhu dostupné tamponážní směsi jsem vybrala vhodné kandidáty z řad testovaných odpadních jíílů, se kterými by bylo možné těchto kritériálních hodnot dosáhnout. Taktéž jsem vybrala jednoho ze zástupců průmyslově vyráběných směsí, kterého jsem dále využila jako referenční materiál. Tento materiál a mnou míchané alternativní směsi jsem podrobila dalším (pro mě novým) zkouškám (zkouška jednoosé pevnosti v tlaku, zkouška tepelné vodivosti a objemové hmotnosti). Jejich výsledky jsem mezi sebou porovnávala a zjišťovala tak potenciál těchto alternativních směsí vzhledem k již vyráběným směsím. Tím i k recyklaci těchto odpadních materiálů. U připravovaných záměsí jsme se zabývala i vlivem rozdílného postupu mísení a přidávání aditiv na konečné vlastnosti směsí.

Po celý průběh těchto prací bylo nutné dodržovat pevně daných časových intervalů, ve kterých byly vzorky zkoumány.

Dílní závěry pro každou z částí byly prezentovány v podkapitolách č. 5.6 a č. 6.8. Obě podkapitoly obsahují řadu výsledků a závěrů. Považuji však za vhodné zmínit následující poznatky.

U dalšího testování časových závislostí směsí předpokládám, že všechny směsi dosáhnou kritéria tepelné vodivosti, která je podle mého názoru pro tamponážní směsi elementární.

Dalším diskutabilním bodem by mohla být volba jiného referenčního materiálu, jehož kritériálních hodnot bude snazší dosáhnout.

Důležitým přínosem pro mne byla možnost spolupráce i vedení techniků a laborantek, kteří mi byli nápomocni především při obsluze strojů a jiných zařízení laboratoře.

Použitá literatura

- [1] Tepelná čerpadla země - voda — Vytápění tepelným čerpadlem. *EKOMPLEX instalatéri* [online]. Ostrava - Moravská Ostrava: Topenáři EKOMPLEX, © 2019, [cit.2019-05-25]. Dostupné z: <<http://www.topeni-topenari.eu/topeni/topidla-alternativni/tepelna-cerpadla/zeme-voda.php>>
- [2] ČSN EN ISO 17892-1 (721007). Geotechnický průzkum a zkoušení - Laboratorní zkoušky zemin: Část 1: *Stanovení vlhkosti zemin*. Český normalizační institut, 2005.
- [3] ČSN CEN ISO/TS 17892-2 (721007). Geotechnický průzkum a zkoušení - Laboratorní zkoušky zemin: Část 2: *Stanovení objemové hmotnosti jemnozrnných zemin*. Český normalizační institut, 2005.
- [4] ČSN CEN ISO/TS 17892-12 (721007) [kat: 72635]. Geotechnický průzkum a zkoušení - Laboratorní zkoušky zemin: Část 12: *Stanovení meze tekutosti a meze plasticity*. Český normalizační institut, 2018.
- [5] Základní vlastnosti zemin a klasifikace zemin. *VŠB- TU Ostrava, Katedra geotechniky a podzemního stavitelství* [online]. Ostrava: VŠB- TU Ostrava, 2012, [cit.2019-05-]. Dostupné z: <<http://www.geotechnici.cz/wp-content/uploads/2012/08/ZS-cviko-01.pdf>>
- [6] Popis a klasifikace zemin. *NATUR CUNI* [online]. Praha: NATUR CUNI, 2013, [cit.2019-05-25]. Dostupné z: <http://labmz1.natur.cuni.cz/~bhc/s/mz1/mz1_1_www.pdf>
- [7] ČSN 73 6133 (736133) [kat: 52174]. *Navrhování a provádění zemního tělesa pozemních komunikací*. Český normalizační institut, 2010.
- [8] ČSN 73 1001 (731001) [kat: 31060]. Eurokód 7: Navrhování geotechnických konstrukcí: Část 1: *Obecná pravidla*. Český normalizační institut, 2006.
- [9] ASTM, D. *Standard test method for swell index of clay mineral component of geosynthetic clay liners*. D5890-06, 2006.

- [10] ČSN EN ISO 17892-3 (721007). Geotechnický průzkum a zkoušení - Laboratorní zkoušky zemin: Část 3: *Stanovení zdánlivé hustoty pevných částic*. Český normalizační institut, 2016.
- [11] Pyknometr podle Gay - Lussaca 25 ml. *MANEKO laboratorní přístroje a technika* [online]. © 2005-2007 [cit.2019-05-]. Dostupné z: <<http://www.maneko.cz/pyknometr-podle-gay-lussaca-25-ml/>>
- [12] ČSN CEN ISO/TS 17892-11 (721007) Geotechnický průzkum a zkoušení - Laboratorní zkoušky zemin: Část 11: *Stanovení propustnosti zemin při konstantním a proměnném spádu*. Český normalizační institut, 2005.
- [13] ČSN EN ISO 17892-4 (721007) [kat: 501649]. Geotechnický průzkum a zkoušení - Laboratorní zkoušky zemin: Část 4: *Stanovení zrnitosti zemin*. Český normalizační institut, 2017.
- [14] ČSN 72 7306 (727306). *Stanovení součinitele tepelné vodivosti stavebních materiálů a výrobků*. Český normalizační institut, 1995.
- [15] ČSN CEN ISO/TS 17892-7 (721007) [kat: 72630]. Geotechnický průzkum a zkoušení - Laboratorní zkoušky zemin: Část 7: *Zkouška pevnosti v prostém tlaku*. Český normalizační institut, 2018.
- [16] HAUSMANNOVÁ, Lucie. *Vliv sitícího tlaku na hydraulickou vodivost a bobtnací tlak českých bentonitů*: disertační práce = *The influence of water pressure on the hydraulic conductivity and swelling pressure of Czech bentonites*. Praha, 2017. Disertace(PhD.). ČVUT, Stavební fakulta, Centrum experimentální geotechniky, Praha. Vedoucí práce Radek Vašíček.
- [17] Vlastnosti zemin a hornin. *Centrum experimentální geotechniky* [online]. Praha: ČVUT, 2014, [cit. 2019-05-26]. Dostupné z: <<https://ceg.fsv.cvut.cz/vyuka/podklady-pro-studenty/definice-parametru>>
- [18] zeo-therm 1.0 Für das Verfüllen für Erdwärmesonden. *HAURI* [online]. 5.10.2016, [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <https://www.kuechler-technik.ch/fileadmin/Redaktion/Produkteblaetter/Moertel/3.22_ZEO_THERM_1.0.pdf>

- [19] Princip funkce tepelného čerpadla. *Teplo ze země* [online]. © 2013-2019, [cit.2019-05-]. Dostupné z: <<http://www.teplozezeme.cz/princip-funkce-tepelneho-cerpadla/>>
- [20] Injektážní směsi pro vrty tepelných čerpadel. *EKG Elektronický katalog geotermie* [online]. Stráž nad Nisou- Liberec: GEROTop spol. s r.o., [cit.2019-05-]. Dostupné z: <<https://www.ekg-gerotop.cz/injektazni-smesi#!/injektazni-smesi>>
- [21] Injektážní směsi. *Geocore* [online]. Praha: GeoCore s.r.o., [cit.2019-05-]. Dostupné z: <<http://www.e-shop.geocore.cz/injektazni-smesi/13569/>>
- [22] Primární okruh- ceník. *GE-TRA síla pod povrchem* [online]. Liberec: GE-TRA s.r.o, 2019, [cit.2019-03-18]. Dostupné z: <https://www.ge-tra.cz/data/u_soubory/1/cenik_ge_tra_primarni_okruh_1_2018_kc.pdf>
- [23] Výplně vrtů tepelných čerpadel. *ARCHIweb* [online]. Praha: Archiweb, s.r.o., © 1997-2019, [cit.2019-05-01]. Dostupné z:<<https://www.archiweb.cz/en/n/press/vyplne-vrtu-tepelnych-cerpadel>>
- [24] Balený portlandský směsný cement CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R. *Českomoravský cement* [online]. Českomoravský cement, a.s., ©, [cit.2019-04-11]. Dostupné z: <<https://www.heidelbergcement.cz/cs/cement/baleny-cement/cemiibmsl1325r>>

Seznam obrázků

1	Tepelné čerpadlo se zemním vrtem (převzato z: [1])	12
2	Konzistenční meze (převzato z: [5])	17
3	Určování meze tekutosti pomocí penetrace (převzato z: [6])	18
4	Pyknometr 25ml (převzato z: [11])	20
5	Schéma aparaturz pro společné měření hydraulické vodivosti a bobtnacího tlaku	21
6	Prosévací zkouška (převzato z: [6])	24
7	Rozbor zemin- Casagrande- Hustoměr (převzato z: [6])	24
8	Jednoosá pevnost v tlaku (převzato z: [17])	26
9	Kaolín Bechyně	29
10	Podsítné	29
11	Odprašky z filtrů	29
12	Šlika jemná	29
13	Šlika hrubá	29
14	Formy ze slévárny	29
15	W - vlhkost zemin	37
16	W_L - mez tekutosti kuželovou metodou 80g/30°	38
17	W_P - mez plasticity	39
18	SI - swell index	40
19	ρ_S - zdánlivá hustota pevných částic	41
20	k -součinitel hydraulické vodivosti	42
21	σ_{sw} - bobtnací tlak	43
22	Z -zrnitostní křivka	44
23	Zeo- Therm 1.0- 2x 25kg	49
24	Simulace stálého půdního prostředí- zrání vzorků	51
25	Pohled na štolu Josef	52
26	Pevnost v tlaku po šesti dnech referenčního materiálu ve srovnání s alternativními tamponážními směsmi	55
27	Pevnost v tlaku po dvaceti-jedna dnech referenčního materiálu ve srovnání s alternativními tamponážními směsmi	57

28	Pevnost v tlaku po šesti dnech materiálu 194 _{podsitné} ve srovnání s ostatními zkoušenými tamponážními směsmi	59
29	Pevnost v tlaku po dvaceti-jedna dnech materiálu 194 _{podsitné} ve srovnání s ostatními zkoušenými tamponážními směsmi	61
30	Pevnost v tlaku po šesti dnech materiálu 170 _{kaolín Bechyně} ve srovnání s ostatními zkoušenými tamponážními směsmi	62
31	materiál 170 _{kaolín Bechyně} po vyjmutí z lisu zkoušky na tlakovou pevnost	63
32	Pevnost v tlaku po dvaceti-jedna dnech materiálu 170 _{kaolín Bechyně} ve srovnání s ostatními zkoušenými tamponážními směsmi	64
33	Pevnost v tlaku po šesti dnech všech zkoušených materiálů	65
34	Pevnost v tlaku po šesti dnech všech zkoušených materiálů	67
35	Pevnost v tlaku po šesti dnech materiálu 194 + 20% <i>CEM</i> + 5% <i>grafit</i> ve srovnání s 194 + 20% <i>CEM</i>	70
36	Zkoušený vzorek 194 + 20% <i>CEM</i> + 5% <i>grafit</i> ve zkorodované hliníkové misce	71
37	Pevnost v tlaku po šesti dnech materiálu 194 + 20% <i>CEM</i> + 5% <i>grafit</i> s rozdílným postupem míchání záměsi	72

Seznam tabulek

1	Přehled materiálu projektu RECLAY	28
2	W - vlhkost zemin	37
3	W_L - mez tekutosti kuželovou metodou 80g/30°	38
4	W_P - mez plasticity	39
5	SI - swell index	40
6	ρ_S - zdánlivá hustota pevných částic	41
7	k - zdánlivá hustota pevných částic	42
8	Z - zrnitostní rozbor	44
9	Přehled výsledků laboratorních zkoušek	45
10	Z - zrnitostní rozbor	46
11	Přehled výrobců směsí a jejich vlastnosti (převzato z: [20] [21] [22])	47
12	Referenční list ze stránek od výrobce (převzato z: [18])	48
13	Přehled produkce a variability produkovaných odpadních jíílů během roku	50
14	Referenční list na pytli	53
15	Receptura	54
16	Parametry uváděné výrobcem pro cement [24]	54
17	Maximální dosažené hodnoty pevnosti referenčního vzorku po šesti dnech	55
18	Objemové hmotnosti referenčního vzorku po šesti dnech	56
19	Výsledky průměrných hodnot tepelných vlastností referenčního vzorku	56
20	Maximální dosažené hodnoty pevnosti referenčního vzorku po dvaceti-jedna dnech	57
21	Objemové hmotnosti referenčního vzorku po dvaceti-jedna dnech	57
22	Maximální dosažené hodnoty pevnosti vzorku 194 _{podšítné} po šesti dnech	59
23	Objemové hmotnosti vzorku 194 _{podšítné} po šesti dnech	60
24	Výsledky průměrných hodnot tepelných vlastností vzorku 194 _{podšítné}	60
25	Maximální dosažené hodnoty pevnosti vzorku 194 _{podšítné} po dvaceti-jedna dnech	61
26	Objemové hmotnosti vzorku 194 _{podšítné} po dvaceti-jedna dnech	61
27	Maximální dosažené hodnoty pevnosti vzorku 170 _{kaolín Bechyně} po šesti dnech	62
28	Výsledky průměrných hodnot tepelných vlastností vzorku 170 _{kaolín Bechyně}	63

29	Maximální dosažené hodnoty pevnosti vzorku 170 _{kaolín Bechyně} po dvaceti-jedna dnech	64
30	Objemové hmotnosti vzorku 170 _{kaolín Bechyně} po dvaceti-jedna dnech	64
31	Poměry nárůstů pevnosti v závislosti na množství cementu	66
32	Souhrnná tabulka průměrných hodnot tepelných vlastností záměsí	66
33	Souhrn průměrných objemových hmotností po dvaceti-jedna dnech zrání	68
34	Poměry nárůstů pevnosti v závislosti na množství cementu	68
35	Receptura 194 + 20% <i>CEM</i> + 5% <i>grafit</i>	69
36	Maximální dosažené hodnoty pevnosti vzorků 194 + 20% <i>CEM</i> po šesti dnech	70
37	Objemové hmotnosti vzorků 194 + 20% <i>CEM</i> po šesti dnech	70
38	Poměr nárůstu pevnosti v závislosti na přidání grafitu	70
39	Výsledné průměrné hodnoty tepelných vlastností vzorku 194+20% <i>CEM</i> +5% <i>grafit</i>	71
40	Maximální dosažené hodnoty pevnosti vzorků 194+20% <i>CEM</i> +5% <i>grafit</i> s rozdílným postupem záměsí po šesti dnech	72
41	Objemové hmotnosti vzorků 194 + 20% <i>CEM</i> + 5% <i>grafit</i> s rozdílným postupem záměsí po šesti dnech	72
42	Poměr nárůstu pevnosti vzorků 194+20% <i>CEM</i> +5% <i>grafit</i> s rozdílným postupem záměsí	73
43	Poměry nárůstů pevnosti v čase	73
44	Změny objemové hmotnosti v čase	73