



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

K220 – Centrum experimentální geotechniky

Diplomová práce

Příprava a realizace bentonitového těsnění experimentu EPSP

Preparation and realization of the bentonite sealing of the EPSP experiment

Studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby
Vedoucí práce: Ing. Radek Vašíček, Ph.D.

Bc. Jan Vožech

Praha 2015



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Thákurova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

studijní program: Stavební inženýrství
 studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby
 akademický rok: 2014/2015

Jméno a příjmení diplomanta: Bc. Jan Vožech
 Zadávající katedra: K 11220
 Vedoucí diplomové práce: Ing. Radek Vašíček, Ph.D.
 Název diplomové práce: Příprava a realizace bentonitového těsnění experimentu EPSP
 Název diplomové práce
 v anglickém jazyce: Preparation and realization of the bentonite sealing of the EPSP
 experiment

Rámcový obsah diplomové práce: Ověření způsobu hutnění vrstev bentonitu a jeho nástřiku pro
 zvolený těsnicí materiál, kontrola provedení (vč. návrh odběru vzorků, sledování při výstavbě),
 příprava vlhkostních čidel (kalibrace, návrh způsobu instalace); spolupráce při výstavbě a její
 dokumentace

Datum zadání diplomové práce: 11.2.2015 Termín odevzdání: 15.5.2015
 (vyplňte poslední den výuky přísl. semestru)

Diplomovou práci lze zapsat, kromě oboru A, v letním i zimním semestru.

Pokud student neodevzdal diplomovou práci v určeném termínu, tuto skutečnost předem písemně zdůvodnil a omluva byla děkanem uznána, stanoví děkan studentovi náhradní termín odevzdání diplomové práce. Pokud se však student řádně neomluvil nebo omluva nebyla děkanem uznána, může si student zapsat diplomovou práci podruhé. Studentovi, který při opakovaném zápisu diplomovou práci neodevzdal v určeném termínu a tuto skutečnost řádně neomluvil nebo omluva nebyla děkanem uznána, se ukončuje studium podle § 56 zákona o VŠ č.111/1998 (SZŘ ČVUT čl 21, odst. 4).

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

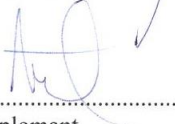


 vedoucí diplomové práce



 vedoucí katedry

Zadání diplomové práce převzal dne: 11.2.2015



 diplomant

Formulář nutno vyhotovit ve 3 výtiscích – 1x katedra, 1x diplomant, 1x studijní odd. (zašle katedra)

Nejpozději do konce 2. týdne výuky v semestru odešle katedra 1 kopii zadání DP na studijní oddělení a provede zápis údajů týkajících se DP do databáze KOS.
 DP zadává katedra nejpozději 1. týden semestru, v němž má student DP zapsanou.
 (Směrnice děkana pro realizaci stud. programů a SZZ na FSv ČVUT čl. 5, odst. 7)



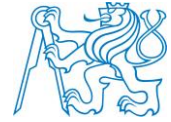
Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Dne 15. 5. 2015

.....

Bc. Jan Vožech



Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval Ing. Radku Vašíčkovi, Ph.D., Ing. Jiřímu Svobodovi, Ph.D., Ing. Jiřímu Št'ástkovi a Ing. Markétě Levorové za cenné připomínky, trpělivost a ochotu při vedení diplomové práce.



Abstrakt

V České republice je na rok 2050 plánována výstavba hlubinného úložiště radioaktivních odpadů. Pro stavby tohoto typu jsou vzhledem k potřebě dlouhodobé bezpečnosti stanovena přísná pravidla. Celoevropský projekt DOPAS se touto problematikou zabývá. Cílem projektu je ve skutečném měřítku demonstrovat výstavbu čtyř experimentálních zátek v přístupových štolách hlubinných úložišť. Experiment EPSP, který vzniká v České republice ve štolě Josef, má demonstrovat proveditelnost českého konceptu takové zátky. Tato práce byla zpracována na pracovišti Centra experimentální geotechniky, které provozuje štolu Josef.

Práce řeší ověření způsobu hutnění a nástřiku bentonitu 75, který byl pro experiment vybrán. Práce dále navrhuje způsob odběru vzorků z experimentu. V rámci monitorování experimentu je provedena kalibrace vlhkostních senzorů a navržen způsob jak tyto senzory instalovat přímo v experimentu.

Jsou zde prezentovány výsledky a postupy provádění zkoušek hutnění materiálu, nástřiku materiálu a kalibrace vlhkostních senzorů.

Abstract

In 2015, new construction of deep geological repository of radioactive waste is planned at the area in CR. The aim of the DOPAS project is to address the design basis of and reference designs and strategies for plugs and seals to be used in geological disposal facilities. The Czech experiment “Experimental Pressure and Sealing Plug” (EPSP) is studying developments concerning the design basis, reference designs and strategies including compliance issues. The EPSP experiment is being built at the Josef underground laboratory. This thesis was made under the Center of Experimental Geotechnics at the URC Josef.

The work deals with the verification of compaction method and shot clay. Bentonite 75 was selected for the experiment. Moreover, acquisition of experimental samples is also described. In a scope of experiment monitoring, water content sensors calibration is managed and a way to sensors installation within the experiment is proposed.

The thesis presents workflows and results of the compaction method tests, shot clays in-site experiments, and water content sensors calibration.

Klíčová slova:

Hlubinná úložiště, Bentonit, Nástřik, Hutnění, Kalibrace

Key words:

Deep geological repository, Bentonite, Spraying, Compaction, Calibration



Obsah

1	Úvod.....	- 8 -
2	Cíl.....	- 9 -
3	DOPAS.....	- 10 -
4	EPSP experiment.....	- 11 -
4.1	EPSP v souvislostech.....	- 14 -
4.2	Zaměření meziprostoru experimentu EPSP.....	- 14 -
4.3	Požadavky experimentu.....	- 15 -
5	Materiál.....	- 16 -
5.1	Bentonit.....	- 16 -
5.2	Charakteristika.....	- 16 -
5.3	Mineralogie bentonitu.....	- 17 -
5.3.1	Montmorillonit.....	- 17 -
5.3.2	Kaolinit.....	- 17 -
5.3.3	Illit.....	- 17 -
5.1	Rozdělení bentonitů.....	- 18 -
5.2	Bentonit v experimentu.....	- 18 -
6	Ověření způsobu hutnění vrstev bentonitových pelet.....	- 19 -
6.1	Test hutnění.....	- 19 -
6.2	Odběry vzorků.....	- 20 -
7	Ověření kvality nástřiku bentonitu.....	- 23 -
7.1	In-situ testy.....	- 23 -
7.2	Vyhodnocení in-situ testů.....	- 24 -
8	Monitoring bentonitové části zátky.....	- 26 -
9	Plán odběru vzorků.....	- 28 -
10	Měření vlhkosti.....	- 29 -
10.1	Principy měření vlhkosti.....	- 29 -
10.1.1	Přímé metody.....	- 29 -
10.1.2	Nepřímé metody.....	- 29 -
10.1.3	Výhody a nevýhody.....	- 30 -
10.2	Měření vlhkosti v experimentu.....	- 30 -
10.2.1	Gravimetrická metoda.....	- 30 -
10.2.2	Princip měření TDR.....	- 31 -
10.3	Řídící jednotka.....	- 31 -
10.4	Vlhkostní senzory.....	- 32 -
10.5	Senzor 5TE.....	- 32 -



10.5.1	Specifikace	- 33 -
10.6	Kalibrace senzoru 5TE	- 34 -
10.6.1	Výrobní kalibrace	- 34 -
10.6.2	Vlastní měření	- 34 -
10.6.3	Fáze 1. – zkušební měření	- 35 -
10.6.4	Výsledky měření Fáze 1	- 36 -
10.6.5	Fáze 2. - Měření na materiálu s různými vlhkostmi	- 39 -
10.6.6	Výsledky měření Fáze 2	- 40 -
10.6.7	Fáze 3. - Rozšíření měření sypkého materiálu	- 41 -
10.6.8	Výsledky měření Fáze 3	- 42 -
10.6.9	Fáze 4. – Měření pelet	- 43 -
10.6.10	Výsledky měření Fáze 4	- 44 -
10.6.11	Fáze 5. – Opakované měření sypkého materiálu	- 45 -
10.6.12	Výsledky měření Fáze 5	- 46 -
10.6.13	Fáze 6. – Rozšíření měření pelet	- 47 -
10.6.14	Výsledky měření fáze 6.	- 49 -
10.6.15	Fáze 7. – Měření vzorků vyšších objemových hmotností	- 50 -
10.6.16	Výsledky měření Fáze 7	- 52 -
10.6.17	Fáze 8. – Měření saturovaných vzorků vyšších objemových hmotností	- 53 -
10.6.18	Výsledky měření Fáze 8	- 55 -
10.6.19	Fáze 9. - Ověření funkčnosti v podzemí	- 56 -
10.6.20	Výsledky měření Fáze 9	- 57 -
11	Interpretace výsledků	- 58 -
11.1	3D data	- 58 -
11.1.1	Data trojrozměrného grafu	- 58 -
11.1.2	Postup sestavení trojrozměrného grafu	- 58 -
11.2	Gnuplot	- 61 -
11.3	Aproximace dat	- 63 -
11.4	Ověření spolehlivosti	- 65 -
12	Instalace senzoru v experimentu	- 67 -
13	Závěr	- 68 -
14	Seznam použité literatury	- 69 -
15	Přílohy	- 71 -



1 Úvod

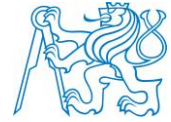
Radioaktivních odpadů (RAO) v dnešní době přibývá a jsou z velké části skladovány v povrchových meziskladech, které jsou pouze dočasným řešením. Dle intenzity záření a doby její produkce rozdělujeme radioaktivní odpad na nízko, středně a vysoce aktivní. První dvě skupiny je možné trvale skladovat v úložistiích povrchového typu, vysoce aktivní odpad, převážně vyhořelé palivové články z jaderných elektráren, nikoli. V současnosti akceptovaným řešením jsou hlubinná úložiště (HÚ). Jedná se o vyražený systém štol, chodeb a rozrážek 500m pod úrovní terénu. Vyhořelé palivo zde bude v úložném obalovém souboru a zajištěno systémem několika bariér. Jejich úkolem je zabránit kontaminaci okolní biosféry. Jednou z bariér je jílový materiál bentonit, který je v práci podrobně popsán. Bentonit bude použit pro utěsnění úložného obalového souboru, přístupových štol a bude součástí zátky, která odděluje jednotlivé štoly. Práce se zabývá dílčími částmi zátky navržené dle českého konceptu.

Téma diplomové práce bylo vybráno v návaznosti na bakalářskou práci zpracovanou na Centru experimentální geotechniky. Téma práce bylo „Využití pelet ve stříkaných jílových těsněních“. V práci byl řešen návrh směsi pro stříkaná jílová těsnění. Výsledky z bakalářské práce jsou zde prezentovány a rozšířeny.

Téma diplomové práce „Příprava a realizace bentonitového těsnění experimentu EPSP“ je velice aktuální. Problematikou práce je ukládání vysoce radioaktivního odpadu do hlubinných úložišť.

Práce se zabývá bentonitovou částí experimentu EPSP, v rámci níž byly provedeny testy hutnění do testovací bedny a in-situ nástřiky. Další částí práce je monitoring bentonitové části experimentu, pro který byla provedena kalibrace vlhkostních senzorů a navržen způsob jejich instalace při výstavbě. Pro samotnou výstavbu byl sestaven plán odběru vzorků a způsob jejich odběru.

V závěru práce byly shrnuty veškeré výsledky. Byly zhodnoceny testy hutnění do testovací bedny, in-situ nástřiky a kalibrace senzorů a byla stanovena přesnost kalibrace. Byl zhodnocen navržený způsob instalace senzorů v experimentu a plán odběru vzorků při výstavbě. V průběhu vyhodnocování zkoušek a testování bylo nutné upravit část náplně práce. Důvodem bylo zpoždění výstavby celého experimentu, kvůli kterému nemohla být zpracována technická zpráva a instalovány senzory.



2 Cíl

Diplomová práce má za úkol ověřit navržený způsob hutnění a nástřiku bentonitu v experimentu. Kontrolu provedení těchto způsobů hutnění a nástřiku, tedy navržení jakým způsobem bude docházet k odběru vzorků a sestavení plánu odběru vzorků při výstavbě experimentu.

Další částí práce je monitoring bentonitové části experimentu. Cílem této části je kalibrace vlhkostních senzorů pro materiál experimentu a navržení způsobu jejich instalace.

Posledním úkolem je spolupráce a podílení se na výstavbě experimentu v podzemí. Výstupem této části bude dokumentace formou technické zprávy.

V průběhu vyhodnocování zkoušek a testování bylo nutné upravit část náplně práce. Důvodem bylo zpoždění výstavby celého experimentu.



3 DOPAS

DOPAS je mezinárodní evropský výzkumný projekt zaměřený na ukládání vysoce radioaktivního odpadu. Projekt DOPAS („Demonstration Of Plugs And Seals“) si klade za úkol demonstraci čtyř experimentálních zátek. Ty představují těsnění HÚ RAO. Zátky různých konceptů budou vystavěny v různých geologických podmínkách. Cílem je tedy prokázat, že se současně dostupnými prostředky jsme schopni tyto zátky postavit a dodržet jejich stanovené parametry. Projekt se zabývá důkladným popisem hydraulických a mechanických vlastností materiálu použitého v experimentech. Vývoje těsnícího zařízení pro HÚ se účastní čtrnáct organizací (organizace zodpovědné za výstavbu HÚ a výzkumné instituce podílející se na výstavbě HÚ) nakládajících s RAO z osmi evropských zemí (Česká Republika, Finsko, Francie, Holandsko, Německo, Švédsko, Švýcarsko a Velká Británie). Koordinátorem projektu je finská společnost Posiva. Projekt financovaný Evropskou Unií byl spuštěn v září 2012 a bude ukončen v srpnu 2016 (Hansen, D1.2, 2013).

Projekt má za úkol provést návrh zátky a těsnění a následně provést její realizaci v plném rozsahu. Po výstavbě pak monitoringem ověřit její chování.

Experimentální zátky budou vystavěny ve výzkumných centrech zástupců z Finska, Francie, České republiky a Švédska. Experimenty vystavěné v rámci projektu DOPAS jsou:

- Experiment 1. FSS („Full Scale Seal Experiment“) - Francie
- Experiment 2. EPSP („Experimental Pressure and Sealing Plug“) - Česká Republika
- Experiment 3. DOMPLU („Dome Plug Experiment“) – Švédsko
- Experiment 4. POPLU („Posiva Plug Experiment“) – Finsko

Výstavba experimentálních zátek ve výzkumných centrech těchto zemí byla zvolena pro různorodost geologických prostředí.

Výsledky pomohou upravit požadavky celého projektu, informují širší společenství o nakládání s RAO. V závěru projektu (2016) bude pořádán mezinárodní seminář, kde budou prezentovány výsledky celého projektu.

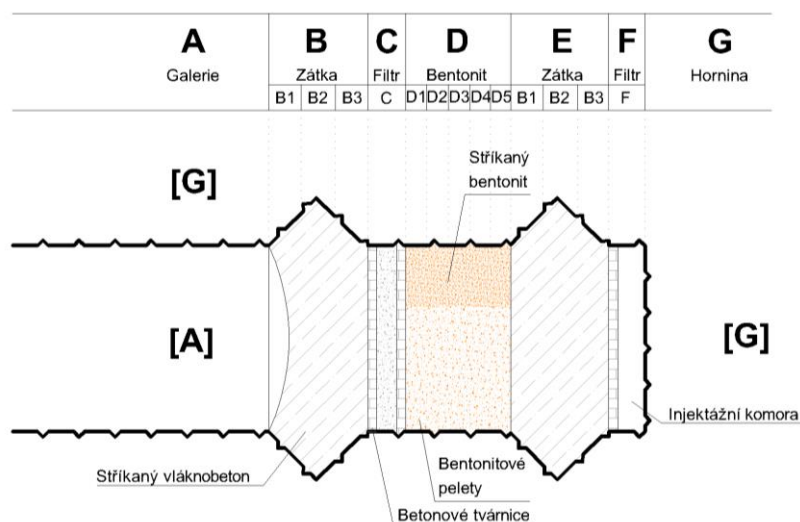


4 EPSP experiment

V rámci evropského projektu DOPAS, probíhá realizace experimentu EPSP („Experimental Pressure and Sealing Plug“) ve štole Josef (Obr. 3), pracovišti Centra experimentální geotechniky Českého vysokého učení technického v Praze. Jedná se o český experiment simulující ukládání vysoce radioaktivního odpadu v HÚ. To bude sestávat z přístupových štol s rozrážkami, ve kterých budou uloženy kontejnery s vyhořelým palivem. Rozrážky a přístupové štoly budou celé uzavřeny tzv. zátkou. Právě taková zátka bude v rámci EPSP experimentu ve štole Josef realizována.

Primárním cílem experimentu je testování materiálu a technologie použité při realizaci zátky, hlavním cílem není podrobný návrh, pouze demonstrace technické proveditelnosti a funkčnosti samotné zátky. Experiment primárně využívá materiálů a technologií dostupných v České republice. Centrum experimentální geotechniky ČVUT v Praze navrhlo technické řešení zátky (Obr. 1). Zátka experimentu byla navržena jako prototyp pro české úložiště radioaktivních odpadů. Zátka je navržena jako vícevrstvý systém. Stabilitu celého systému zajišťují dva mohutné betonové bloky, mezi kterými bude úsek vyplněný jílovým materiálem (bentonitem).

Řešení se skládá z několika vrstev. Po vyražení výrubu bude postavena tlaková (injektážní) komora. Následovat bude výstavba betonového segmentu zhotoveného ze stříkaného vláknobetonu z cementu s nízkou hodnotou pH (vnitřní betonová zátka - E s filtrem - F). Následuje zóna zhutněných bentonitových pelet (bentonit - D) uzavřená filtrem z kameniva mezi betonovými tvárnici (filtr - C). Celé těleso zátky bude uzavřeno druhým vláknobetonovým segmentem (vnější betonová zátka - B), (Vašíček, D3.16, 2014).



Obr. 1 – Schéma EPSP experimentu

- **Tlaková komora** (injekční komora), je volný prostor za filtrem vnitřního betonového bloku. V tlakové komoře je instalován sací a vypouštěcí ventil, který slouží k injektování volného prostoru vzduchem (plynem), vodou popř. bentonitovou suspenzí. Tlakovací média budou přiváděna cca 23 m



dlouhými spojovacími vrty z paralelní technologické rozrážky. Komora byla navržena co nejmenší, tlak od injektování tak bude snáze kontrolovatelný.

- **Betonové bloky** (betonové zdi) jsou prefabrikované tvárnice z drenážního betonu. V experimentu budou celkem tři, jedna mezi tlakovou komorou a vnitřní betonovou zátkou a dvě mezi vnější betonovou zátkou a bentonitovým těsněním. Budou sloužit jako ztracené bednění.
- **Vnitřní betonová zátka** (segment) je masivní blok zhotovený ze stříkaného vláknobetonu do vyražených límců. Ověření její funkčnosti je jedním z hlavních cílů experimentu. Má funkci statickou a hydraulickou. Zajistí mechanickou stabilitu celého systému i za vysokého tlaku a omezí proudění zátkou, aby nedošlo k porušení bentonitového těsnění. Před saturací bentonitu by totiž mohlo dojít k vytvoření erozních kanálů. Rozptýlená mikrovýztuž bude ze skelných vláken. Cement použitý do vláknobetonu bude s nízkou hodnotou pH.
- **Bentonitová zóna** je 2 m dlouhá zóna hutněného materiálu B75. Zátka bude zasypána zhutněnými peletami a přístropí bude vyplněno stříkaným bentonitem z důvodu omezeného přístupu hutnicí techniky do přístropí. Úkolem bentonitového těsnění je hydraulicky oddělit prostory před a za zátkou.
- **Filtr** mezi betonovými tvárnici je primárně určen k monitoringu průsaků zátky. Filtr lze využít jako alternativní tlakovací komoru.
- **Vnější betonová zátka** je nejdůležitější z hlediska mechanické stability celku. Je navržena tak aby odolávala tlakovému namáhání z vnitřních částí zátky. Vnější zátka bude zhotovena identicky jako vnitřní zátka.

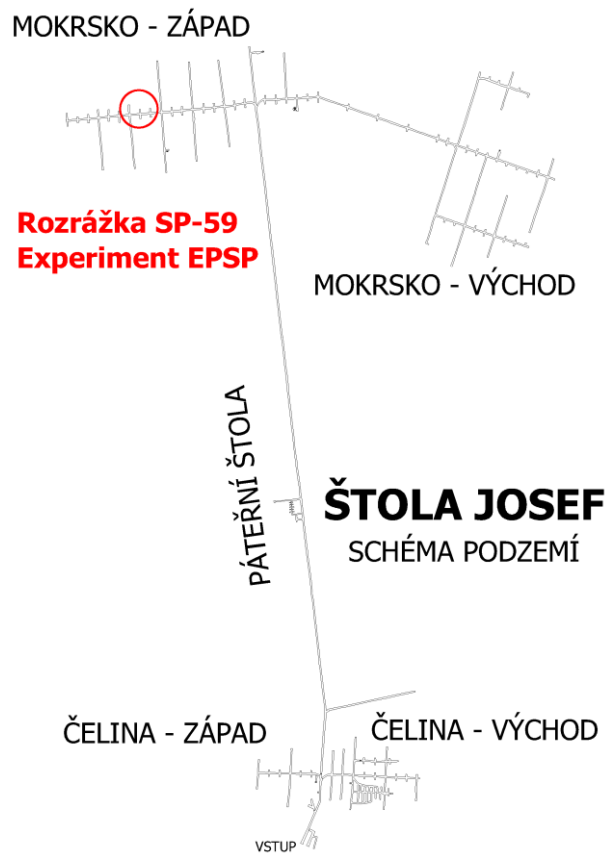
V roce 2013 bylo podrobně zmapováno horninové prostředí (Obr. 4) v místech, kde bude experiment realizován. Po zmapování následovaly injektáže horninového masivu, které zajistí zlepšení kvality blízkého okolí. Po injektování okolního masivu bude následovat výstavba experimentální zátky. V průběhu výstavby budou instalovány senzory, které po ukončení výstavby budou zajišťovat kontinuální monitoring materiálu v zátce. Experimenty vystavěné ve Finsku, Francii a Švédsku mají jiné konstrukční řešení, ale získaná data (sdílená s ostatními experimenty) lze využít k detailnějšímu návrhu systémů zátek (White, D2.1, 2014).

Zátka bude vystavena vlivům okolního prostředí. Při simulacích nepříznivých vlivů bude sledován stav a chování materiálu. Bude se jednat o injektování vzduchu, vody nebo bentonitové suspenze z injekční komory.



Obr. 2 – rozrážka SP-59 pro experiment EPSP

Po výstavbě vnitřní betonové zátky bude před výstavbou bentonitového těsnění provedena tlaková zkouška k otestování kvality betonové zátky. Po vyhodnocení výsledků tlakové zkoušky bude rozhodnuto, zda budou požadovány injektáže ke zlepšení okolního masivu.



Obr. 3 – schéma Štoly Josef



4.1 EPSP v souvislostech

Plánované úložiště radioaktivních odpadů v České republice má sloužit k ukládání vyhořelého paliva, vysoce radioaktivního odpadu a dalších radioaktivním odpadům s dlouhým poločasem rozpadu. Program pro likvidaci těchto odpadů pro českou republiku je rozpracován. Nyní, v počáteční fázi, 50 let před plánovaným zahájením provozu, probíhá experimentální činnost. Místo pro výstavbu HÚ zatím nebylo stanoveno, ale místní šetření jsou zaměřena na oblasti s žulovými horninami. Předpokládá se, že úložiště bude v pevných žulových horninách v hloubce ~ 500 m. Plánované zahájení výstavby je stanoveno na rok 2050 a předpokládané uvedení do provozu na rok 2065.

Poté co bude odpad přivezen do HÚ, bude přemístěn do tzv. superkontejneru, ve kterém bude uložen do rozrážky a izolován. Uvnitř superkontejneru bude odpad uložený v měděném kanystru (ocelový se ukázal jako neekonomický) obklopený zhutněným bentonitem s ocelovým manipulačním přebalem.

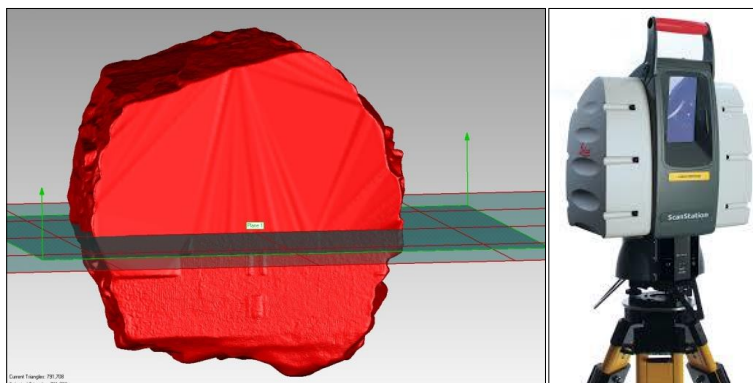
Uložení odpadu v horizontálním směru je doporučeno, ale kontinuálně probíhají výzkumy na obou variantách (horizontální i vertikální).

4.2 Zaměření meziprostoru experimentu EPSP

Pro projekt DOPAS, bylo ve štole Josef v rozrážce experimentu EPSP provedeno 3D skenování systémem HDS3000 (laserový scanner Leica HDS3000, Arcadis, 2015). Zaměřením meziprostoru (Obr. 4) byl určen jeho objem a vytvořeny řezy pro experiment. Zaměření provedla společnost ARCADIS CZ a.s.

Parametry zaměření (viz Technická zpráva Arcadis, 2015):

- Teplota v podzemí při měření byla 13°C.
- Celkový objem prostoru je 23,7 m³. Objem prostoru pod vodorovnou rovinou procházející horní hranou vyzdívky je 9,8 m³ a objem prostoru nad touto rovinou je 13,9 m³.
- Směrodatná odchylka určení objemu je $\sigma = 0,2 \text{ m}^3$.



Obr. 4 – vlevo – 3D scan prostoru pro bentonitové těsnění, vpravo – laserový scanner HDS3000 (ilustrační foto)

Díky zaměření 3D skenováním meziprostoru bentonitové části experimentu bude možné zpětně vyhodnotit průměrnou suchou objemovou hmotnost. Při výstavbě experimentu bude sledována celková



hmotnost navezeného a nastříkaného bentonitu. Ze známé hmotnosti požitého bentonitu a známého objemu meziprostoru bude vypočtena průměrná suchá objemová hmotnost.

4.3 Požadavky experimentu

Následující tabulka (Tab. 1) stanovuje požadavky kladené na bentonitové těsnění experimentu. Jedná se o požadavky stanovené ve správě projektu DOPAS (White, D2.1, 2014), v této zprávě jsou uvedeny i požadavky na ostatní části experimentu.

Tab. 1 - Požadavky experimentu EPSP stanovené ve zprávě D2.1

Komponenty	Požadavky	Poznámky
Stříkané pelety	Bentonit musí být typu B75	Jeví se jako vhodný ke zkoumání vzhledem ke svému složení. Dodavatel musí být schopen dodat tento bentonit v dostatečném množství.
	Bentonit musí být homogenní.	Jako průmyslový produkt je požadavek na zajištění homogenity větší části materiálu.
	Bentonit musí být přírodní (ne aktivovaný)	Tento požadavek vznikl z nedůvěry vůči chování aktivovaného bentonitu při tepelném zatěžování.
	Bentonit musí obsahovat dostatečné množství smektitů pro zajištění požadovaného bobtnacího tlaku a hydraulické vodivosti.	
	Bentonit musí obsahovat pouze limitované množství ostatních minerálů.	
	Bentonit musí dosáhnout suché objemové hmotnosti 1400 kg.m ⁻³ .	Při této objemové hmotnosti materiálu dosahuje bobtnacího tlaku 2 MPa a hydraulické vodivosti 10 ⁻¹² m.s ⁻¹ .
	Technika instalace bentonitu na místo zátky musí být zveřejněna.	Technika instalace pelet je na rozhodnutí dodavatele, ale s procesem musí být seznámeno SÚRAO, které ji může použít pro budoucí experimenty.
	Objemová hmotnost bentonitu musí být často ověřována. Musí být sestaven plán testování.	
	Plán testování musí být připraven a odsouhlasen SÚRAO.	
	Bentonitové těsnění musí být 2 m.	Délka bentonitové zátky bude ovlivněna druhou betonovou stěnou.
	V průběhu experimentu musí být monitorován pórový tlak.	
	Monitoring pórového tlaku musí být dostatečný ke zjištění nasycení bentonitu.	Ideální stavem bude, když bentonit pojme veškerou vodu, která projde betonovou zátkou. Zároveň se předpokládá, že vodu vůbec nezadrží, a to kvůli vytvoření erozních kanálků v bentonitu.



5 Materiál

5.1 Bentonit

Bentonit je hornina s mnohostranným využitím v řadě různých průmyslových odvětví. K těmto odvětvím patří například pojiva v hutním průmyslu (pojiva slévárenských forem) průmyslové a uživatelské sorbenty, plniva do vrtných výplachů, nebo těsnicí materiály ve stavebnictví. V souvislosti s využitím jejich vlastností při budování skládek odpadů význam bentonitů v posledních letech roste. S využitím bentonitů se počítá v těsnicích zónách inženýrských bariér v HÚ, kde mají zajistit dlouhodobou izolaci kontejnerů s vyhořelým palivem od okolního geologického prostředí. Bentonity jsou aplikovány přímo jako minerální těsnění nebo jako účinná těsnicí složka ve směsi s jinými zeminami.

Vzhledem k těmto novým a perspektivním oblastem využití lze očekávat, že těžba bentonitů v budoucích letech poroste.

Zda jsou konkrétní bentonity vhodné pro HÚ, ale i pro další použití je nutné posoudit celou řadou parametrů. Mezi tyto parametry patří fyzikální, fyzikálně-chemické vlastnosti, mineralogické složení nebo chemismus. U jednotlivých typů bentonitů se tyto vlastnosti mohou výrazně lišit. Odlišnost je závislá na konkrétním složení, na typu hlavní krystalické fáze a na ostatních příměsích. Je tedy nutné podrobně studovat a charakterizovat bentonity z různých ložisek.

Bentonit je těžen většinou povrchově. Největším producentem jsou Spojené státy americké. Bentonity jsou těženy v Turecku, UK, Japonsku, Mexiku, Německu a dalších. Česká republika těží bentonity z ložisek v Českém středohoří, Doupovských horách, jižních Čechách a v Ivančicích u Brna. To jsou oblasti třetihorních vulkanických hornin s bentonity nižší kvality. Naprostou většinu ložisek v ČR spravuje firma KERAMOST, a.s. Hlavním těžištěm je dnes jámový lom z Bentonizovaných tuřů a tuřitů severočeské pánve Rokle u Kadaně (Keramost, 2015).

5.2 Charakteristika

Bentonit je nehomogenní jemnozrnná hornina složená z podstatné části z montmorillonitu, jílového minerálu. Jde o reziduální, nepřeměněnou, měkkou horninu, vzniklou mechanickým a chemickým zvětráváním mateční horniny v alkalickém prostředí. Mateční horninou jsou převážně tufy, tuřity, v menší míře i čedič, andezit, ryolit a jiné převážně třetihorní horniny.

Montmorillonit je nositelem charakteristických vlastností bentonitu. Mezi ně patří, značná sorpční schopnost charakterizovaná vysokou hodnotou výměny bází (schopnost přijímat určité kationty a uvolňovat za ně své molekuly Mg, Ca a alkálie), bobtnání při styku s vodou (ne všechny bentonity jsou bobtnavé, ale mají vysoké absorpční schopnosti jako jíly), vysoká plasticita a vaznost. Bentonity obsahují další jílové minerály, Fe-sloučeniny, živce, křemen, sopečné sklo apod. Ty představují škodliviny a úpravou se odstraňují.



Obr. 5 - příklad práškového bentonitu

5.3 Mineralogie bentonitu

Bentonit patří do skupiny smektitů. Hlavní složka bentonitu je minerál montmorillonit v zastoupení 65 – 80 %. V malém množství obsahuje i další jílovité minerály (např. kaolinit a illit) nebo klastickou příměs minerálů (sádrovec, křemen, živec, kalcit, vulkanické sklo atd.), (ČGS, 2015).

5.3.1 Montmorillonit

Montmorillonit je minerál se strukturou z dioktaedrických a tetraedrických vrstev. Mezi těmito vrstvami je prostor vyplněným kationty a molekulami vody. Je běžnou součástí jílových sedimentů a půd. Montmorillonit je produkt zvětrávání bazaltových tufů, popelů a skel, hadců, pegmatitů nebo granitoidních hornin. Barvou je montmorillonit bílý, šedý až narůžovělý, leskem matný a zemitý. Tvrdost je v rozmezí 1,5 – 2 (Moshova stupnice) a hustota 2000 – 2700 kg.m⁻³.

5.3.2 Kaolinit

Kaolinit je triklinický (trojklonný) minerál bílé, velmi často v odstínech okrové a červené (způsobené oxohydroxidy železa) barvy. Pro vznik kaolinitu jsou typické vysoká aktivita Al a nízké hodnoty pH (~ 4 a méně). Vzniká zvětráváním v huminidním a teplém klimatu. Primárními minerály, ze kterých kaolinit vzniká, jsou nejčastěji slídy, živec a vulkanické sklo. Vytváří rozsáhlá zvětralinová ložiska nebo je běžnou součástí sedimentů. Objevuje se i v různých typech hydrotermálních žil. Hustota 2600 kg.m⁻³ a tvrdost 1,5 – 2.

5.3.3 Illit

Illit je dioktaedrický minerál ze skupiny slíd. Je běžnou součástí mnoha sedimentárních hornin, zejména mořských jíllů. Běžně se vyskytuje s kaolinitem při zvětrávání primárních hornin. Může vznikat i v hydrotermálních procesech. Illit je obsažen v řadě jílových sedimentů a břidlic. Tvrdost 1 – 2 hustota 2600 – 2900 kg.m⁻³, barvou je bílý, slabě zbarvený v různých odstínech s matným nebo zemitým leskem.



5.1 Rozdělení bentonitů

V praxi rozdělujeme bentonity do dvou základních skupiny dle bobtnací schopnosti. Silně bobtnavé a méně bobtnavé.

- **Silně bobtnavé**, sodné bentonity (Na-bentonit). Ložiska sodných bentonitů se v ČR nevyskytují, těží se především v USA. Silně bobtnavé bentonity mají schopnost absorbovat vodu asi v osminásobném množství svého objemu.
- **Méně bobtnavé** hořečnaté (Mg), vápenaté (Ca) a draselné (K) bentonity popř. jejich kombinace. Ty se tzv. aktivují, průmyslově se obohacují sodíkem. Obohacování lze provádět díky jejich vysoké schopnosti výměny bází. Jejich bobtnací schopnost po aktivaci však stále nedosahuje takových hodnot jako u sodných bentonitů.

5.2 Bentonit v experimentu

Materiálem experimentu byl zvolen komerční produkt bentonit 75 (B75). Jde o neaktivovaný bentonit z ložiska Černý vrch. Jako hlavní stavební materiál inženýrské bariéry bude zabraňovat úniku radionuklidů z kontejnerů s RAO do přírodní bariéry a dále do biosféry. Ve srovnání s ostatními materiály má bentonit nejstálější reologické vlastnosti. Bude mít funkci tlumící, výplňovou a těsnící.

Na materiál zátky jsou kladeny tyto požadavky:

- **Objemová hmotnost vysušené zeminy** je poměr mezi hmotností pevných částic vysušené zeminy a celkovým objemem zeminy. Minimální objemová hmotnost bariéry musí být 1400 kg.m^{-3} .
- **Nízká propustnost** zaručí omezení transportu hmoty. Požadavek na propustnost bentonitové bariéry je $10^{-12} \text{ m.s}^{-1}$.
- **Bobtnací tlak** kritériem je hodnota 1,0 MPa pro zajištění těsnosti.
- **Dlouhodobá neměnnost chování bentonitové bariéry**

Při splnění požadavků suché objemové hmotnosti $\rho_d = 1400 \text{ kg.m}^{-3}$ je zajištěna dostatečně malá propustnost (hydraulická vodivost) cca $10^{-12} \text{ m.s}^{-1}$ a dostatečně velký bobtnací tlak cca 2 MPa (Vašíček et al., 2014).



6 Ověření způsobu hutnění vrstev bentonitových pelet

V experimentu je bentonitová bariéra tvořena materiálem pelet. Pelety budou na místo nasypány a následně zhutněny vibrační deskou. Předpokládá se, že se bude bentonit ukládat v ~ 10 cm mocných vrstvách. Hutnění bude probíhat, dokud nebude dosaženo výšky ~ 2,5 m. Ostatní prostor bude vyplněn stříkaným bentonitem. Hutnění vibrační deskou a ukládání ve vrstvách mocnosti ~ 10 cm bylo v menším měřítku simulováno hutněním v testovací bedně.

6.1 Test hutnění

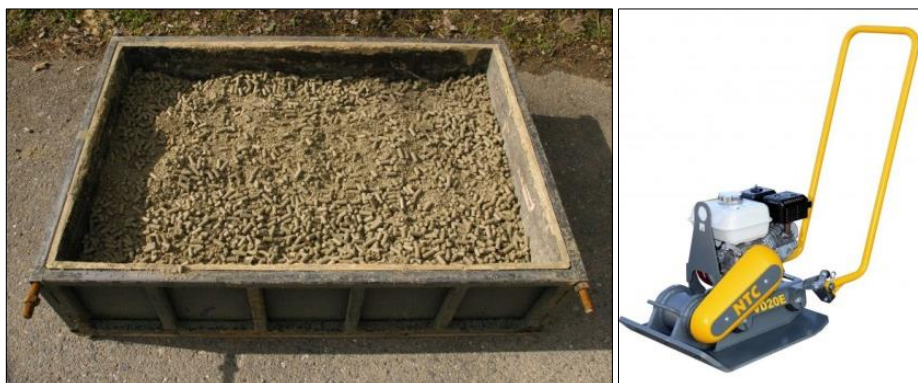
Test byl proveden pro ověření, že navrženým způsobem hutnění pelet bude dosaženo požadovaných vlastností materiálu. Hlavním kritériem byla suchá objemová hmotnost, jejíž hodnota musela dosáhnout minimálně $\rho_d = 1400 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Na materiálu byla vyhodnocena vlhkost a proveden síťový rozbor před a po hutnění.

Test hutnění byl proveden celkem dvakrát. Testy se lišily použitým typem vibrační desky a odlišným postupem hutnění. Při prvním testu byla použita vibrační deska NTC (Obr. 6). Do dřevěné testovací bedny známého objemu a hmotnosti (Tab. 2), vyztužené ocelovou konstrukcí, byl volně nasypán bentonit (Obr. 6). Po zarovnání materiálu s okrajem testovací bedny, byla instalována vibrační deska. Následně byl materiál hutněn pojezdem desky po dobu 2 minut. Po viditelném zhutnění byla deska odsunuta, materiál dosypán a bylo znovu provedeno hutnění. Při druhém hutnění byl materiál zarovnán s okrajem testovací bedny (nerovnosti byly vyrovnány dosypáním bentonitu). Po ukončení hutnění byla celá testovací bedna zvážena a byla zjištěna průměrná objemová hmotnost náplně. Po zvážení byly odebrány vzorky pro přesnější zjištění objemové hmotnosti. Vibrační deskou NTC při hutnění 2 minuty nebylo dosaženo požadovaného zhutnění. Nesplnění požadavku minimální suché objemové hmotnosti vedlo k opakování testu a úpravě jeho parametrů.

V druhém testu byla použita výkonnější vibrační deska AMMANN (Obr. 7). Do stejné testovací bedny byl materiál sypán v 10 cm mocných vrstvách. Cílem bylo dosažení vyššího zhutnění a přesná simulace instalace bentonitu v zátce. Po nasypání první vrstvy byla instalována vibrační deska a materiál byl 2 minuty hutněn. Tento proces byl opakován třikrát. Po zhutnění byla testovací bedna zvážena, zjištěna průměrná objemová hmotnost náplně a byly odebrány vzorky pro přesnější zjištění objemové hmotnosti.

Tab. 2 – rozměry bedny na hutnění

Výška [m]	Šířka [m]	Délka [m]	Objem [m ³]	Hmotnost [kg]
0,300	0,770	1,163	0,269	62,3



Obr. 6 – vlevo – testovací bedna na hutnění, vpravo – vibrační deska NTC (ilustrační foto)



Obr. 7 – vlevo - vážení testovací bedny, vpravo – průběh hutnění (vibrační deska AMMANN)

Tab. 3 – vyhodnocení objemové hmotnosti hutnění do testovací bedny

Technologie hutnění / vzorky		Hmotnost celkem [kg]	Hmotnost bentonitu [kg]	Vlhkost [%]	Objemová hmotnost [kg.m ⁻³]	Suchá objemová hmotnost [kg.m ⁻³]
1	B75 hutnění deskou NTC	514,6	452,3	17,4	1684	1434
2	Vzorek 1	2,77	1,67	17,4	1481	1262
3	Vzorek 2	2,89	1,80	17,4	1588	1353
4	B75 hutnění deskou AMMANN	531,3	469,0	17,4	1746	1487
5	Vzorek 1	3,07	1,98	17,4	1750	1491
6	Vzorek 2	2,69	1,91	17,4	1690	1439
7	Vzorek 3	2,96	1,85	17,4	1639	1396

V druhém testu, hutněním vibrační deskou AMMANN, bylo dosaženo požadované suché objemové hmotnosti (Tab. 3). Při výstavbě experimentu bude bentonit ukládán v ~ 10 cm mocných vrstvách. Pro hutnění musí být použita vibrační deska minimálně stejných parametrů jako v druhém testu. Hutnění musí probíhat po dobu minimálně 2 minut. Není nutné upravovat zrnitost bentonitu.

6.2 Odběry vzorků

Na materiálu byla zjištěna průměrná objemová hmotnost celé náplně testovací bedny a lokálně z různých míst (Obr. 8) byly odebrány vzorky pro přesnější stanovení objemové hmotnosti.



Předpokládalo se, že nejvyššího zhutnění bude dosaženo vprostřed testovací bedny a po obvodu bude objemová hmotnost nižší.

Vzorky z různých míst testovací bedny byly získány odběrným prstencem (Obr. 9). To je ocelový prstavec sestavený ze tří dílů, úderné (horní) části, vnitřního odběrného prstence a vnějšího obalu. Sestavený prstavec se umístí na zeminu, ze které chceme odebrat vzorek, údery palicí se zarazí do zeminy a následně s obsaženou zeminou vyjme. Po vyjmutí se prstavec rozebere, získá se vzorek, který se zabezpečí proti vysypání.

Prstavec byl širokým hrdlem vnějšího obalu umístěn na zhutněný bentonit v testovací bedně a cca. 10 údery palicí byl zaražen do bentonitu. Po zaražení byl z okolí prstence odhrnut bentonit a prstavec byl položen na bok a vyjmut z testovací bedny. Tento způsob vyjmutí byl zvolen z obav ze ztráty vzorku vysypáním nesoudržných částí. Odběrný prstavec byl rozebrán a vyjmut vnitřní odběrný válec, který byl zabezpečen gumovými víky proti vysypání.

Tímto způsobem budou odebírány vzorky při výstavbě bentonitového těsnění experimentu. Budou tak získány vzorky k ověření dosažené objemové hmotnosti bentonitové části zátky. Odběry vzorků z testovací bedny prokázaly použitelnost a jednoduchost tohoto typu odběrů.

Z odebraných vzorků byla vyhodnocena objemová hmotnost. Vlhkost materiálu ($w = 17,4\%$) byla vyhodnocena jako průměrná hodnota z deseti odebraných vzorků z různých míst testovací bedny (Přílohy, Tab. 27).



Obr. 8 - vpravo – místa odběrů vzorků, vlevo – pelety po hutnění



Obr. 9 – vlevo - odběrový prstavec, vpravo – příprava odběru vzorku



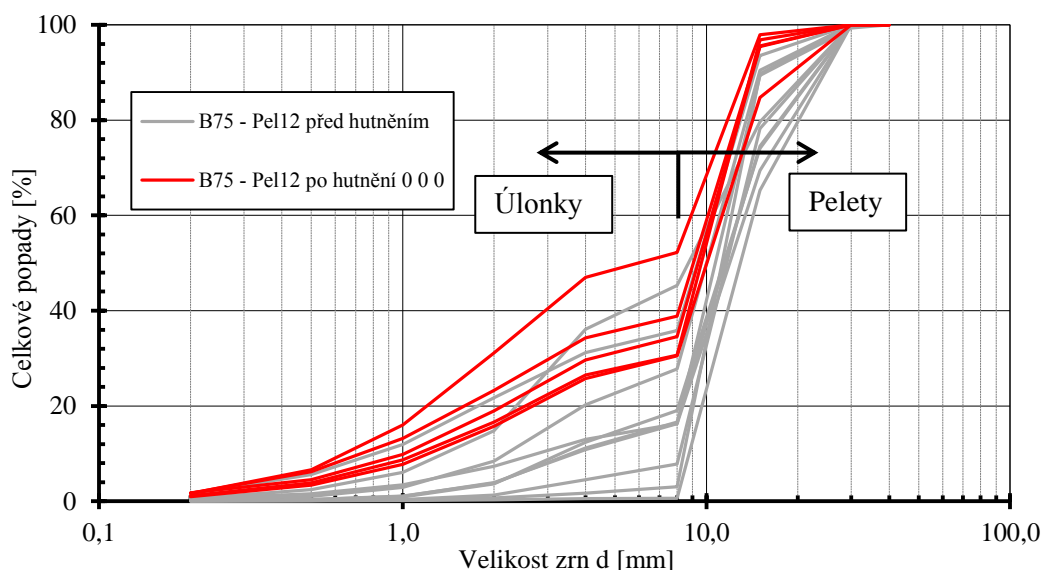
Obr. 10 – vlevo – vzorek po vyjmutí z bedny, uprostřed – zarovnaný vzorek ve vnitřním odběrním válci, vpravo – vážení

Na peletách byl proveden síťový rozbor (Obr. 11). Aby bylo zjištěno, do jaké míry hutnění ovlivní zrnitostní složení pelet (předpokládalo se, že hutněním bude část pelet rozdrvena), byl síťový rozbor proveden před a po hutnění. Změna zrnitostního složení je patrna na následujícím grafu (Graf 1).

Z porovnání křivek zrnitosti před a po hutnění je patrné, že během hutnění bylo určité množství pelet podrceno. Díky této úpravě zrnitosti materiálu podrcené menší kusy pelet vyplnily volné prostory v materiálu. Touto homogenizací bylo dosaženo vyššího zhutnění a splnění požadavku na suchou objemovou hmotnost.



Obr. 11 – síťový rozbor



Graf 1 – změna zrnitostního složení pelet před a po hutnění



7 Ověření kvality nástřiku bentonitu

Bentonitová bariéra v experimentu bude vystavěna z pelet. Pro pelety byl ověřen způsob hutnění, kterým byl dodržen požadavek na suchou objemovou hmotnost. Při postupném plnění bariéry bentonitem nastane stav, kdy (z důvodu snížení stropu) nebude možné bentonit dále hutnit vibrační deskou. Pro zaplnění takto nepřístupného přístropí rozrážky je zvolena technologie stříkaného bentonitu. Výzkum technologie stříkaného bentonitu, založené na technologii stříkaného betonu, probíhá v Centru experimentální geotechniky.

Pro stříkaný bentonit jsou stanovena stejná kritéria, jako pro pelety, které je nutno dodržet. Požadavek na suchou objemovou hmotnost stříkaného bentonitu je $\rho_d = 1400 \text{ kg.m}^{-3}$. Požadovaná objemová hmotnost stříkaného bentonitu bude zajištěna v případě, že bude vyvinuta vysoká kinetická energie stříkané směsi. Nástřik směsi bude realizován torkretovacím strojem SSB 14 DUO (Obr. 12, Filamos, 2015). Do stroje bude sypán bentonit, který bude hadicí dopravován stlačeným vzduchem k trysce, kde bude mísen s vodou. Jedná se o suchý způsob nástřiku. Pro ověření dosažení požadavků na materiál budou provedeny in-situ testy nástřiku směsi.



Obr. 12 – vlevo – stroj SSB 14 DUO, vpravo – tryska stroje

7.1 In-situ testy

Bylo provedeno celkem šest in-situ testů s materiálem B75 – recyklát (Tab. 4). Recyklát je vyráběn lisováním mezi dvěma rotačními válci a následně drcen. Jedná se o stejný bentonit, který bude ve formě pelet použit v experimentu. Bylo provedeno celkem deset nástřiků. Parametry nástřiků byly v průběhu testování měněny (Tab. 4). Testované parametry byly zrnitost materiálu B75, přítok záměsové vody do nástřikové trysky a délka nástřikové hadice (materiál: BC práce, Vozech, 2013).

Před testy byla sestavena a zkontrolována nástřiková sestava (torkretovací stroj, hadice a nástřiková tryska). Při provádění nástřiků byla nejdříve přivedena záměsová voda a upraven požadovaný průtok. Po regulaci průtoku vody byl spuštěn torkretovací stroj, do kterého byla nasypána směs příslušné zrnitosti. Směs byla dopravena k nástřikové trysce, v trysce smíšena s vodou a aplikována na nástřikovou stěnu. Na



stěně byla vytvořena souvislá vrstva materiálu. Po ukončení nástřiku byl vypnut stroj, přítokem vody pročištěna nástřiková tryska a následně vypnut přítok vody. Tímto způsobem byly provedeny všechny in-situ testy.



Obr. 13 – vlevo – nástřik, uprostřed – souvislý nástřik, vpravo – vzorky preparované parafinem

Tab. 4 – vyhodnocení nástřiků

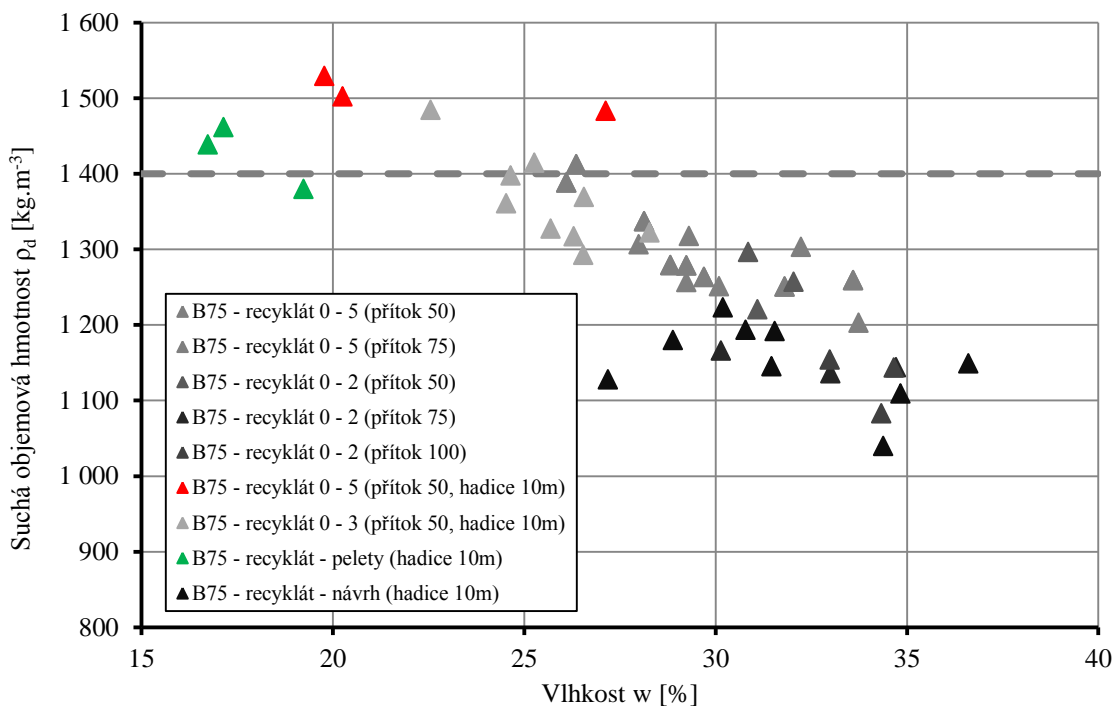
Testy	Nástřik	Materiál nástřiku	Zrnitost	Přítok	Délka hadice	Průměrná suchá objemová hmotnost
			[mm]	[l.min ⁻¹]	[m]	[kg.m ⁻³]
In-situ test č. 1	1	B75 - recyklát	0 - 5	50	20	1309
	2	B75 - recyklát	0 - 5	75	20	1237
In-situ test č. 2	3	B75 - recyklát	0 - 2	50	20	1258
	4	B75 - recyklát	0 - 2	75	20	1149
	5	B75 - recyklát	0 - 2	100	20	1127
In-situ test č. 3	6	B75 - recyklát	0 - 5	50	20	1309
	7	B75 - recyklát	0 - 5	50	10	1505
In-situ test č. 4	8	B75 - recyklát	0 - 3	50	20	1365
In-situ test č. 5	9	B75 - recyklát	pelety	50	20	1427
In-situ test č. 6	10	B75 - recyklát	návrh	50	20	1151

7.2 Vyhodnocení in-situ testů

Vyhodnocení objemové hmotnosti a vlhkosti vzorků odebraných z nástřiků probíhalo laboratorně. Okamžitě po provedení in-situ testu byly z nástřiku odebrány (vyříznuty) vzorky. Vlhkost byla stanovena gravimetricko metodou. Rozmezí vlhkostí po nástřiku $w \sim 16 - 37 \%$ (Přílohy, Tab. 28).

Objemová hmotnost byla stanovena parafinovou metodou. Odebrané vzorky byly po odběru z nástřikového kužele zváženy. Následně byly preparovány v roztaveném parafinu. Po vychladnutí byly vzorky zváženy pod vodou (Přílohy, Tab. 29), (Vybrané vlastnosti: BC práce, Vozech, 2013).

Ze získaných vlhkostí byly stanoveny suché objemové hmotnosti vzorků a byly vyhodnoceny in-situ testy. Z výsledného grafu (Graf 2) je patrné, který in-situ experiment splnil požadavky na dosažení suché objemové hmotnosti $\rho_d = 1400 \text{ kg.m}^{-3}$ (vodorovná přerušovaná čára v grafu) při vlhkosti materiálu $w \sim 19 - 27 \%$.



Graf 2 – výsledky nástřiků

Tento požadavek splnil materiál B75 zrnitosti (0 – 5), při průtoku záměsové vody 50 l.min^{-1} a délky dopravní hadice 10 m. Průměrná suchá objemová hmotnost dosažená v in-situ experimentu č. 3, nástřiku č. 7 byla stanovena jako průměr ze tří vzorků na $\rho_d = 1505 \text{ kg.m}^{-3}$.

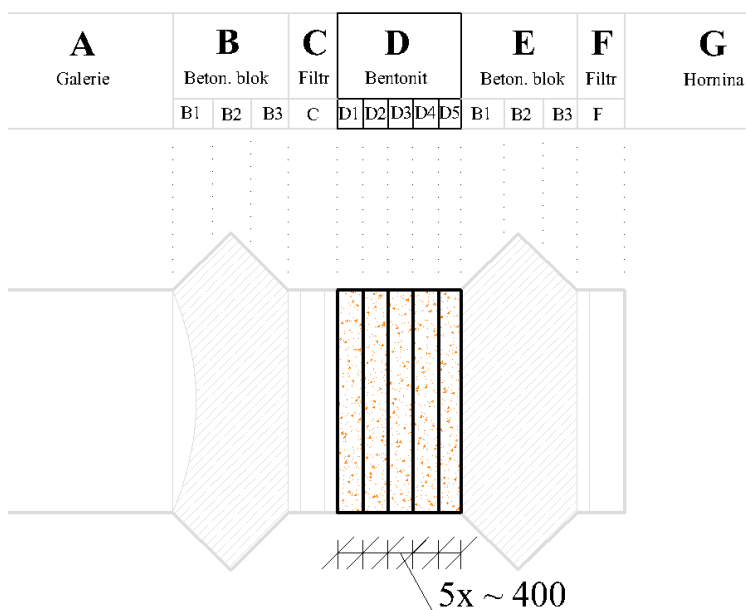
Požadavek splnil také materiál B75 (pelety), při průtoku záměsové vody 50 l.min^{-1} a délky dopravní hadice 10 m. Průměrná suchá objemová hmotnost dosažená v in-situ experimentu č. 5, nástřiku č. 10 byla stanovena jako průměr ze tří vzorků na $\rho_d = 1427 \text{ kg.m}^{-3}$. Při nástřiku pelet, díky vyšší frakci, došlo k zanesení nástřikové trysky. To by v případě realizace bentonitové bariéry nebylo žádoucí.



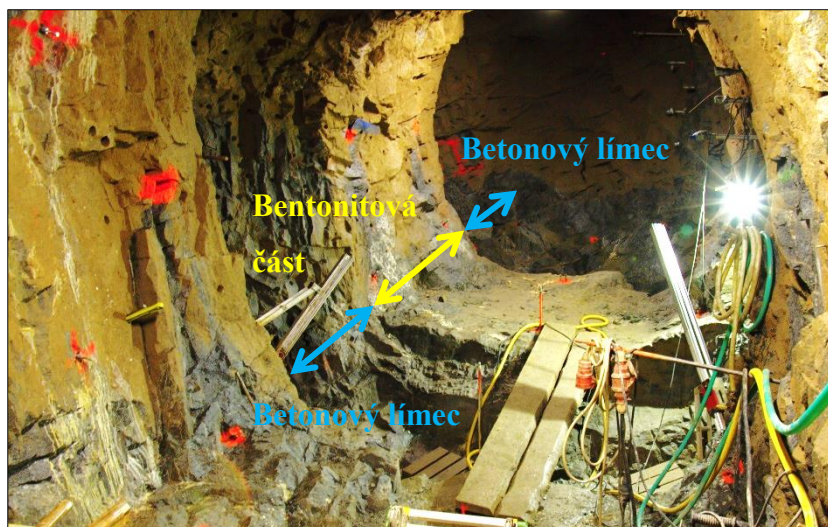
8 Monitoring bentonitové části zátky

Při výstavbě experimentu budou do všech částí zátky umístěny senzory. Při testování zátky budou monitorovat její chování. V bentonitové části experimentu bude sledována vlhkost TDR senzory („Time Domain Reflectometry“ – reflektometrická nepřímá metoda měření, viz níže Princip měření TDR), bobtnací tlak, pórový tlak a teplota.

Bentonitová část zátky byla pomyslně rozdělena do 5 svislých profilů (Obr. 14) o délce ~ 400 mm. V každém profilu nebo v kontaktu mezi profily budou instalovány měřící senzory. Je uvažováno 5 svislých profilů (D1 – D5) a 2 kontakty mezi profily (D1/2, D3/4). Výsledkem je 7 svislých řezů, které zobrazují umístění daných senzorů. Profily s instalovanými senzory (Svoboda et al., D3.18, 2014).



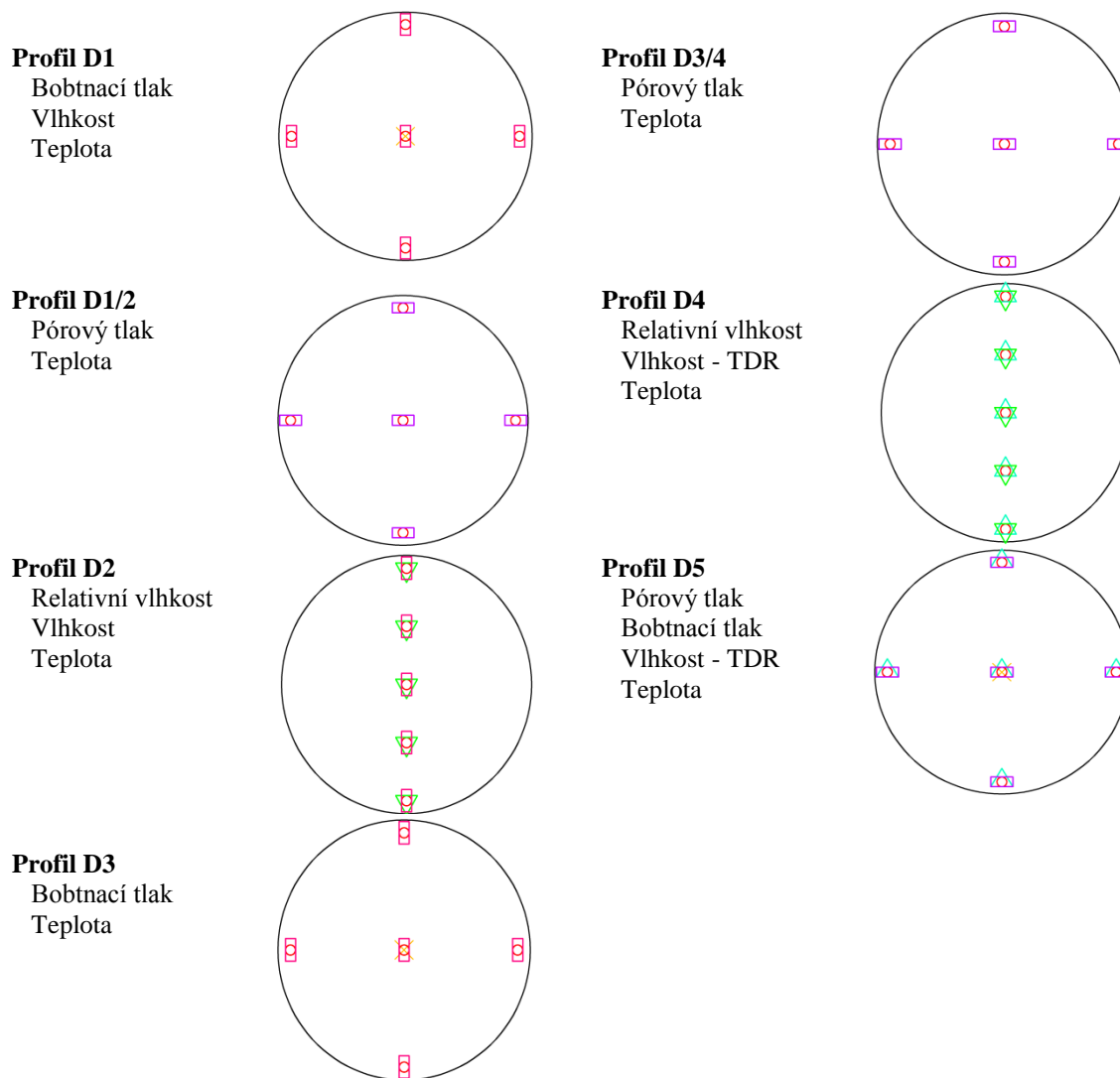
Obr. 14 – rozdělení bentonitové části experimentu na svislé profily



Obr. 15 – rozvržení částí experimentu v podzemí



Celkem 10 vlhkostních TDR senzorů bude instalováno v profilech D4 a D5. V profilu D5 (na kontaktu s betonovým blokem „E“) budou senzory rozmístěny do tvaru kříže a v profilu D4 budou instalovány ve svislém sloupci pod sebou (Obr. 16).



Obr. 16 - Přehled svislých profilů se senzory bentonitové části experimentu



9 Plán odběru vzorků

Plán odběrů vzorků byl stanoven na základě známé instrumentace celé zátky (Svoboda et al., *D3.18*, 2014) a závěrů z testů hutnění a nástřiků. Vzorky budou odebrány prstencem, který byl odzkoušen při odběrech vzorků v testech hutnění. Vzorky budou po odběru okamžitě zpracovány a bude vyhodnocena jejich objemová hmotnost a vlhkost.

Z bentonitové části experimentu bude odebráno celkem 35 vzorků ke zpracování z míst, kde budou instalovány senzory. Tuto hodnotu bude možné při výstavbě rozšířit. Vzorky podají dobrou představu o dosažené objemové hmotnosti.

Prostor bentonitové části je šířky a výšky ~ 4 m (celkový objem prostoru je 23,7 m³). Při dodržení hutnění vrstev mocnosti ~ 10cm se předpokládá, že bude zhutněno celkem 25 vrstev (výška 2,5 m) a volný prostor přístropí bude vyplněn stříkaným bentonitem (Tab. 5).

Tab. 5 – postup prací při hutnění

Postup	Odebraných vzorků	Instalované senzory				
		vlhkost (TDR)	relativní vlhkost	vlhkost	pórový tlak	bobtnací tlak
[Zhutněné vrstvy 1 = ~10cm]						
1 Hutnění vrstev 1 - 5						
2 Odběr / instalace	7	2	2	2	3	/
3 Hutnění vrstev 6 - 10						
4 Odběr / instalace	2	1	2	1	/	/
5 Hutnění vrstev 11 - 20						
6 Odběr / instalace	17	4	2	4	9	3
7 Hutnění vrstev 21 - 30						
8 Odběr / instalace	2	1	2	1	/	/
9 Nástřík 31 - 36						
10 Odběr / instalace	7	2	2	2	3	/
11 Nástřík 36 - 40						
Σ	35	10	10	10	15	3



10 Měření vlhkosti

10.1 Principy měření vlhkosti

Měření vlhkosti, tedy množství vody v daném materiálu (resp. jeho pórech) je možné rozdělit na dvě základní metody. Přímá, pokud je měřena přímo hmotnost vody obsažené ve vzorku a nepřímá, je-li měřena veličina závislá na obsahu vody ve vzorku.

Následuje stručné shrnutí přímých a nepřímých metod stanovení vlhkosti použitých v této práci. Cílem není řešit tyto metody.

10.1.1 Přímé metody

Stanovení vlhkosti materiálu se provádí přímo měřením hmotnostního podílu vody vůči pevné fázi. Je tedy nutné od pevné fáze oddělit vodu.

Vlhkost lze vyjádřit dvěma způsoby. Prvním z nich je tzv. vlhkost váhová (hmotnostní), definována jako poměr hmotnosti vody ve vzorku k hmotnosti pevné fáze (hmotnosti vysušeného vzorku). Hmotnostní vlhkost je pak vyjádřena definičním vzorcem:

$$w = \frac{m_w}{m_d} \cdot (100\%) = \frac{m - m_d}{m_d} \cdot (100\%) \quad [1]$$

kde m_d - hmotnost vysušeného vzorku
 m_w - hmotnost vody ve vzorku
 m - celková hmotnost vzorku

Druhý způsob jak lze definovat vlhkost je objemem vody (V_w) k objemu pevné fáze (V) vzorku. Definiční vzorec objemové hmotnosti je:

$$w_v = \frac{V_w}{V} \cdot (100\%) = w \cdot \frac{\rho_d}{\rho_w} \quad [2]$$

kde V - objem vysušeného vzorku
 V_w - objem vody ve vzorku
 ρ_d - objemová hmotnost vysušeného vzorku
 ρ_w - objemová hmotnost vody

10.1.2 Nepřímé metody

U nepřímých metod stanovení vlhkosti materiálu se jedná o měření veličin závislých na množství vody ve vzorku. Ze známých vztahů mezi měřenou veličinou a vlhkostí pak lze vlhkost vzorku určit. Metody jsou zaměřeny na změny elektrických vlastností (indukční, odporové, kapacitní) nebo změnu tepelných vlastností (součinitel tepelné vodivosti).



10.1.3 Výhody a nevýhody

Přímé metody stanovení vlhkosti jsou velice přesné a oproti metodám nepřímým je jen málo faktorů, které by ovlivnily výsledek. Nevýhodou však zůstává destruktivnost měřeného prostředí (nutnost odběru vzorků), časová náročnost na získání výsledků, pracnost přípravy vzorků (mnohdy není možné jejich získání) a neschopnost (popř. velická pracnost) kontinuálního měření. Nepřímé metody tyto nevýhody nemají, výsledky jsou okamžitě k dispozici, měření je nedestruktivní a snadno opakovatelné (možnost automatizace), ovšem na úkor menší přesnosti. Senzory je možné používat na různé typy materiálů nebo v různých půdních podmínkách. Takové měření však vyžaduje kalibraci měřících systémů, která pak může značně ovlivnit přesnost získaných výsledků.

10.2 Měření vlhkosti v experimentu

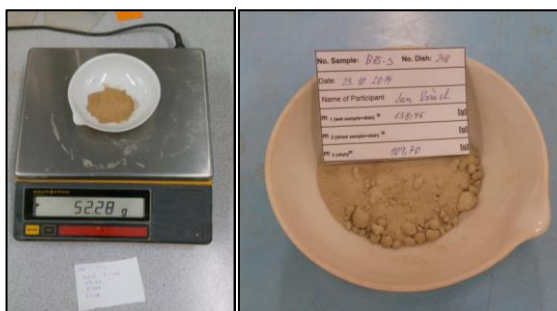
Měření vlhkosti bude prováděno přímou metodou v laboratorních podmínkách a nepřímou metodou v podzemí v experimentu.

V průběhu výstavby experimentu budou instalovány senzory zajišťující kontinuální měření vlhkosti. Společně s jejich instalací budou odebírány z vybraných míst bentonitové zátky vzorky pro laboratorní zjištění dosažené objemové hmotnosti. Laboratorní měření hmotnostní vlhkosti bude prováděno gravimetrickou metodou (viz níže). Vzorky odebrané při výstavbě určí počáteční „vstupní“ hodnoty, které napomohou zpřesnit měření instalovaných senzorů. Dále pomohou kontrolovat, zda technologií výstavby zátky budou dodrženy požadované vlastnosti. Po ukončení výstavby bentonitové části zátky a jejím zabetonování již nebude možné vzorky pro laboratorní měření odebírat.

Díky jejich neměnné pozici v zátce bude zajištěna kontinuálnost měření a výsledky podají představu o vývoji vlhkosti.

10.2.1 Gravimetrická metoda

Jedná se o přímou metodu měření hmotnostní vlhkosti. Měření bylo prováděno v laboratorních podmínkách. Principem metody je zjištění hmotnosti vlhkého (m) a suchého vzorku (m_d). Při vlastním laboratorním stanovením hmotnostní vlhkosti byla nejprve zvážena vysoušecí nádoba (m_1). Do nádoby byl umístěn vzorek (Obr. 17) a zvážen (m_2). V dalším kroku byl vzorek vysoušen. Vysoušení probíhalo v peci při teplotě $\sim 105 - 110^\circ\text{C}$. Normový postup (ČSN CEN ISO/TS 17892 - Část 1: Stanovení vlhkosti zemin) stanovuje měřit hmotnost resp. úbytek hmotnosti vzorku do ustálené hodnoty. To bylo zajištěno vysoušením vzorku (hmotnosti 40 ~ 90 g) po dobu minimálně dvou týdnů. Takto vysušený vzorek byl zvážen (m_3) a z výsledných hmotností byla vypočtena hmotnostní resp. objemová vlhkost daného vzorku.



Obr. 17 – Zvážený vzorek, připravený na vysoušení v peci

10.2.2 Princip měření TDR

TDR („Time Domain Reflectometry“) metoda využívá elektromagnetické pole k měření relativní (dielektrické) permitivity a elektrické vodivosti (konduktivity) okolního média (dielektrika). Měřená relativní permitivita a vodivost jsou vlastnosti okolního média, závislé na množství obsažené vody (Sedlák, 1993).

Relativní permitivita ϵ_r (dielektrická permitivita) je podíl permitivity daného materiálu (ϵ) a permitivity vakua (ϵ_0).

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad [3]$$

Relativní permitivita je bezrozměrná veličina, závislá na vlastnostech daného materiálu (materiálová konstanta). Vyjadřuje, kolikrát se zmenší elektrická síla tělesa s elektrickým nábojem, když bude umístěno v dielektriku (nevodivém prostředí) namísto vakua (též, kolikrát se zvětší kapacita kondenzátoru, umístí-li se mezi elektrody dielektrikum).

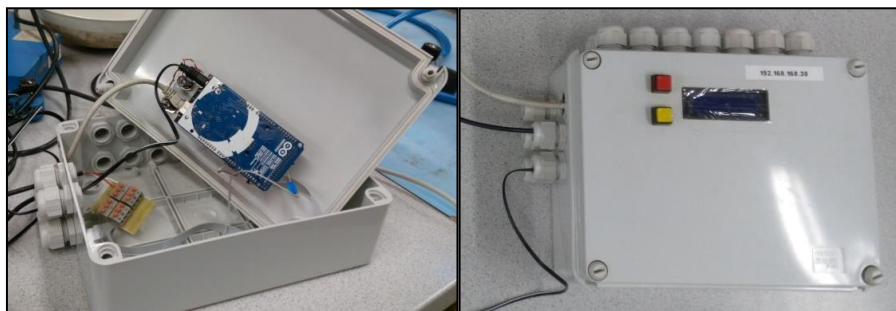
Tab. 6 – relativní permitivity některých materiálů

Materiál	Permitivita (ϵ_r)
vzduch	1,0
polystyren	2,6
papír	3,5
slída	7,0
sklo	7,6
křemík	12
voda	80

Vodivost je schopnost prostředí vést elektrický proud. Se zvyšující se vlhkostí prostředí se zvyšuje i jeho vodivost.

10.3 Řídící jednotka

Pro sběr a ukládání měřených dat byl použit vyrobený datalogger (Obr. 18). Datalogger byl použit jako prostředník mezi snímacím senzorem a serverem.



Obr. 18 – datalogger

10.4 Vlhkostní senzory

Americká firma „Decagon Devices“ vyrábí značné množství různých senzorů a laboratorní techniky pro široké spektrum využití. Specializují se na senzory pro měření atmosférických jevů, teploty, senzory pro využití v hydrologii a v neposlední řadě i měření vlhkosti.

Senzory pro měření vlhkosti vyhodnocují objemovou vlhkost, měří teplotu prostředí a některé i elektrickou vodivost. Výrobce nabízí od levnějších (jednoduché vlhkostní senzory, jako např. GS1 nebo EC-5 Obr. 19) až po dražší senzory (měřící více parametrů, s většími rozsahy hodnot a větší přesností měření, např. RT-1 nebo GS3, Obr. 20).

Pro vyhodnocení vlhkosti materiálu zátky budou použity senzory 5TE (Senzor 5TE, Decagon Devices, 2015).



Obr. 19 – vlhkostní senzory GS1 (vlevo) a EC-5 (vpravo)



Obr. 20 – vlhkostní senzory RT-1 (vlevo) a GS3 (vpravo)

10.5 Senzor 5TE

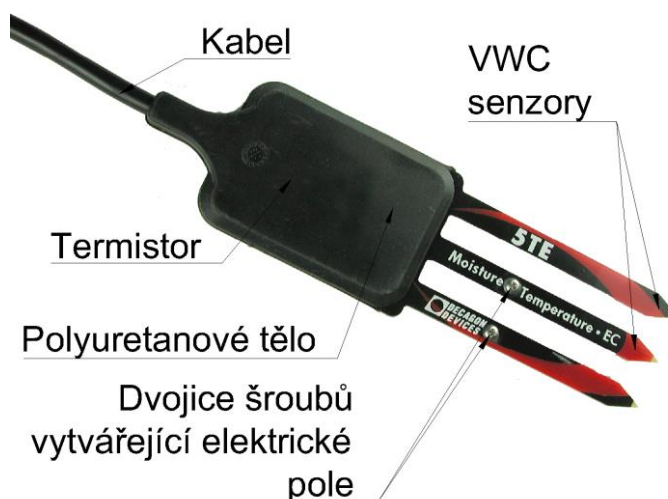
Vlhkostní senzor 5TE („Decagon’s 5TE Water Content, Temperature and Electrical Conductivity (EC) sensor“ Obr. 21), slouží ke stanovení objemové vlhkosti, kterou vypočítává v závislosti na měřených hodnotách relativní permitivity, elektrické konduktivity a teploty měřeného prostředí.



Senzor je vybaven 70 MHz oscilátorem, který vysílá vysokofrekvenční elektrické impulsy a následně měří čas od vyslání k zachycení impulsů, tedy pracuje na principu reflektometrie. Vlnění je v okolním médiu utlumeno a je pořízen záznam v podobě časových pulsů odezvy senzoru.

Senzor vytváří elektrické napětí mezi elektrodami a následně měří odpor mezi nimi. Vodivost pak lze snadno odvodit z odporu okolního média.

Teplota okolního prostředí je čtena povrchovým termistorem zalisovaným v polyuretanovém těle senzoru. Čtení probíhá z povrchu prostřední elektrody senzoru.



Obr. 21 – vlhkostní senzor 5TE

10.5.1 Specifikace

Následující tabulky informují o technických parametrech senzoru 5TE. Parametry jsou přebrány z produktového listu senzoru (5TE Water Content, EC and Temperature Sensor).

Tab. 7 – obecné rozměry senzoru 5TE

Rozměry:	10 / 3,2 / 0,7 cm
Délka jehel senzoru:	5,2 cm
Pracovní frekvence:	70 MHz
Měřený čas:	150 ms
Operační teplota:	-40 až 60°C
Délka kabelu:	5 m

Tab. 8 – rozsahy hodnot pro měření objemové vlhkosti senzoru 5TE

Rozsah	dielektrická permitivita (ϵ_a): 1 (vzduch) až 80 (voda)
Rozlišení	ϵ_a : 0,1 ϵ_a (-) od 1 do 20, < 0,75 ϵ_a (-) od 20 to 80 VWC: 0,0008 m ³ .m ⁻³ (0,08% VWC) od 0 do 50 % VWC
Přesnost	ϵ_a : ± 1 ϵ_a (-) v rozmezí od 1 do 40 (rozsah pro zeminy), ± 15 % od 40 do 80 (objemové vlhkosti)
	Použití rovnice dle Toppa: $\pm 0,03$ m ³ .m ⁻³ (± 3 % VWC) typické pro zeminy, které mají elektrickou vodivost < 10 dS.m ⁻¹
	Pro porézní média nutná kalibrace: $\pm 0,01$ do 0,02 m ³ .m ⁻³ (± 1 do 2 % VWC)



Tab. 9 – rozsahy hodnot měření elektrické vodivosti senzoru 5TE

Rozsah	0 až 23 dS.m ⁻¹
Rozlišení	0,01 dS.m ⁻¹ pro 0 až 7 dS.m ⁻¹ , 0,05 dS.m ⁻¹ pro 7 až 23 dS.m ⁻¹
Přesnost	±10 % pro 0 až 7 dS.m ⁻¹ , pro hodnoty 7 dS.m ⁻¹ nutná kalibrace

Tab. 10 – rozsahy hodnot měření teploty senzoru 5TE

Rozsah	-40 - 60°C
Rozlišení	0,1°C
Přesnost	± 1°C

10.6 Kalibrace senzoru 5TE

Kalibrace senzoru je důležitá k zajištění přesnosti měření. Čím důkladněji senzory kalibrujeme, tím přesnější měření můžeme očekávat.

U senzorů instalovaných v zátce bude před uložením provedena kalibrace pro materiál zátky. Při kalibraci budou hodnoty objemových vlhkostí vypočtených z měření relativní permitivity porovnány se skutečnými hodnotami objemových vlhkostí. Skutečné hodnoty budou stanoveny laboratorně gravimetrickou metodou. Na základě těchto měření bude stanovena jejich vzájemná závislost.

10.6.1 Výrobní kalibrace

Každý senzor 5TE je výrobcem kalibrován na měření permitivity prostředí v rozsahu 1 – 80 (-), tedy vzduch – voda. Při studiu vztahu mezi permitivitou a vlhkostí v zemině byla stanovena rovnice závislosti těchto hodnot, tedy závislost objemové vlhkosti na permitivitě (Topp, 1980). Rovnici lze použít pro minerální zeminy s měřitelnou vodivostí do 10 dS/m. V takovém případě senzor měří s přesností ± 3 % objemové vlhkosti. Pokud je požadována vyšší přesnost měření, je nutná vlastní kalibrace. Stejně tak pokud je použit senzor pro měření v zeminách s velmi vysokou vodivostí (>10 dS/m) nebo netypických zeminám. Kalibraci lze dosáhnout nepřesnosti měření až ± 1 – 2 %.

$$\theta = 4.3 \cdot 10^{-6} \cdot \varepsilon_r^3 - 5.5 \cdot 10^{-4} \cdot \varepsilon_r^2 + 2.92 \cdot 10^{-2} \cdot \varepsilon - 5.3 \cdot 10^{-2} \quad [4]$$

Kde: ε_r – relativní permitivita

θ – objemová vlhkost

10.6.2 Vlastní měření

Pro kalibraci senzoru bylo provedeno celkem devět sad měření. Všechny sady měření byly realizovány na materiálu B75. Bylo měřeno na sypkém materiálu, na materiálu ve formě pelet a na materiálu s vysokou objemovou hmotností ve formě lisovaných válcových těles (Obr. 22).

První (zkušební) měření mělo za úkol ověřit rozsahy měření a zjistit jak se senzorem zacházet. V každém dalším měření byla snaha co nejvíce potlačit nedostatky měření předešlého, ať už ohledně přípravy materiálu nebo instalace senzoru.



Obr. 22 – sypký materiál, pelety a tvarovky

Tab. 11 – časový harmonogram měření

Fáze 1.	5. 8. 2014	Zkušební měření
Fáze 2.	19. 8. 2014	Měření na materiálu s různými vlhkostmi
Fáze 3.	23. 10. 2014	Rozšíření měření sypkého materiálu
Fáze 4.	6. 11. 2014	Měření pelet
Fáze 5.	15. 1. 2015	Opakované měření sypkého materiálu
Fáze 6.	9. 3. 2015	Rozšíření měření pelet
Fáze 7.	26. 3. 2015	Měření vzorků vyšších objemových hmotností
Fáze 8.	7. 4. 2015	Měření saturovaných vzorků s vysokou objemovou hmotností
Fáze 9.	15. 4. 2015	Ověření funkčnosti v podzemí

10.6.3 Fáze 1. – zkušební měření

První vlastní měření se senzorem bylo provedeno pro představu o tom, jak se senzorem zacházet. Očekávání tohoto měření byla stanovena pouze odhadem z rozsahů hodnot měřených veličin (Tab. 8). Předpokládané hodnoty měřené permitivity byly stanoveny v rozsahu 2 – 10 [-].

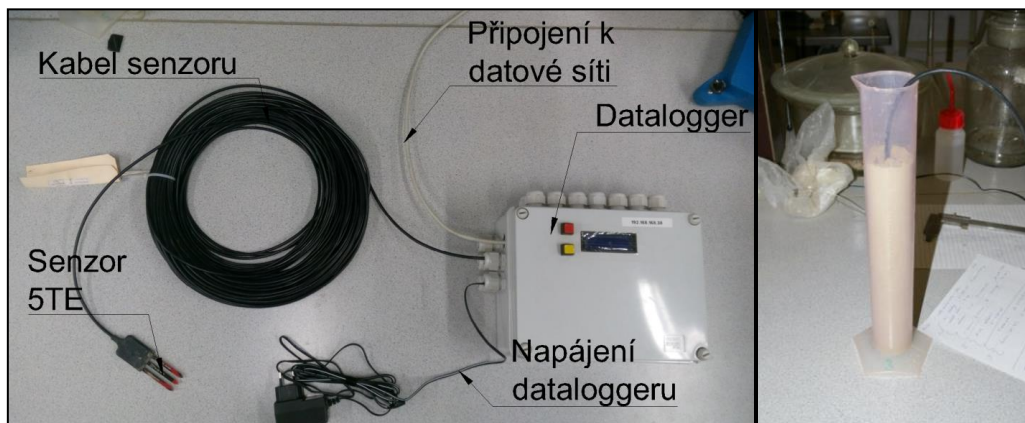
Pro první měření byl připraven vzorek bentonitu o přirozené vlhkosti $w \sim 8,00 \%$ (Přílohy, Tab. 31). Objemová hmotnost byla stanovena v průběhu měření, odečtením objemu vzorku v odměrném válci. V průběhu měření byla objemová hmotnost zvyšována.

Senzor byl před měřením zapojen k dataloggeru a datalogger pomocí datového kabelu připojen do datové sítě. Sestava senzoru a dataloggeru Obr. 23. Po načtení senzoru do datové sítě proběhlo pár měření na vzduchu a poté byl senzor využíván k vlastnímu měření. Měření mimo materiál ve Fázi 1 mělo prokázat, že senzor měří správně relativní permitivitu vzduchu $\epsilon_r \sim 1,00$, jako jednu ze dvou krajních mezí. Měření mimo materiál v nadcházejících Fázích mělo prokázat opakovatelnost měření.

Do odměrného válce známé hmotnosti ($m_{\text{válec}} = 133,14 \text{ g}$) a objemu ($V_{\text{válec}} = \text{max. } 1000 \text{ ml}$) byl volně nasypán vzorek bentonitu a lehce zhutněn (Obr. 23). Připravený vzorek byl zvážen a byl zjištěn objem vzorku. Do vzorku byl opatrně instalován (zatlačen) senzor. Senzor byl instalován tak, že měřicí jehly byly celé pod úrovní povrchu vzorku. Datalogger zaznamenává kontinuálně (po 10 min) od zapojení do datové sítě, pro přehlednost a zpětné vyhodnocení dat bylo nutné zaznamenávat jednotlivé časy měření. Vzhledem k vlastnímu času měření mohli další práce pokračovat za $\sim 20 \text{ min}$. Poté co senzor provedl záznam měření, byl vyjmut ze vzorku, aby při hutnění nedošlo k jeho poškození. Vzorek byl zhutněn, senzor byl stejným způsobem instalován zpět a měření bylo opakováno.



Bylo provedeno celkem pět sad měření. Každá sada obsahovala měření volně nasypaného a zhutněného vzorku. Mezi sadami měření byl odměrný válec vyčištěn a jiný vzorek stejného materiálu znovu nasypán. Bylo získáno celkem deset měření (Tab. 12) z pěti vzorků.

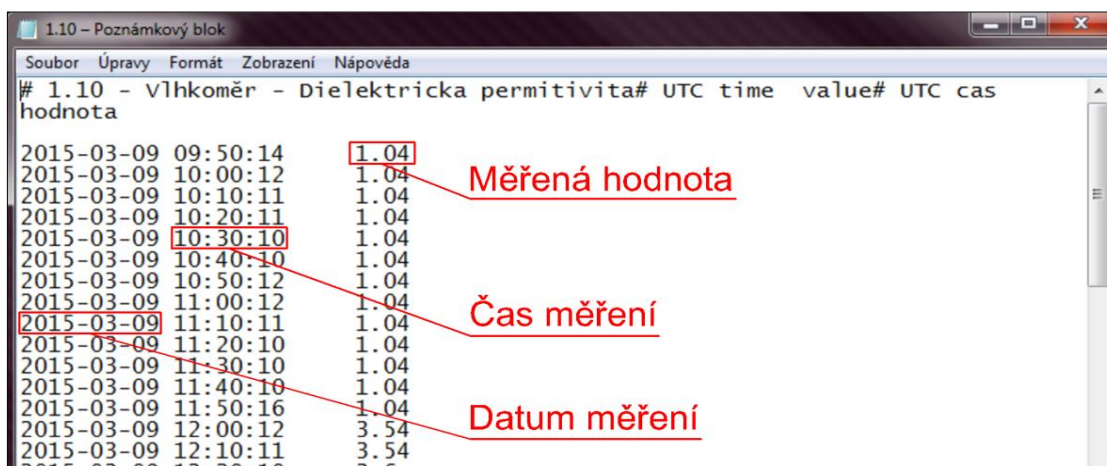


Obr. 23 – vlevo - měřící sestava, vpravo - odměrný válec s instalovaným senzorem při měření

10.6.4 Výsledky měření Fáze 1.

Data získaná ze serveru v podobě textových souborů (Obr. 24) jsou označena takto:

- Datum a čas měření
- Teplota (# 1,00 - Teploměr – Teplota)
- Permittivita (# 1,10 - Vlhkoměr - Dielektrická permitivita)
- Vodivost (# 1,20 - Vlhkoměr - Elektrická vodivost)
- Objemová vlhkost (# 1,30 - Vlhkoměr RH - Objemová vlhkost via permitivita)



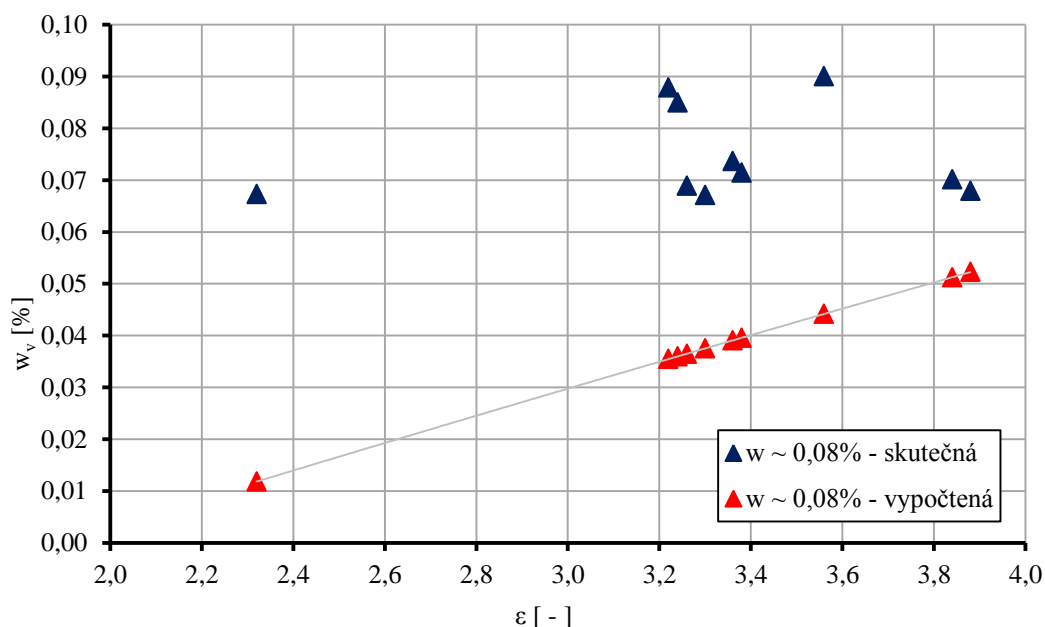
Obr. 24 – textový soubor s měřeními daty



Tab. 12 – Výsledky měření Fáze 1.

Měření	# 1,00 - Teplota	# 1,10 - Dielektrická permitivita	# 1,20 - Elektrická vodivost	# 1,30 - Objemová vlhkost	Hmotnostní vlhkost (skutečná)	Objemová vlhkost (skutečná)	Objemová hmotnost	Suchá objemová hmotnost
	T	ϵ	G	w_v	w	w_v	ρ	ρ_d
	[C°]	[-]	[dS.m ⁻¹]	[-]	[%]	[%]	[kg.m ⁻³]	[kg.m ⁻³]
1	22,3	3,38	0	0,0396	8,00	7,14	964	893
2	21,8	3,36	0	0,0391	8,00	7,36	994	920
3	22,9	3,3	0	0,0375	8,00	6,71	906	839
4	23,3	3,24	0	0,0360	8,00	8,49	1146	1061
5	23,4	3,26	0	0,0365	8,00	6,89	930	861
6	23,5	3,22	0	0,0355	8,00	8,79	1186	1098
7	23,5	2,32	0	0,0118	8,00	6,73	909	841
8	24,1	3,56	0	0,0442	8,00	9,00	1215	1125
9	23,7	3,88	0	0,0523	8,00	6,79	917	849
10	22,9	3,84	0	0,0513	8,00	7,02	947	877

Výsledný graf (Graf 3) představuje závislost permitivity a objemové vlhkosti daného materiálu. Červené hodnoty (Δ) znázorňují vypočtenou objemovou hmotnost dle Toppa [4], jak ukazuje proložená spojnice trendu. Modré hodnoty (Δ) představují skutečné objemové vlhkosti stanovené laboratorně na měřených vzorcích. Pro každou hodnotu permitivity je v grafu vynesena hodnota vypočtených (Δ) a skutečných (Δ) objemových vlhkostí. Legendy grafů budou vždy ukazovat hodnoty hmotnostních vlhkostí vzorků, na kterých bylo provedeno měření.



Graf 3 – měření Fáze 1 – závislost měřené permitivity na objemové vlhkosti

Důležitá data pro kalibraci, získaná z dataloggeru, jsou naměřené hodnoty permitivit se zaznamenaným časem měření. Abychom k těmto datům správně přiřadili odpovídající hodnoty



objemových vlhkostí, bylo nutné časy (při změně jakéhokoli parametru měření) zaznamenávat mimo měření. Jen tak bylo možné nalézt správnou dvojici permitivity a objemové vlhkosti.

Z výsledných hodnot (Přílohy, Tab. 30) je patrné, že místa kdy byl senzor v činnosti před umístěním do vzorku (řádky bez hodnot objemových hmotností), do určité míry odpovídají údajům od výrobce pro měření na vzduchu (permitivita $\epsilon_a = 1,10$). Toto měření na vzduchu bylo opakováno i bezprostředně po zkušebním měření. Naměřená permitivita vzduchu však dosahovala vyšších hodnot (permitivita až $\epsilon_a = 1,50$). To by znamenalo, že už při prvním měření lze dosáhnout chyby až $\sim 36\%$. Měření permitivity na vzduchu proto bylo v některých fázích opakováno. Rozdílné hodnoty permitivity na vzduchu před a po vlastním měření však nebyly v dalších fázích měření zaznamenány. První naměřená chyba byla zřejmě způsobena nanesenými nečistotami na jehlách, z toho důvodu byly jehly v dalším měření vždy čištěny.

Bylo nutné se zamyslet nad správností výsledných hodnot. Hodnoty permitivit měřených na různých vzorcích s téměř shodnou objemovou hmotností byly očekávány velmi podobné. Tónu neodpovídá např. měření v časech 10:00 a 11:20, kdy objemové hmotnosti vzorku byly téměř totožné, vlhkost vzorků byla shodná, ale hodnoty naměřené permitivity byly jiné (Tab. 13). Očekávaná hodnota permitivity byla v porovnání s ostatními výsledky $\sim 3,30$. Vzhledem k tomu, že každé měření proběhlo minimálně dvakrát na každém vzorku, pro každou objemovou hmotnost a měření v těchto případech bylo v obou záznamech shodné, chyba by neměla být v samotném senzoru, ale v prostředí měření. Suchá objemová hmotnost $\rho_d = 841 \text{ kg.m}^{-3}$ je poměrně malá hodnota. V takto „kyprém“ materiálu mohou vznikat místa, která jsou vyplněna vzduchem. Předpokladem zvládnutého měření je „dokonalý“ kontakt materiálu a jehel senzoru. Při nedodržení kontaktu pak může být měření značně chybné. K opačnému případu, tedy vyšší permitivity než je očekávaná hodnota, by mohlo dojít při instalaci senzoru. Jeho zatlačováním by se mohl materiál okolo jehel senzoru stlačit. Vnikl by tak prostor s větší objemovou hmotností a to by mohlo ovlivnit měření.

Při vystavení senzoru vyšším teplotám podnebí mohou být naměřené hodnoty nepřesné díky zalisovanému termistoru v černém polyuretanovém výlisku. Vzhledem k téměř konstantní teplotě v laboratoři a rozsahu měřených hodnot materiálu ($21,50 - 24,10^\circ\text{C}$), nebude uvažováno ovlivnění teplotou.

Tab. 13 - Porovnání rozdílných měření

Datum	Čas	# 1,00 - Teplota	# 1,10 - Dielektrická permitivita	# 1,20 - Elektrická vodivost	# 1,30 - Objemová vlhkost	Naměřená objemová hmotnost
5. 8. 2014	10:00	22,90	3,30	0,00	0,03753	838,50
5. 8. 2014	11:20	23,50	2,32	0,00	0,01184	841,28

V dalším měření byl kladen větší důraz na přípravu vzorků, snaha o dosažení vyšších objemových hmotností a vyšší preciznost při instalaci senzoru.



První měření prokázalo očekávání rozsahů hodnot měřené permitivity. Spodní hranice se pohybovala okolo $\varepsilon \sim 2$, horní hranice byla nadhodnocena a měření nepřesáhlo $\varepsilon \sim 4$. Očekávané hodnoty pro Fázi 2 byly upraveny na rozsah $\varepsilon \sim 2 - 5$.

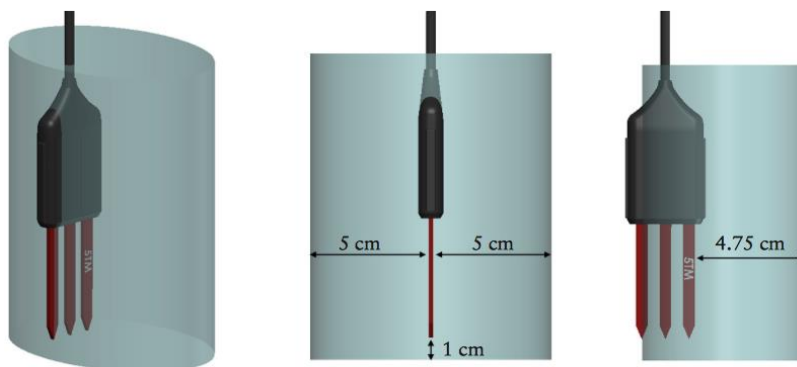
10.6.5 Fáze 2. - Měření na materiálu s různými vlhkostmi

Pro druhé měření bylo připraveno pět sad vzorků různých vlhkostí (Tab. 14). Jako první byl připraven bentonit přirozeně vlhký. Vzorky s vyšší vlhkostí byly připraveny z přirozeně vlhkého vzorku. Při přípravě byla k vzorku doplněna adekvátní hmotnost destilované vody. Ta byla vypočtena ze známých hmotností vzorků tak, aby výsledné vlhkosti připravovaných vzorků odpovídali hodnotám $w \sim 10, 15, 20, 25 \%$.

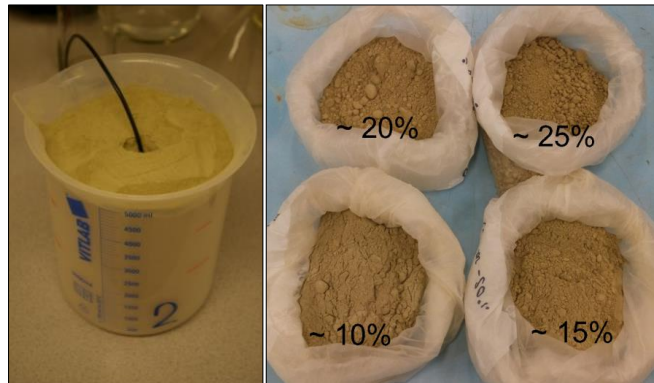
Přirozeně vlhký vzorek byl rozprostřen na pracovní desku stolu. Rozprostření bylo provedeno kvůli rychlejšímu vstřebání a rovnoměrné homogenizaci vlhkosti v celém vzorku. Na takto připravený vzorek bylo rozprášeno požadované množství vody. Při rozprašování byl vzorek promícháván. Připravený vzorek byl umístěn do igelitového pytle. V takto izolovaném vzorku dochází k homogenizaci vlhkosti, a proto byly vzorky připravovány minimálně dva týdny před měřeními.

Po homogenizaci vlhkosti byly z každého pytle odebrány tři vzorky z různých míst pro zjištění skutečné vlhkosti. Ze tří hodnot naměřených vlhkostí byl vypočten průměr, který byl považován za vlhkost vzorku.

Měření senzorem probíhalo ve větších odměrných válcích ($m_{1\text{válec}} = 454,7 \text{ g}$, $m_{2\text{válec}} = 448,34 \text{ g}$) o objemu ($V_{1,2\text{válec}} = \text{max. } 5000 \text{ ml}$) viz Obr. 26. Větší odměrné válce byly zvoleny pro dodržení větších vzdáleností doporučených výrobcem od okrajů měřících nádob (Obr. 25). V opačném případě by se mohl impuls odrazit od stěn a způsobit nepřesnosti v měření. Toto doporučení nebylo ve vlastním měření prokázáno. Měření na větších odměrných válcích proběhlo pouze na přirozeně vlhkém materiálu a dále od něj bylo upuštěno. Důvodem opětovného používání odměrných válců menších objemů bylo zpřesnění odečítání objemu vzorků a nižší množství materiál nutného k měření. Instalace senzoru a vlastní měření proběhlo stejně jako ve Fázi 1. Do nasypného vzorku byl instalován senzor a proběhlo měření. Po každé sadě měření byl senzor vyjmut a očištěn.



Obr. 25 - schéma instalace senzoru s doporučenými vzdálenostmi

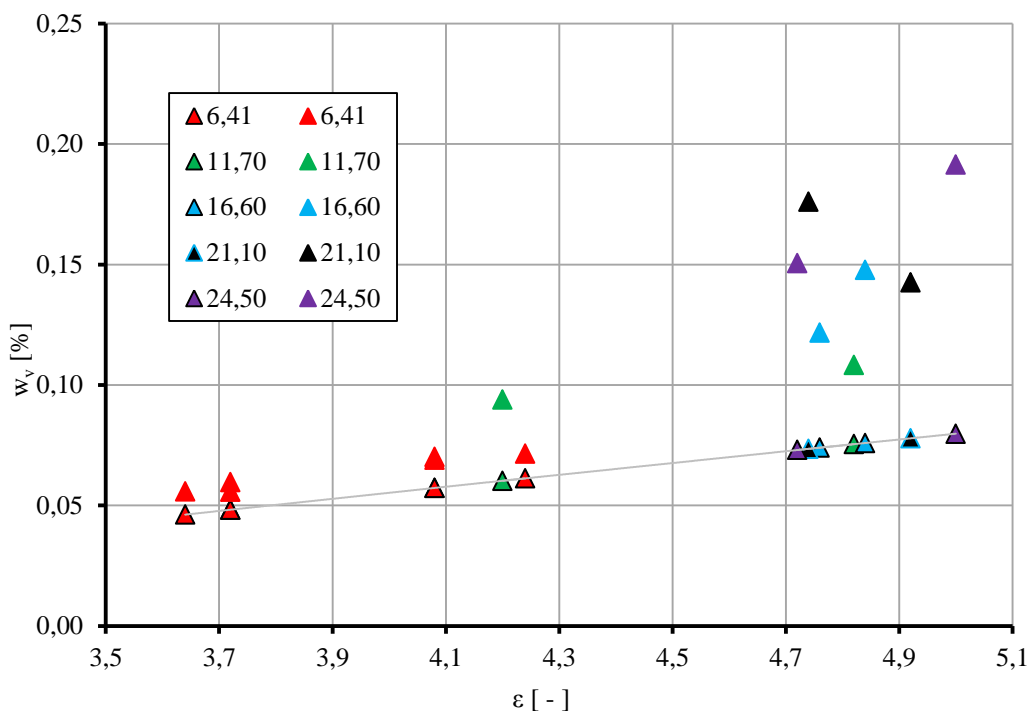


Obr. 26 – vlevo – větší odměrný válec – materiál přitroženě vlhký, vpravo – připravené vzorky vyšších vlhkostí

10.6.6 Výsledky měření Fáze 2.

Tab. 14 - Výsledky měření Fáze 2.

Měření	# 1,00 - Teplota	# 1,10 - Dielektrická permitivita	# 1,20 - Elektrická vodivost	# 1,30 - Objemová vlhkost	Hmotnostní vlhkost (skutečná)	Objemová vlhkost (skutečná)	Objemová hmotnost	Suchá objemová hmotnost
	T	ϵ	G	w_v	w	w_v	ρ	ρ_d
	[C°]	[-]	[dS.m ⁻¹]	[-]	[%]	[%]	[kg.m ⁻³]	[kg.m ⁻³]
1	18,70	3,64	0,00	0,0462	6,41	5,58	926	871
2	19,60	4,08	0,00	0,0573	6,41	7,01	1164	1094
3	21,20	3,72	0,00	0,0482	6,41	5,96	990	930
4	20,70	4,24	0,00	0,0612	6,41	7,15	1187	1115
5	21,00	3,72	0,00	0,0482	6,41	5,57	924	869
6	21,30	4,08	0,00	0,0573	6,41	6,89	1144	1075
7	21,70	4,20	0,00	0,0603	11,70	9,40	897	803
8	22,10	4,82	0,00	0,0754	11,70	10,83	1034	925
9	22,50	4,76	0,10	0,0740	16,60	12,17	855	733
10	22,40	4,84	0,20	0,0759	16,60	14,77	1037	890
11	22,40	4,92	0,30	0,0779	21,10	14,26	818	676
12	22,50	4,74	0,00	0,0735	21,10	17,60	1010	834
13	22,40	4,72	0,00	0,0730	24,50	15,05	765	614
14	22,40	5,00	0,40	0,0798	24,50	19,15	973	782



Graf 4 - měření Fáze 2 – závislost měřené permitivity na objemové vlhkosti

Měřením ve Fázi 2 bylo získáno celkem čtrnáct měření. Prvních šest bylo měřeno na přirozeně vlhkém materiálu, kdy byl sypký materiál volně nasypán a změřen a poté jednou zhutněn a opět změřen. Stejný postup byl proveden i na vzorcích vyšších vlhkostí.

V grafu závislosti objemové vlhkosti a permitivity (Graf 4) jsou vykresleny výsledky měření. Značky s obrysem černé barvy (položené na spojnici trendu) jsou hodnoty objemových vlhkostí vypočtených dle Toppa [4] z měřených hodnot permitivit. Značky bez obrysové barvy jsou hodnoty skutečných objemových vlhkostí.

Z druhého měření je patrné, že skutečné hodnoty (nad spojnicí trendu) mají podobný rostoucí charakter jako Toppova rovnice. Hodnoty modrých ($w = 16,6\%$) značek mají oproti ostatním mnohem větší rostoucí charakter a hodnoty černých ($w = 21,1\%$) značek naopak charakter klesající. Tyto výsledky byly přisouzeny špatné instalaci senzoru a nehomogenitě materiálu.

Pro další měření byl stanoven cíl dosáhnout minimálně tří různých objemových hmotností na každém měřeném vzorku. Tři hodnoty tak podávají lepší představu o závislosti měřených hodnot. Dále pak příprava vzorků vyšších vlhkostí, tedy širší spektrum hodnot na ose objemové vlhkosti.

10.6.7 Fáze 3. - Rozšíření měření sypkého materiálu

Pro Fázi 3 bylo připraveno pět sad nových vzorků sypkého materiálu (Obr. 27). Stejně jako pro měření Fáze 2, byly ze vzorku přirozeně vlhkého připraveny vzorky vyšších vlhkostí. Cílem bylo připravit vzorky vlhkostí $w \sim 10, 20, 30, 40, 50\%$. Skutečné laboratorně stanovené vlhkosti Tab. 15.



Instalace senzoru a vlastní měření proběhlo podobně jako ve Fázi 1 a 2. Nejprve byl do odměrného válce volně nasypan bentonit, do něj byl instalován senzor a bylo provedeno měření. Dále byl vzorek zhutněn a opět změřen. Tento postup hutnění a měření byl proveden ještě jednou. Bylo tak dosaženo tří různých objemových hmotností (Tab. 15) na jednom vzorku. Díky třem změřeným hodnotám bylo možné přesněji určit závislost měřených hodnot permitivity na objemové vlhkosti. Mezi každou změnou parametru měření (vlhkost, objemová hmotnost) byl senzor vyjmut a očištěn.

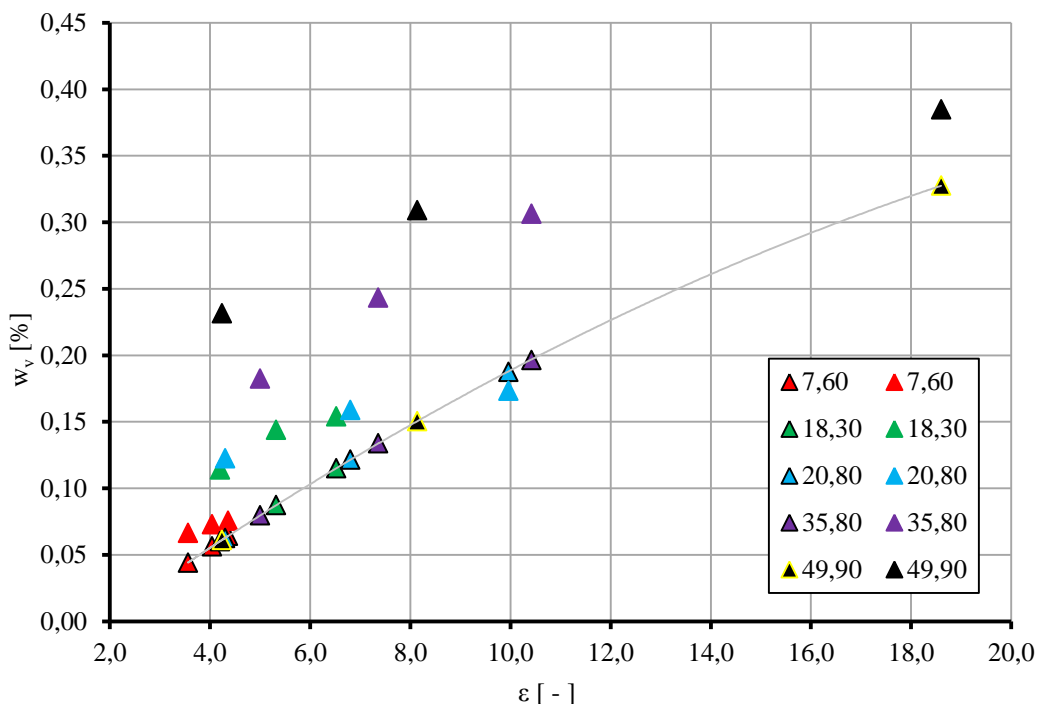


Obr. 27 – připravené vzorky pro měření Fáze 3.

10.6.8 Výsledky měření Fáze 3.

Tab. 15 - Výsledky měření Fáze 3.

Měření	# 1,00 - Teplota	# 1,10 - Dielektrická permitivita	# 1,20 - Elektrická vodivost	# 1,30 - Objemová vlhkost	Hmotnostní vlhkost (skutečná)	Objemová vlhkost (skutečná)	Objemová hmotnost	Suchá objemová hmotnost
	T	ϵ	G	w_v	w	w_v	ρ	ρ_d
	[C°]	[-]	[dS.m ⁻¹]	[-]	[%]	[%]	[kg.m ⁻³]	[kg.m ⁻³]
1	20	3,56	0,00	0,04	7,60	6,65	942	876
2	20,3	4,04	0,00	0,06	7,60	7,29	1032	959
3	20,5	4,36	0,00	0,06	7,60	7,56	1071	995
4	20,2	4,20	0,30	0,06	18,30	11,41	738	623
5	20,3	5,32	0,60	0,09	18,30	14,39	930	786
6	20,5	6,52	1,10	0,12	18,30	15,41	996	842
7	20,1	4,30	0,30	0,06	20,80	12,26	712	589
8	20,1	6,80	1,70	0,12	20,80	15,89	923	764
9	20,6	9,96	10,30	0,19	20,80	17,34	1007	834
10	20,3	5,00	2,20	0,08	35,80	18,25	692	510
11	19,7	7,36	5,30	0,13	35,80	24,34	923	680
12	19,4	10,42	5,90	0,20	35,80	30,64	1162	856
13	19,4	4,24	0,40	0,06	49,90	23,17	696	464
14	19,1	8,14	8,60	0,15	49,90	30,90	928	619
15	19,4	18,60	19,80	0,33	49,90	38,49	1156	771



Graf 5 - měření Fáze 3 – závislost měřené permitivity na objemové vlhkosti

V měření fáze 3. bylo dosaženo cílů stanovených v předešlém měření. Při přípravě vzorků bylo dosaženo vyšších vlhkostí (až ~ 50 %) a při měření bylo na každém vzorku opakovaným hutněním dosaženo tří objemových hmotností. Ve výsledném grafu (Graf 5) je lépe vidět závislost měřených veličin.

V další fázi budou měřeny pelety. Pro pelety je očekáván větší rozptyl měření. Měřené hodnoty se také očekávají podhodnocené. Pelety s objemovou hmotností $\rho \sim 2000 \text{ kg.m}^{-3}$ a sypký materiál, který při volném nasypání dosahuje objemové hmotnosti $\rho \sim 900 \text{ kg.m}^{-3}$, lze považovat za značně nehomogenní materiál. Měření tedy bude závislé na umístění instalovaného čidla.

10.6.9 Fáze 4. – Měření pelet

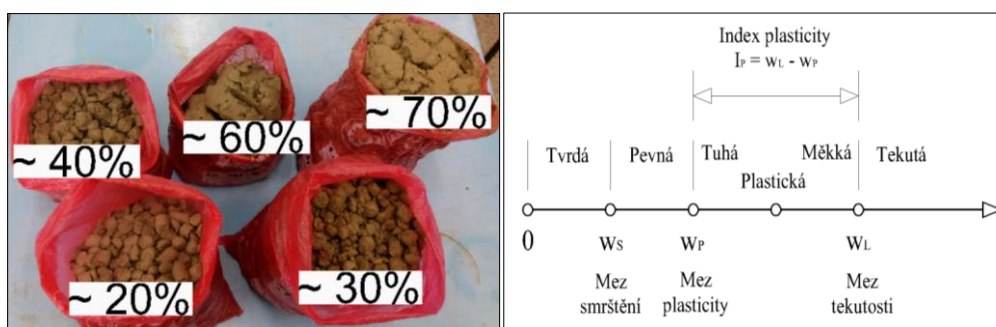
Pro měření Fáze 4 bylo připraveno pět vzorků materiálu ve formě pelet (Obr. 28). Materiál byl připraven stejně jako sypký materiál. Ze vzorku přirozeně vlhkého byly připraveny vzorky vyšších vlhkostí. Cílem bylo připravit pět sad vzorků vlhkostí $w \sim 20, 30, 40, 50$ a 60% (dosažené vlhkosti na peletách Tab. 17). Pelety se po smíchání s potřebným množstvím vody nechaly odležet. Pro zajištění dostatečné homogenizace vlhkosti pelet byl časový interval oproti sypkému materiálu prodloužen ze dvou týdnů na jeden měsíc.

První tři sady vzorků byly pod mezi plasticity a zbylé dvě sady nad mezi plasticity. Plasticita zeminy je definována jako rozsah vlhkosti mezi hodnotou meze plasticity a meze tekutosti (Obr. 28). Rozsah plastického stavu zeminy je vyjádřen indexem plasticity $I_p = w_l - w_p$. Norma ČSN EN 1997-1 (73 1000) definuje oblast extrémně vysoké plasticity pro $I_p > 50 \%$ a $w_l > 90 \%$. Vlhkostní meze Ca-Mg bentonitů, tedy i B75, Tab. 16. Sady vzorků pro měření s vlhkostí $w \sim 58$ a 69% jsou v plastickém stavu. V tomto



stavu se značně zhoršuje manipulovatelnost se vzorky. Materiál se nechoval jako sypký, ale jako plastický. U materiálu v plastickém stavu bylo obtížné odečítat objem v odměrném válci.

Při instalaci senzoru bylo postupováno velice opatrně, aby nedošlo k jeho poškození. Bylo nutné použít větší sílu. U vzorků s vlhkostí za mezí plasticity nebylo téměř možné senzor bezpečně instalovat. Do vzorku proto byly předem vyryty drážky, kam mohl být senzor instalován. Vzorek s připravenou vlhkostí $w \sim 69\%$ byl z měření vynechán. S materiálem takto vysoké vlhkosti nebylo možné pracovat. Senzor nemohl být instalován jako v předešlých vzorcích.



Obr. 28 – vlevo - připravené vzorky pro měření Fáze 4, vpravo – vlhkostní meze

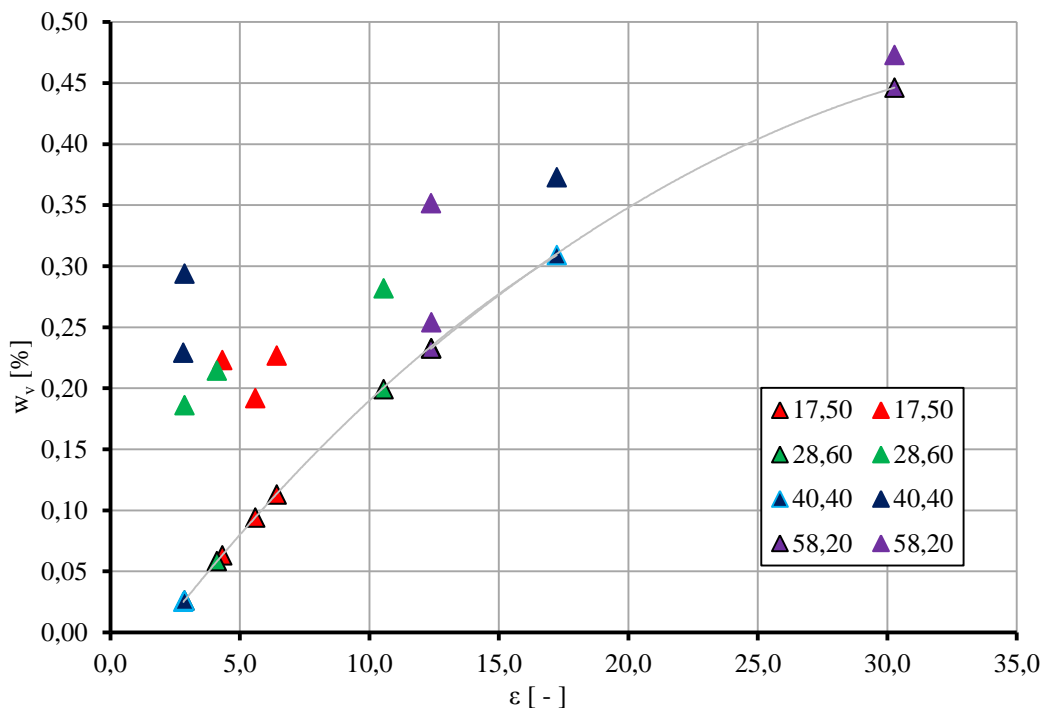
Tab. 16 – vlhkostní meze Ca-Mg bentonitu

Vlastnosti		B75
Mez tekutosti	w_L	134
Mez plasticity	w_P	44
Index plasticity	I_P	90

10.6.10 Výsledky měření Fáze 4.

Tab. 17 - Výsledky měření Fáze 4.

Měření	# 1,00 - Teplota	# 1,10 - Dielektrická permitivita	# 1,20 - Elektrická vodivost	# 1,30 - Objemová vlhkost	Hmotnostní vlhkost (skutečná)	Objemová vlhkost (skutečná)	Objemová hmotnost	Suchá objemová hmotnost
	T	ϵ	G	w_v	w	w_v	ρ	ρ_d
	[C°]	[-]	[dS.m ⁻¹]	[-]	[%]	[%]	[kg.m ⁻³]	[kg.m ⁻³]
1	19,1	5,60	0,10	0,09	17,50	19,19	1289	1097
2	18,8	6,42	0,20	0,11	17,50	22,68	1523	1296
3	19,1	4,32	0,00	0,06	17,50	22,31	1498	1275
4	19	2,86	0,00	0,03	28,60	18,61	837	651
5	19,2	4,12	3,50	0,06	28,60	21,43	964	749
6	552,7	10,56	10,00	0,20	28,60	28,18	1267	985
7	19,3	2,82	0,00	0,03	40,40	22,92	796	567
8	18,8	2,86	0,00	0,03	40,40	29,38	1021	727
9	19,2	17,24	29,60	0,31	40,40	37,26	1295	922
10	550,9	12,40	25,50	0,23	58,20	25,41	691	437
11	19,1	12,38	25,50	0,23	58,20	35,14	955	604
12	19,2	30,28	35,50	0,45	58,20	47,29	1285	813



Graf 6 - měření Fáze 4 – závislost měřené permitivity na objemové vlhkosti

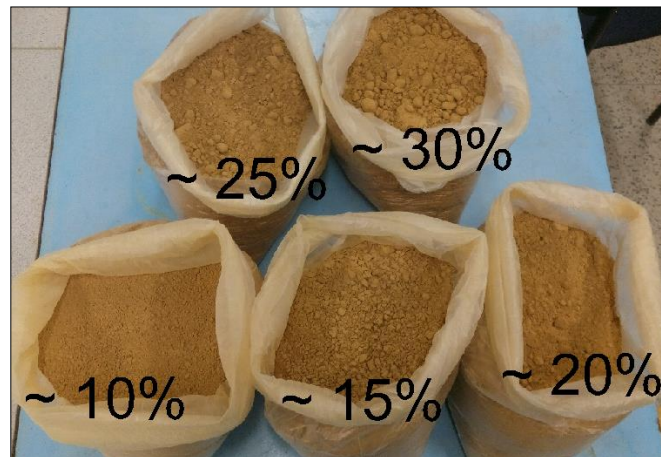
Výsledky měření Fáze 4 se shodují s předpokladem pro toto měření. Nelze říci, zda jsou výsledky podhodnocené, ale pro každé tři změřené hodnoty nelze jednoznačně určit závislost, tak jako u předchozích měření sypkého materiálu. Pro lepší představu o peletách je nutné měření na tomto materiálu opakovat a rozšířit.

V nadcházející fázi bude opakováno měření na sypkém materiálu.

10.6.11 Fáze 5. – Opakované měření sypkého materiálu

Ve Fázi 5 bylo opakováno měření na sypkém materiálu. Bylo využito veškerých poznatků z předchozích měření. Bylo celkem vyrobeno pět sad vzorků různých vlhkostí (Obr. 29). Cílem bylo připravit vlhkosti $w \sim 10, 15, 20, 25, 30$ %. Skutečné vlhkosti materiálu Tab. 18.

Každý vzorek byl nejdříve volně nasypán a následně proběhlo měření. Po doměření byl vzorek zhutněn a znovu změřen. Tento postup hutnění a měření byl na každém vzorku proveden ještě třikrát. Na každém z pěti vzorků tak bylo dosaženo pěti různých objemových hmotností.

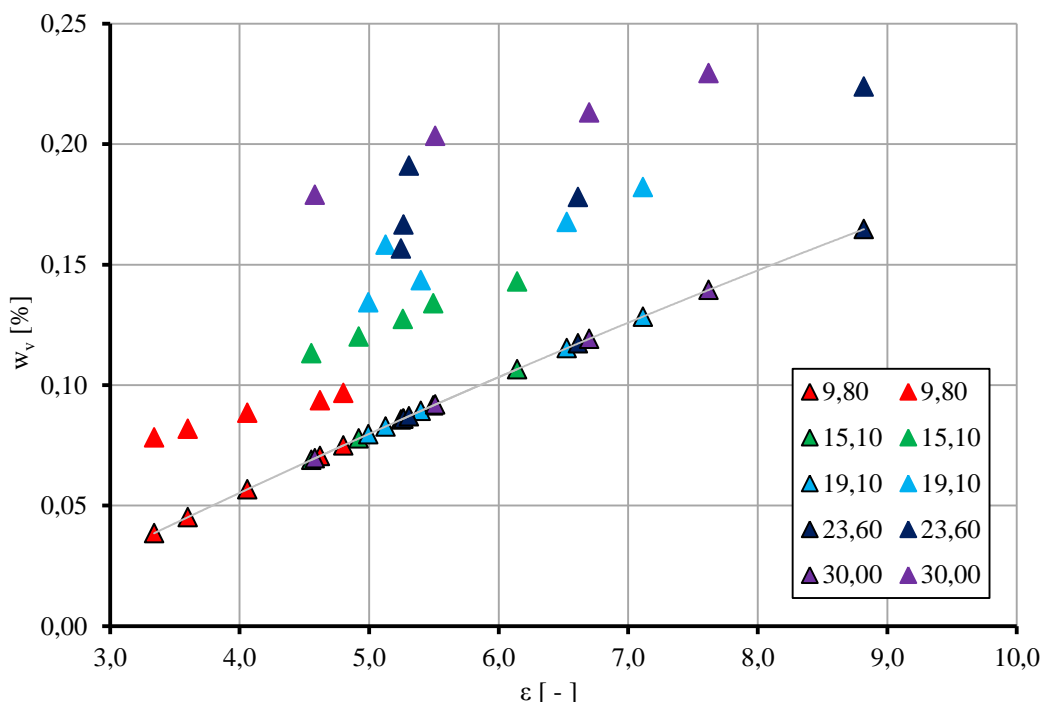


Obr. 29 - připravené vzorky pro měření Fáze 5.

10.6.12 Výsledky měření Fáze 5.

Tab. 18 - Výsledky měření Fáze 5.

Měření	# 1,00 - Teplota	# 1,10 - Dielektrická permitivita	# 1,20 - Elektrická vodivost	# 1,30 - Objemová vlhkost	Hmotnostní vlhkost (skutečná)	Objemová vlhkost (skutečná)	Objemová hmotnost	Suchá objemová hmotnost
	T	ϵ	G	w_v	w	w_v	ρ	ρ_d
	[C°]	[-]	[dS.m ⁻¹]	[-]	[%]	[%]	[kg.m ⁻³]	[kg.m ⁻³]
1	12,80	3,34	0,00	0,039	9,80	7,83	877	799
2	13,63	3,60	0,00	0,045	9,80	8,19	918	836
3	14,73	4,06	0,00	0,057	9,80	8,85	991	903
4	15,38	4,62	0,00	0,071	9,80	9,36	1049	956
5	16,45	4,80	0,00	0,075	9,80	9,67	1084	987
6	14,28	4,56	0,00	0,069	15,10	11,33	863	750
7	14,50	4,92	0,00	0,078	15,10	12,02	916	796
8	15,65	5,26	0,10	0,086	15,10	12,75	972	844
9	16,10	5,50	0,10	0,092	15,10	13,40	1021	887
10	19,80	6,14	0,14	0,107	15,10	14,30	1090	947
11	19,00	4,99	0,10	0,080	19,10	13,44	838	704
12	18,87	5,40	0,20	0,089	19,10	14,36	895	752
13	18,77	5,13	0,20	0,083	19,10	15,82	987	829
14	18,70	6,53	0,60	0,115	19,10	16,77	1045	878
15	19,00	7,11	1,20	0,128	19,10	18,22	1136	954
16	18,87	5,25	0,33	0,086	23,60	15,67	821	664
17	18,40	5,27	0,40	0,086	23,60	16,67	873	706
18	18,53	6,61	1,00	0,117	23,60	17,80	932	754
19	18,53	5,31	1,67	0,083	23,60	19,11	1001	810
20	18,67	8,82	4,33	0,165	23,60	22,38	1172	948
21	18,90	4,58	0,60	0,070	30,00	17,90	776	597
22	18,65	5,51	0,60	0,092	30,00	20,34	882	678
23	18,65	6,70	0,90	0,119	30,00	21,31	923	710
24	18,55	7,62	2,70	0,139	30,00	22,95	995	765



Graf 7 - měření Fáze 5 – závislost měřené permitivity na objemové vlhkosti

Měření Fáze 5 splnilo stanovená očekávání. Na pěti sadách vzorků bylo naměřeno celkem dvacet čtyři hodnot. Na vzorku s vlhkostí $w \sim 30\%$ bylo dosaženo čtyřnásobného zhutnění. Příčinou byla kombinace vysoké objemové hmotnosti a vysoké vlhkosti.

Z graficky znázorněných výsledků je pak patrná rostoucí závislost měřených hodnot.

10.6.13 Fáze 6. – Rozšíření měření pelet

Ve Fázi 6 bylo opakováno měření na peletách. Jednalo se o ten samý materiál, který byl použit ve Fázi 4. Změřením vlhkosti materiálu bylo prokázáno, zda došlo ke změně. Od přípravy vzorků (23. 10. 2014) až do měření ve Fázi 6 (9. 3. 2015) se vlhkost snižovala (Tab. 19). Snížení je patrnější u vzorků s vyšší vlhkostí, kdy došlo k úbytku až $\sim 11\%$.

Úkolem opakovaného měření na materiálu pelet bylo rozšířit data z měření fáze 4 a pokusit se lépe zvládnout měření na peletách s vlhkostí nad $\sim 50\%$.

Nejprve byl změřen materiál přirozeně vlhký. Měření bylo provedeno ve velkém odměrném válci ($m_v = 448,20\text{ g}$), do kterého byl nejprve umístěn senzor, který byl následně opatrně obsypán peletami (Obr. 30). Po změření volného nasypání byl vzorek zhutněn, proběhlo měření a následně znovu zhutněn a změřen. Vzhledem k nemožnosti vyjmutí senzoru bylo hutnění prováděno pomalu se senzorem uvnitř vzorku. Hutnění bylo provedeno s pomocí prosévacího přístroje (Obr. 30). Tento postup byl aplikován na vzorky, které se do určité míry chovaly jako sypký materiál, tedy vzorky o vlhkosti $w = 15,7$ a $25,6\%$. U vzorků vyšších vlhkostí byl zvolen jiný postup.



Obr. 30 – vlevo - instalovaný senzor pro měření pelet, vprostřed - obsypání peletami, vpravo – hutnění

Tab. 19 – změna vlhkosti na materiálu pelet

Datum	1. měření (Fáze 4)	2. měření (Fáze 6)
	6. 11. 2014	9. 3. 2015
Vzorek	Vlhkost [%]	
~ 10 %	17,5	15,7
~ 20 %	28,6	25,6
~ 30 %	40,4	31,6
~ 40 %	58,2	47,4
~ 50 %	69,2	58,1

Vzorky s vyšší vlhkostí se chovají plasticky, nebylo tedy možné za pomoci prosévacího přístroje dosáhnout zhutnění. Pro měření těchto vzorků byly použity ocelové prstence. Na první měření vzorku byl použit tenkostěnný prstavec o vnitřním průměru $\varnothing = 120$ mm a výšce $h = 100$ mm. Do tohoto prstence byl zhutněn materiál dané vlhkosti a zarovněn s okrajem prstence. Do takto připraveného vzorku byly z obavy o poškození senzoru vyryty rýhy o stejných rozměrech, jaké mají jehly senzoru. Pro tento účel byla vyrobena replika měřicích jehel senzoru (dále šablona, Obr. 31). Byla vyřezána z ocelového plechu tlustého 2 mm a zabroušena tak, aby se co nejvíce přiblížila vzhledu senzoru. Po zatlačení a vyjmutí ocelové šablony, byl do vzorku instalován senzor a proběhlo měření.



Obr. 31 – vlevo - šablona senzoru, vpravo – příprava vzorku pro instalaci senzoru



Pro hutnění byl tenkostěnný válec nevhodný, proto byl vzorek přemístěn do robustnější formy. Byla použita ocelová válcová forma pro lisování (Obr. 33). Forma byla zvolena z důvodu nešetřného hutnění, které vyžadovalo odolnější nádobu. Přesunutý vzorek byl překryt kruhovou deskou o vnějším průměru vnitřku formy a vzorek byl zhutněn údery gumové palice. Dále byl aplikován stejný postup jako při měření na tenkostěnném válci. Byla instalována šablona a následně senzor. Proběhlo měření na vzorku a postup byl opakován ještě jednou.

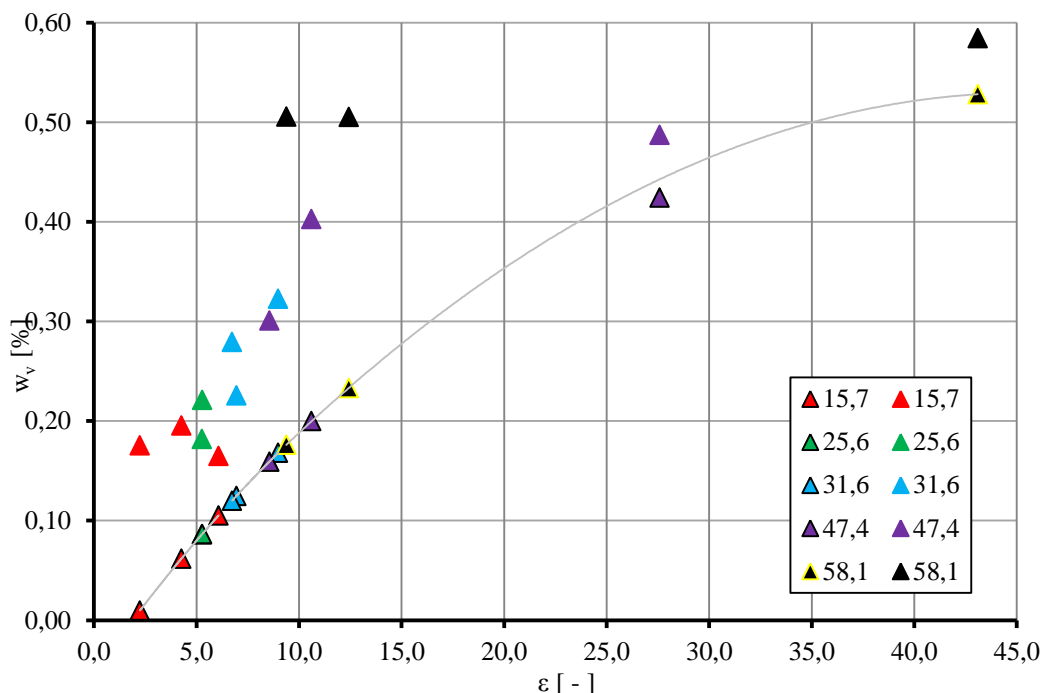


Obr. 32 – vlevo – vzorek ve formě, vpravo – měření na vzorku ve formě

10.6.14 Výsledky měření fáze 6.

Tab. 20 - Výsledky měření Fáze 6.

Měření	# 1,00 - Teplota	# 1,10 - Dielektrická permitivita	# 1,20 - Elektrická vodivost	# 1,30 - Objemová vlhkost	Hmotnostní vlhkost (skutečná)	Objemová vlhkost (skutečná)	Objemová hmotnost	Suchá objemová hmotnost
	T	ϵ	G	w_v	w	w_v	ρ	ρ_d
	[C°]	[-]	[dS.m ⁻¹]	[-]	[%]	[%]	[kg.m ⁻³]	[kg.m ⁻³]
1	21,6	6,08	0	0,1052	15,7	16,5	1216	1051
2	21,8	2,24	0	0,0097	15,7	17,5	1292	1117
3	21,4	4,26	0	0,0617	15,7	19,6	1441	1245
4	21,2	5,26	0,1	0,0860	25,6	18,2	893	711
5	21,1	5,28	0,1	0,0865	25,6	22,1	1085	863
6	20,0	6,95	5,6	0,1247	31,6	22,5	939	714
7	19,5	6,73	8,7	0,1200	31,6	27,9	1163	884
8	19,0	8,99	18,4	0,1681	31,6	32,3	1344	1021
9	21,7	8,55	19,8	0,1592	47,4	30,1	936	635
10	20,1	10,60	30,5	0,1998	47,4	40,3	1252	849
11	19,7	27,59	37,1	0,4242	47,4	48,7	1515	1028
12	21,7	9,38	22,7	0,1761	58,1	50,6	1376	870
13	20,1	12,43	26,4	0,2332	58,1	50,5	1375	870
14	19,9	43,09	35,5	0,5281	58,1	58,4	1590	1006



Graf 8 - měření Fáze 6 – závislost měřené permitivity na objemové vlhkosti

Fázi 6 bylo rozšířeno měření na peletách. Stejně jako Fáze 4 i Fáze 6 prokázala, že měření pelet je problematické pro značnou nehomogenitu materiálu. Při srovnání se sypkým materiálem byly na vzorcích pelet o vlhkostech $w = 15,7$, $25,6$ a $31,6$ % naměřeny hodnoty, které se neshodovaly s předpokladem měření. Například u vzorku č. 1 oproti vzorku č. 2 bylo očekáváno, že při zvyšující se objemové hmotnosti i objemové vlhkosti bude mít stejný zvyšující se charakter i měřená permitivita. Totéž bylo naměřeno mezi vzorky č. 6 a č. 7. Tato chyba (resp. klesající charakter měření) mohla být způsobena vyjmutím senzoru, které bylo nutné vzhledem k nešetrnému hutnění vzorku, a následně instalaci senzoru zpět. Senzor byl instalován na stejné místo (do připravených rýh od šablony), ale nemusel být instalován stejně hluboko a to mohlo ovlivnit měření.

Opětovným měřením pelet bylo dosaženo vyšších suchých objemových hmotností než v předešlých měřeních, ale stále nedosahují požadavků pro experiment. V nadcházejícím měření proto bude materiál lisován, aby bylo docíleno minimálně požadovaných objemových hmotností. Pro lisovaný materiál pak bude vymyšlen způsob měření (instalace senzoru).

10.6.15 Fáze 7. – Měření vzorků vyšších objemových hmotností

Ve Fázi 7 bylo provedeno měření na lisovaných válcových tělesech s vysokou objemovou hmotností (Tab. 21). Cílem bylo připravit celkem jedenáct vzorků lisovaných válcových těles, z toho šest pro použití ve vlastním měření. Tři pak budou měřeny v přirozeně vlhkém stavu a tři budou umístěny do tlakového hrnce a po nasycení změřeny (Fáze 8).



10.6.15.1 Výroba válcových těles

Výroba válcových těles vysokých objemových hmotností proběhla ve vysokotlakém lisu (Obr. 33). Před vlastním lisováním bylo potřeba odvážit potřebné množství bentonitu. Při známém objemu a hmotnosti vzorku pak lze snadno docílit požadované objemové hmotnosti.

Nejprve byl stanoven tvar vzorků dle lisovací formy (Obr. 33). Lisovací forma je válcovitého tvaru a pro vzorky byla zvolena výška $z = 30$ mm a průměr podstavy $d = 120$ mm. Cílem bylo připravit vzorky s objemovými hmotnostmi $\rho = 1400, 1450, 1500$ a $1600 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Z těchto požadavků na objemové hmotnosti bylo dopočteno potřebné množství materiálu (Přílohy, Tab. 44) pro výrobu tvarovek.

Po lisování všech tvarovek byla ověřena dosažená objemová hmotnost (Přílohy, Tab. 45).

10.6.15.2 Instalace a ochrana senzoru

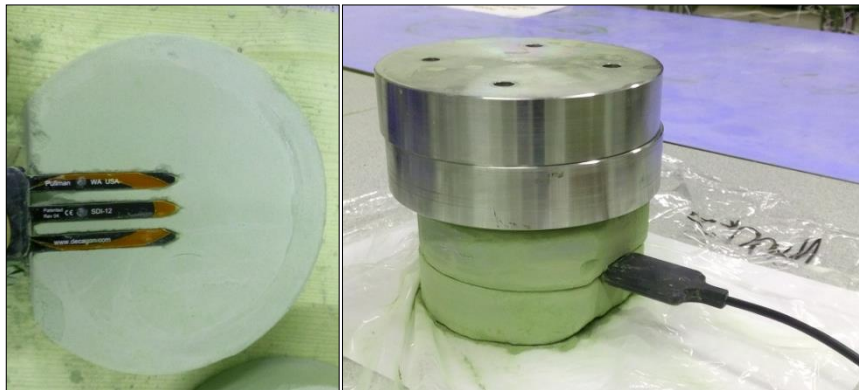
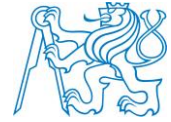
Instalace senzoru při měření je složitější než u sypkých materiálů. Senzor do vysoce zhuťněného materiálu nelze zatlačit, mohlo by dojít k jeho poničení, stejně tak při zalisování senzoru do vzorku. Při lisování by byl senzor poničen vysokotlakým lisem.

Bylo navrženo dříve vyrobenou šablonu (Obr. 31), určenou k vyrytí rýh do materiálu, instalovat do sypkého vzorku před lisováním. Po slisování vzorku by se šablona opatrně vyjmula a na její místo by se instaloval senzor. Šablona byla instalována do zkušebního válcového tělesa. Po slisování byla snaha šablonu opatrně vytáhnout ze vzorku. Při vytahování došlo k rozlomení vzorku (Obr. 33). Tento systém instalace byl proto opuštěn.

Byl zvolen způsob instalace senzoru mezi dvě válcová tělesa stejné objemové hmotnosti. Do jedné byly vyryty rýhy rozměrů jehel senzoru a druhou byl senzor přitížen. Řešení se ukázalo jako velice jednoduché a účinné bez potřeb dalších doplňků, jako jsou šablony.



Obr. 33 – vlevo nahoře - lisovací forma, vprostřed - vysokotlaký lis, tvarovky vysoké objemové hmotnosti (vlevo dole), vpravo - rozlomený vzorek

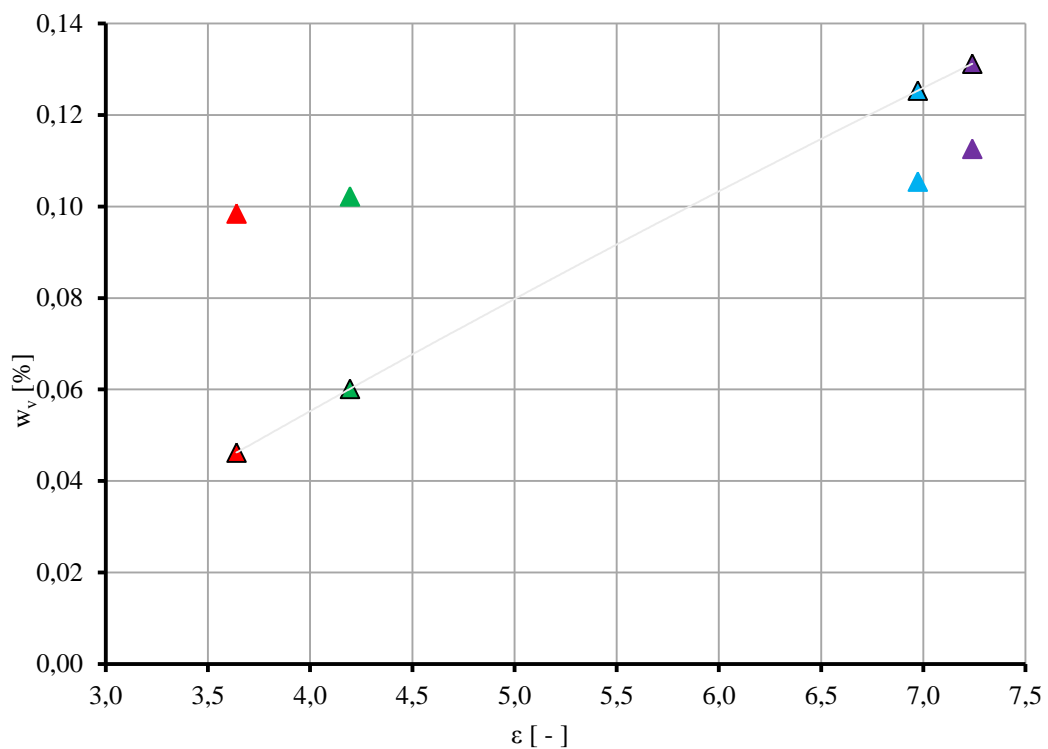


Obr. 34 – instalace senzoru mezi dvojicí tvarovek

10.6.16 Výsledky měření Fáze 7.

Tab. 21 - Výsledky měření Fáze 7.

Měření	# 1,00 - Teplota	# 1,10 - Dielektrická permitivita	# 1,20 - Elektrická vodivost	# 1,30 - Objemová vlhkost	Hmotnostní vlhkost (skutečná)	Objemová vlhkost (skutečná)	Objemová hmotnost	Suchá objemová hmotnost
	T	ϵ	G	w_v	w	w_v	ρ	ρ_d
	[C°]	[-]	[dS.m ⁻¹]	[-]	[%]	[%]	[kg.m ⁻³]	[kg.m ⁻³]
1	22,4	3,64	0	0,04621	7,6	9,8	1394	1296
2	22,8	4,20	0,025	0,06013	7,6	10,2	1447	1345
3	22,3	6,97	0	0,12533	7,6	10,5	1493	1387
4	21,6	7,24	0	0,13121	7,6	11,3	1594	1482



Graf 9 - měření Fáze 7 – závislost měřené permitivity na objemové vlhkosti



Ve Fázi 7 byla úspěšně vyrobena válcová tělesa. Do vylisovaných těles byly vyryty rýhy pro umístění senzoru a následně proběhlo měření.

Při měření na válcových tělesech byly poprvé zaznamenány hodnoty pod úrovní rovnice [4]. Tento výsledek je přisuzován dosud neměřené kombinaci velmi vysoké objemové hmotnosti a malé vlhkosti. Instalace senzoru a měření je považováno za zvládnuté vzhledem k pečlivosti přípravy.

V dalším měření bude snaha rozšířit měření na nasycených vzorcích s vysokou objemovou hmotností.

10.6.17 Fáze 8. – Měření saturovaných vzorků vyšších objemových hmotností

Ve Fázi 8 bylo provedeno měření na nasycených vzorcích válcových těles vyšších objemových hmotností. Tato tělesa byla vyrobena spolu se vzorky Fáze 7. Hned po výrobě byla tělesa umístěna do tlakové sytící nádoby (Obr. 35).

Sytící nádoba je celooceľová. Je složena ze dvou protilehlých kruhových desek svisle propojených šrouby. Mezi ocelovými deskami je umístěn dutý válec, do kterého se umísťují vzorky. Všechny komponenty tlakové nádoby jsou masivní, aby odolaly bobtnacímu tlaku bentonitu.



Obr. 35 – vlevo - tlaková nádoba, vpravo – komponenty tlakové nádoby

Bylo vyrobeno sedm válcových těles pro umístění do dvou tlakových nádob. Do první byly umístěny čtyři vzorky s objemovou hmotností $\rho = 1400, 1450, 1500$ a $1600 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Do spodu dutého válce byla umístěna karborundová destička a na ni vzestupně (od nejmenší objemové hmotnosti) posazeny válcová tělíska. Přes všechny vzorky se přetáhl dutý válec. Na vrch se položila druhá karborundová destička a vše se uzavřelo ocelovou deskou zajištěnou osmi šrouby.

Takto připravená první tlaková nádoba se dala sytit. Sycení probíhalo po dobu jednoho měsíce v tlakovém (Papinově) hrnci. Tlaková nádoba se umístila do tlakového hrnce a volný prostor se zaplnil destilovanou vodou.



Obr. 36 – vlevo a vprostřed – příprava před uzavřením tlakové nádoby, vpravo – uložení v tlakovém hrnci

Druhý hrnec byl připraven podobně. Do druhého hrnce byly umístěny tři (Obr. 37). Válcová tělesa objemových hmotností $\rho = 1400, 1500$ a 1600 kg.m^{-3} byla z obou stran obložena karborundovou destičkou a následně umístěna do tlakové nádoby. Po uzavření a zajištění šrouby se tlaková nádoba umístila do tlakového hrnce a volný prostor byl vyplněn destilovanou vodou (Obr. 37). Tlakový hrnec byl uzavřen. Druhá tlaková nádoba byla sycena jeden měsíc.



Obr. 37 - vlevo – válcová tělesa s karborundovými destičkami před uzavřením v tlakové nádobě, vpravo – tlaková nádoba uložená v tlakovém hrnci

Po měsíci sycení byly vzorky válcových těles vyjmuty z obou tlakových nádob. Při vyndávání vzorku z ocelového prstence musel být použit ruční lis (Obr. 38).

Z tlakových hrnců byly vyjmuty tlakové nádoby. Byly povoleny šrouby tlakových nádob a vyjmuty prstence s nasycenými vzorky válcových těles. Prstenec byl umístěn do ručního lisu. Na horní stranu prstence se umístil kužel, který rovnoměrně roznáší sílu na plochu celého vzorku při vytlačování z prstence. Nedochází tak k poničení vzorku. Bylo pomalu otáčeno výtlačným šroubem a vzorky byly vytlačeny ven z prstence.

Při vytlačování vzorků bylo postupováno velice opatrně, přesto byla některá válcová tělesa poničena (Obr. 38). Vzorky s objemovou hmotností $\rho = 1450 \text{ kg.m}^{-3}$ byly zcela poničeny, a nebylo na nich možné provést měření. Ostatní vzorky byly popraskané, ale bylo možné měření provést.



Instalace senzoru do nasycených vzorů byla odlišná od vzorků nenasyčených. Vzorky byly ponechány mezi karborundovými destičkami, aby nedošlo k dalšímu poničení a rozsypaní během přípravy pro instalaci senzoru. Do vzorku byly vyvrtány tři kruhové otvory (Obr. 39) stejné hloubky jako délka jehel senzoru. Vzhledem k vysoké vlhkosti a plastickému chování vzorků bylo snadné senzor instalovat do připravených otvorů.

Po instalaci senzoru bylo na všech třech vzorcích provedeno měření.



Obr. 38 – vlevo – ruční lis, vprostřed – válcové těleso před vytlačněním, vpravo – válcové těleso po vytlačnění

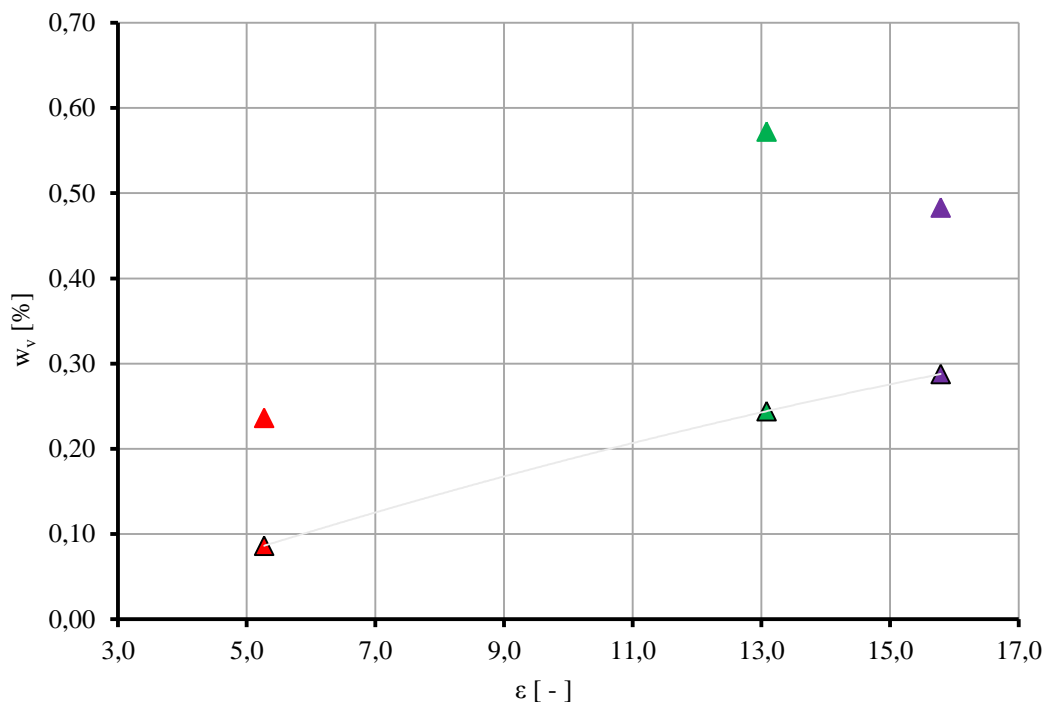


Obr. 39 – vlevo - vyvrtané otvory pro instalaci senzoru, vpravo – měření

10.6.18 Výsledky měření Fáze 8.

Tab. 22 - Výsledky měření Fáze 8.

Měření	# 1,00 - Teplota	# 1,10 - Dielektrická permitivita	# 1,20 - Elektrická vodivost	# 1,30 - Objemová vlhkost	Hmotnostní vlhkost (skutečná)	Objemová vlhkost (skutečná)	Objemová hmotnost	Suchá objemová hmotnost
	T	ϵ	G	w_v	w	w_v	ρ	ρ_d
	[C°]	[-]	[dS.m ⁻¹]	[-]	[%]	[%]	[kg.m ⁻³]	[kg.m ⁻³]
1	20,4	13,08	23,8	0,24417	55,7	57,2	1600	1028
2	20,5	15,79	31,6	0,28781	52,7	48,3	1400	917
3	20,6	5,27	2,4	0,08624	18,7	23,6	1500	1264



Graf 10 - měření Fáze 8 – závislost měřené permitivity na objemové vlhkosti

Výsledné vlhkosti měření Fáze 8 ukazují, že u vzorků umístěných vprostřed tlakové nádoby nedošlo k takovému nasycení, jako u vzorků umístěných na kraji nádob. Přes značné potíže při získávání vzorků z tlakových nádob, je měření považováno za zvládnuté.

10.6.19 Fáze 9. - Ověření funkčnosti v podzemí

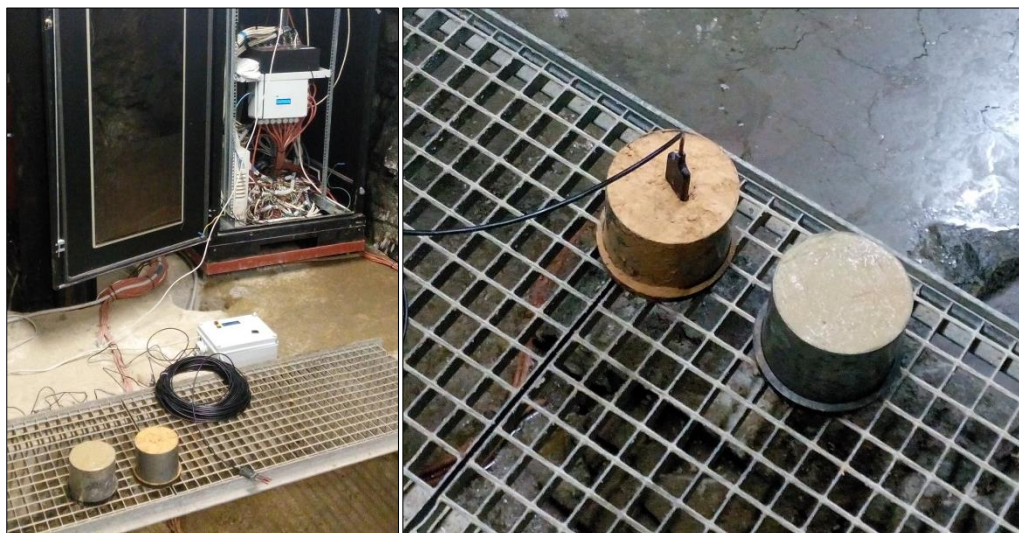
Ověřením funkčnosti mělo prokázat, schopnost senzoru měřit stejná data i v odlišných podmínkách podzemí (Obr. 40). Senzor byl připojen k podzemnímu experimentu Mock-up. Zapojení senzoru v podzemí bylo stejné jako v laboratoři. Síťovým kabelem byl datalogger připojen do rozvodné skříně a napájecím kabelem do elektrické sítě.

Cílem bylo změřit vzdušnou vlhkost (ta je v podzemí vyšší), materiál, na kterém už proběhlo měření a materiál ještě neměřený. Po zapojení senzoru v podzemí bylo provedeno měření na vzduchu. Po uplynutí nutného času k měření byl senzor instalován do materiálu Fáze 5 (vzorek vlhkosti $w \sim 20\%$), ten byl náhodně zvolen jako testovací pro měření v podzemí. Poslední měření proběhlo na bentonitu odebraném přímo v podzemí. Na materiálu byla zpětně zjištěna velmi vysoká vlhkost ($w \sim 240\%$), a z tohoto důvodu, byl tento vzorek z ověřovacího měření vynechán. Kalibrace nebyla stavěna na tak vysoké hodnoty vlhkosti (v experimentu se předpokládá rozmezí vlhkostí na $w \sim 10 - 25\%$ pro pelety a $w \sim 15 - 40\%$ pro nástřík).

Při měření vzdušné vlhkosti v podzemí byly hodnoty měřené permitivity na začátku (před měřením vzorku) $\varepsilon \sim 1,02$ a v opakování na konci měření (po změření vzorku) $\varepsilon \sim 1,08$. Hodnoty jsou tedy oproti měření v laboratorním zařízení mírně vyšší, což odpovídá vyšší vlhkosti v podzemí.



Měření na vzorku bylo realizováno stejným způsobem jako v laboratorních podmínkách. Před instalací v podzemí byl v laboratoři připraven vzorek a zjištěny všechny nutné parametry měření. V podzemí byla provedena pouze instalace senzoru.



Obr. 40 – měření v podzemí

10.6.20 Výsledky měření Fáze 9.

Tab. 23 - Výsledky měření Fáze 9.

Měření	# 1,00 - Teplota	# 1,10 - Dielektrická permitivita	# 1,20 - Elektrická vodivost	# 1,30 - Objemová vlhkost	Hmotnostní vlhkost (skutečná)	Objemová vlhkost (skutečná)	Objemová hmotnost	Suchá objemová hmotnost
	T	ϵ	G	w_v	w	w_v	ρ	ρ_d
	[C°]	[-]	[dS.m ⁻¹]	[-]	[%]	[%]	[kg.m ⁻³]	[kg.m ⁻³]
1	13,8	1,02	0	-0,0238	-	-	-	-
2	13	1	0	-0,0243	-	-	-	-
3	15,6	4,34	1	0,0637	19,1	15,9	994	835
4	15,5	4,3	0,9	0,0627	19,1	15,9	994	835
5	17,2	31,52	129,5	0,4556	239,4	98,0	1389	409
6	523,5	31,54	135,5	0,4558	239,4	98,0	1389	409
7	14,2	1,08	0	-0,0221	-	-	-	-
8	13,3	1,08	0	-0,0221	-	-	-	-

Měření Fáze 9 se považuje za zvládnuté. Při měření na vzduchu byla prokázána vyšší vlhkost prostředí podzemí. Měření na materiálu Fáze 5 bylo očekáváno nižší. Jak moc bylo toto očekávání nadhodnoceno, ukáže zpětné vyhodnocení.



11 Interpretace výsledků

Pro zpětné vyhodnocení objemové vlhkosti je důležité vhodně interpretovat data. Vzhledem k závislosti permitivity na objemové hmotnosti a vlhkosti je vhodnější sestavit trojrozměrný graf.

Všechna měření byla interpretována jako závislost měřené relativní permitivity na objemové vlhkosti. Na vodorovné (osa – x) byla vynesena měřená relativní permitivita, na svislé (osa – y) objemová vlhkost. Senzor je kalibrován tak, že z měřené permitivity vypočte objemovou vlhkost rovnicí [4] (Topp, 1980). Zároveň pro tytéž hodnoty permitivity byla ze vzorků stanovena skutečná objemová vlhkost. Pro vlastní kalibraci senzoru byla hledána závislost měřené permitivity a skutečné objemové vlhkosti.

11.1 3D data

Představa ideálního trojrozměrného grafu je plocha (osy „x“ a „y“) s hodnotami měřené relativní permitivity a objemové hmotnosti. Z kombinace těchto hodnoty by pak byla odečítána skutečná objemová vlhkost. Pro názornost výsledků byla snaha sestavit trojrozměrný graf tímto způsobem. Po sestavení takové plochy bude zvolen nejvhodnější způsob aproximace dat.

Při zpětném čtení dat z takto sestaveného grafu bude nutné znát objemovou hmotnost. V kombinaci s měřenou permitivitou pak bude možné vypočítat objemovou vlhkost. Objemová hmotnost bude zjištěna při výstavbě experimentu. Z různých míst experimentu, která budou využita pro instalaci senzorů, budou odebrány vzorky pro laboratorní stanovení dosažené objemové hmotnosti. Takto získaná vstupní data napomohou zpřesnit zpětné čtení objemové vlhkosti.

2D grafy byly vykresleny v programu MS Office Excel, tomto programu nebylo možné vhodně interpretovat trojrozměrná data, proto byl hledán jiný prostředek. Jako vhodný byl zvolen program Gnuplot.

11.1.1 Data trojrozměrného grafu

Při sestavování plochy trojrozměrného grafu byla použita data z měření sypkého materiálu z Fáze 5. V měření Fáze 5 bylo změřeno celkem pět sad vzorků. Z těchto měření je známo celkem 24 hodnot permitivit. Ke každé hodnotě permitivity byla přiřazena skutečná objemová vlhkost a skutečná objemová hmotnost

11.1.2 Postup sestavení trojrozměrného grafu

11.1.2.1 Závislost permitivity a objemové vlhkosti

- Byla vyjádřena závislost skutečné objemové vlhkosti na permitivitě (Graf 11).
- Každou sadou měření (pět vzorků různé objemové hmotnosti, ale stejné hmotnostní vlhkosti) byla proložena spojnice trendu. Bylo získáno šest podobných závislostí. Spojnice trendu byla zvolena v logaritmickém formátu.

$$w_v = A \cdot \ln(\varepsilon) + B \quad [5]$$



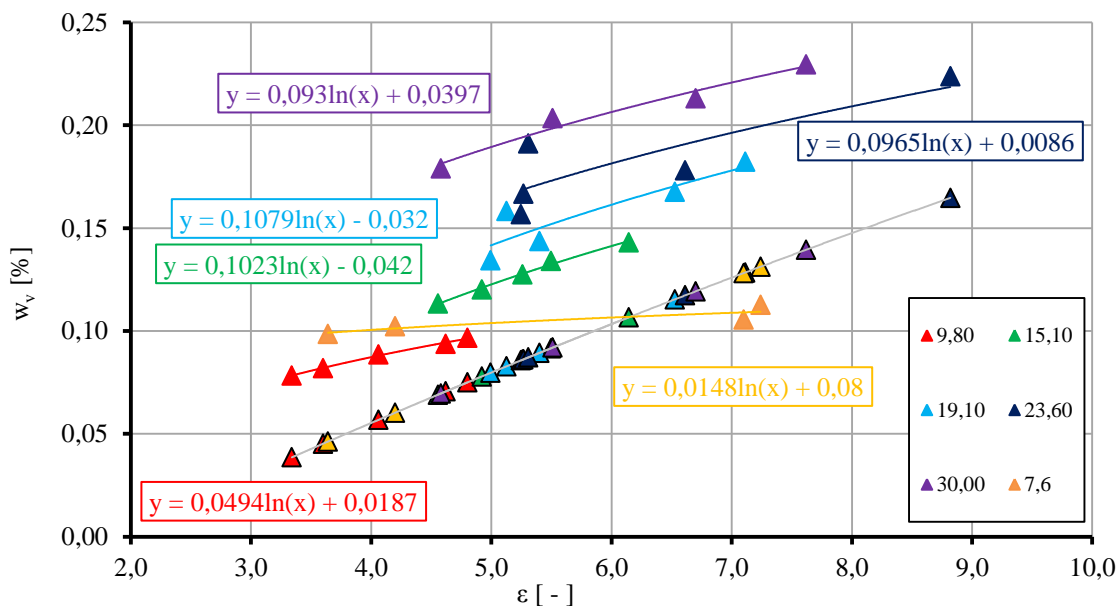
Kde: A, B - jsou parametry
 ϵ - je měřená permitivita

11.1.2.2 Závislost permitivity a objemové hmotnosti

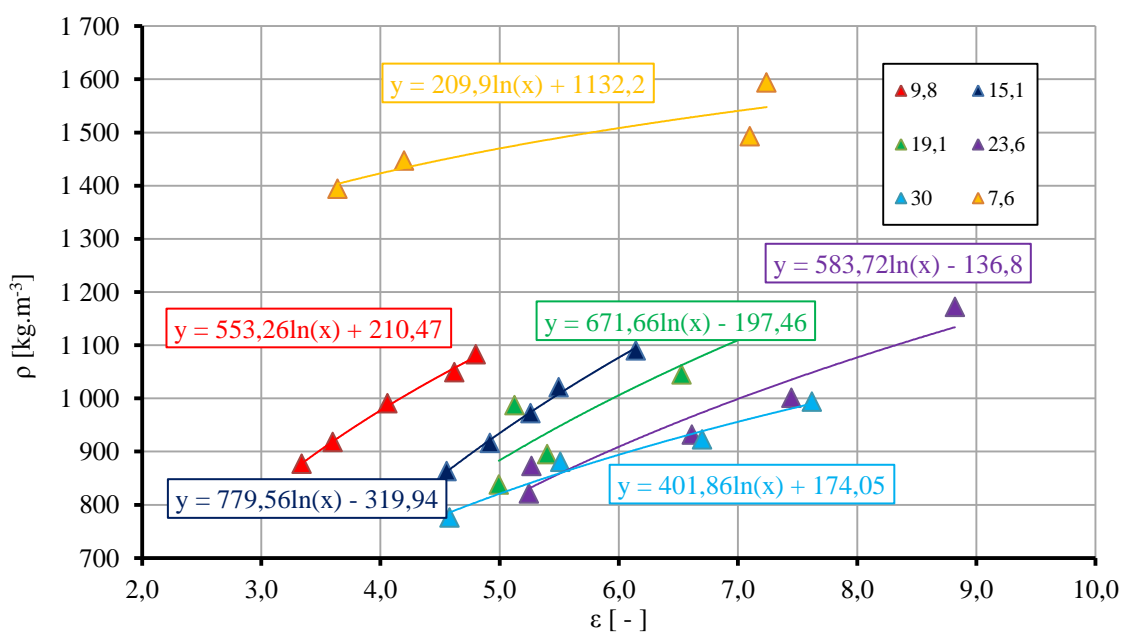
- Byla vyjádřena závislost objemové hmotnosti na měřené permitivitě (Graf 12).
- Každou sadou měření byla proložena spojnice trendu v logaritmickém formátu.

$$\rho = C \cdot \ln(\epsilon) + D \quad [6]$$

Kde: C, D - jsou parametry
 ϵ - je měřená permitivita



Graf 11 – měření fáze 5, podklad pro sestavení 3D grafu





Graf 12 - měření fáze 5, podklad pro sestavení 3D grafu

11.1.2.3 Sestavení vstupního souboru pro vykreslení trojrozměrného grafu

- Bylo získáno celkem dvanáct kombinací parametrů rovnice v logaritmickém formátu. Šest kombinací parametrů pro směr osy „x“ a šest pro směr osy „y“.
- Bylo stanoveno rozmezí hodnot měřené permitivity na $\varepsilon \sim 5 - 15$. Toto rozmezí bylo stanoveno na základě zkušenosti z provedených měření pro kalibraci.
- Každou kombinací parametrů byly (dosazením hodnot permitivity $\varepsilon = 5 - 15$) vypočteny hodnoty objemové vlhkosti a objemové hmotnosti (Tab. 24).
- Získané hodnoty byly importovány do vstupního souboru pro vykreslení.

Tab. 24 – hodnoty pro 3D graf

Permitivita	Objemová hmotnost	Objemová vlhkost	Parametr	Parametr	Parametr	Parametr
$\varepsilon [-]$	$\rho [\text{kg.m}^{-3}]$	$w_v [\%]$	A	B	C	D
5	1100,91	9,82	4,94	1,87	553,26	210,47
6	1201,78	10,72				
7	1287,06	11,48				
8	1360,94	12,14				
9	1426,11	12,72				
10	1484,40	13,24				
11	1537,13	13,72				
12	1585,27	14,15				
13	1629,55	14,54				
14	1670,55	14,91				
15	1708,73	15,25				
5	934,71	12,26	10,23	-4,20	779,56	-319,94
6	1076,84	14,13				
7	1197,01	15,71				
8	1301,11	17,07				
9	1392,93	18,28				
10	1475,06	19,36				
11	1549,36	20,33				
12	1617,19	21,22				
13	1679,59	22,04				
14	1737,36	22,80				
15	1791,15	23,50				
5	883,54	14,17	10,79	-3,20	671,66	-197,46
6	1005,99	16,13				
7	1109,53	17,80				
8	1199,22	19,24				
9	1278,33	20,51				
10	1349,09	21,64				
11	1413,11	22,67				
12	1471,55	23,61				
13	1525,31	24,48				
14	1575,09	25,28				
15	1621,43	26,02				
5	802,66	16,39	9,65	0,86	583,72	-136,80



Permitivita	Objemová hmotnost	Objemová vlhkost	Parametr	Parametr	Parametr	Parametr
ε [-]	ρ [kg.m ⁻³]	w_v [%]	A	B	C	D
6	909,09	18,15				
7	999,07	19,64				
8	1077,01	20,93				
9	1145,76	22,06				
10	1207,26	23,08				
11	1262,90	24,00				
12	1313,69	24,84				
13	1360,41	25,61				
14	1403,67	26,33				
15	1443,94	26,99				
5	820,82	18,94				
6	894,09	20,63				
7	956,03	22,07				
8	1009,69	23,31				
9	1057,03	24,40				
10	1099,37	25,38	9,30	3,97	401,86	174,05
11	1137,67	26,27				
12	1172,63	27,08				
13	1204,80	27,82				
14	1234,58	28,51				
15	1262,31	29,15				
5	1470,02	10,38				
6	1508,29	10,65				
7	1540,65	10,88				
8	1568,67	11,08				
9	1593,40	11,25				
10	1615,51	11,41	1,48	8,00	209,90	1132,20
11	1635,52	11,55				
12	1653,78	11,68				
13	1670,58	11,80				
14	1686,14	11,91				
15	1700,62	12,01				

11.2 Gnuplot

Gnuplot je volně šiřitelný nástroj pro tvorbu dvou a trojrozměrných grafů, vizualizací apod. Program je lze volně stáhnout z www.gnuplot.info. Ovládání probíhá přes příkazový řádek.

Vykreslení dat v programu probíhalo přes načtení textového souboru s daty. Programu pak byly zadány série příkazů jak s daty pracovat.



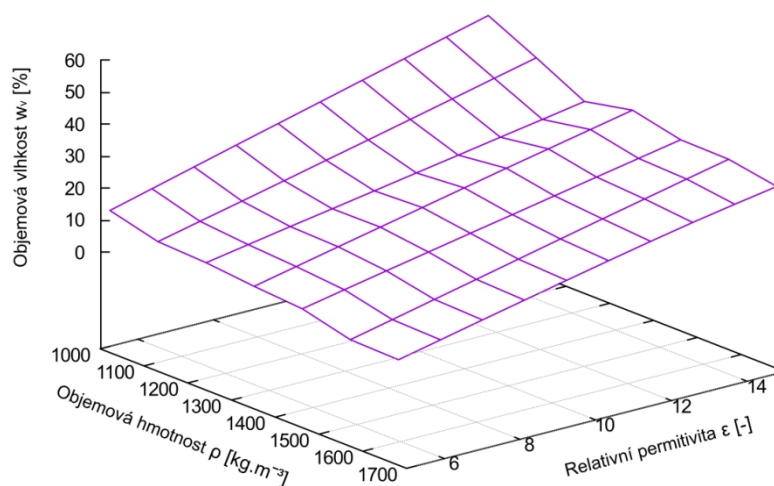
```

gnuplot
File Plot Expressions Functions General Axes Chart Styles 3D Help
Replot Open Save ChDir Print PtsC Prev Next Options
GNU PLOT
Version 5.1 patchlevel 0 last modified 2014-10-04
Copyright (C) 1986-1993, 1998, 2004, 2007-2014
Thomas Williams, Colin Kelley and many others
gnuplot home: http://www.gnuplot.info
mailing list: gnuplot-beta@lists.sourceforge.net
faq, bugs, etc: type "help FAQ"
immediate help: type "help" (plot window: hit 'h')
Terminal type set to 'qt'
gnuplot> set dgrid3d spline
gnuplot> set grid
gnuplot> set hidden3d
gnuplot> set title "Kalibrace čidel"
gnuplot> set yrange [5:15]
gnuplot> set xrange [1000:1600]
gnuplot> set zrange [0:60]
gnuplot> splot 'C:\Users\Vožech\Škola\Diplomová práce\GnuPlot\novy1.txt'u 2:1:3 with lines
gnuplot>
    
```

Obr. 41 – série příkazů pro vykreslení plochy závislosti

Načtením dat a sérií příkazů byla programem vykreslena plocha závislosti objemová hmotnost/permitivita/objemová vlhkost (Graf 13). Pro názornost zobrazení se takto sestavený trojrozměrný graf ukázal jako vhodný. Hodnoty objemové hmotnosti a permitivity byly vykresleny na ploše „x“ a „y“ a objemová vlhkost na svislé ose „z“.

Aby byl graf co nejvíce přiblížen reálným výsledkům a aby byla následná aproximace dat co možná nejpřesnější, byly kromě omezení osy „y“ na rozmezí permitivity $\epsilon = 5 - 15$, omezena i osa „x“ na hodnoty objemových hmotností $\rho = 1000 - 1700 \text{ kg.m}^{-3}$.



Graf 13 – výsledná plocha



11.3 Aproximace dat

Takto získanou plochu bylo nutné aproximovat. Bylo využito fitovací funkce k proložení plochy lineární rovinou. Programu byl zadán předpis funkce [7], kterou má plochu nahradit. Na Obr. 42 je znázorněn iterační postup v programu při zjišťování parametrů lineární plochy.

```

gnuplot> set fit logfile 'C:\Users\Vožech\Škola\Diplomová práce\GnuPlot\novy1.txt'
gnuplot> GPFUN_1 = "f(x,y)=A*x+B*y+C"
gnuplot> f(x,y)=A*x+B*y+C
gnuplot> A=1
gnuplot> B=1
gnuplot> C=1
gnuplot> fit f(x,y) 'C:\Users\Vožech\Škola\Diplomová práce\GnuPlot\novy1.txt' using 2:1:3 via A,B,C
iter   chisq   delta/lim  lambda   A           B           C
0  7.8426263363e+07  0.00e+00  7.76e+02  1.000000e+00  1.000000e+00  1.000000e+00
1  5.4939723736e+03  -1.43e+09  7.76e+01  1.392113e-02  9.926012e-01  9.993081e-01
2  1.0442691548e+03  -4.26e+05  7.76e+00  6.164024e-03  1.028680e+00  1.002751e+00
3  8.0382817419e+02  -2.99e+04  7.76e-01  -7.254422e-04  1.869393e+00  1.359112e+00
4  3.4615132330e+02  -1.32e+05  7.76e-02  -1.414836e-02  2.210523e+00  1.593156e+01
5  2.5978489624e+02  -3.32e+04  7.76e-03  -2.182613e-02  2.270574e+00  2.571216e+01
6  2.5978100634e+02  -1.50e+00  7.76e-04  -2.187796e-02  2.270974e+00  2.577824e+01
7  2.5978100634e+02  -6.89e-09  7.76e-05  -2.187797e-02  2.270974e+00  2.577824e+01
iter   chisq   delta/lim  lambda   A           B           C

After 7 iterations the fit converged.
final sum of squares of residuals : 259.781
rel. change during last iteration : -6.8926e-014

degrees of freedom (FIT_NDF) : 41
rms of residuals (FIT_STDFIT) = sqrt(WSSR/ndf) : 2.51717
variance of residuals (reduced chisquare) = WSSR/ndf : 6.33612

Final set of parameters      Asymptotic Standard Error
-----
A = -0.021878      +/- 0.002536      (11.59%)
B = 2.27097       +/- 0.1791       (7.888%)
C = 25.7782       +/- 2.667        (10.35%)

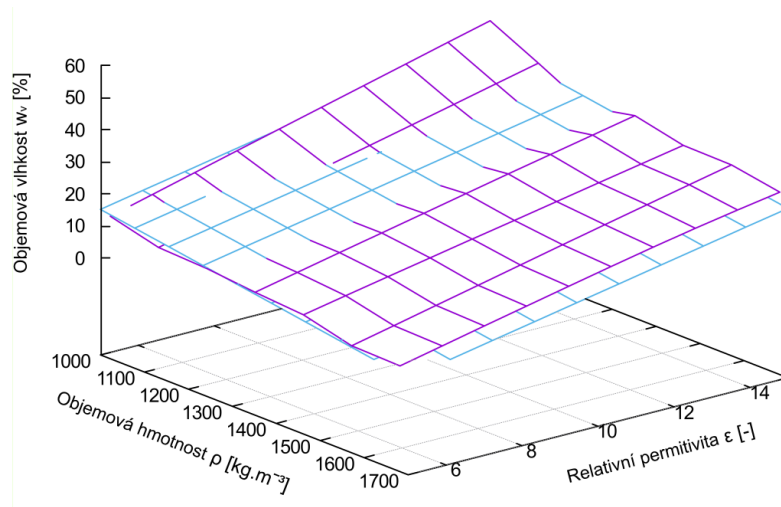
correlation matrix of the fit parameters:
      A      B      C
A    1.000
B   -0.626  1.000
C   -0.825  0.090  1.000
gnuplot> print " fit function:", GPFUN_1
fit function:f(x,y)=A*x+B*y+C
gnuplot> ## Last datafile plotted: "C:\Users\Vožech\Škola\Diplomová práce\GnuPlot\novy1.txt"
gnuplot> splot 'C:\Users\Vožech\Škola\Diplomová práce\GnuPlot\novy1.txt' using 2:1:3 with lines, f(x,y)
gnuplot> ## fit f(x,y) 'C:\Users\Vožech\Škola\Diplomová práce\GnuPlot\novy1.txt' using 2:1:3 via A,B,C
    
```

Obr. 42 – aproximace lineární rovinou

Iteračním procesem byly zjištěny parametry funkce, kterou byla plocha aproximována.

$$w_v(\rho, \varepsilon) = A \cdot \rho + B \cdot \varepsilon + C \quad [7]$$

- Kde: A, B, C - parametry
 ε - měřená permitivita
 ρ - objemová hmotnost
 w_v - objemová vlhkost



Graf 14 – aproximace dat lineární rovinou

Při snaze aproximovat data co nejpřesněji bylo rovinou dat proloženo mnoho tvarů aproximačních ploch. Nejpřesnější aproximace bylo dosaženo zakomponováním exponenciálního členu pro směr osy „x“ do lineární rovnice. Tvar této semi-exponenciální rovnice [8].

$$w_v(\rho, \varepsilon) = A \cdot \rho + B \cdot \rho^2 + C \cdot \varepsilon + D \quad [8]$$

Kde: A, B, C, D - parametry
 ε - měřená permitivita
 ρ - objemová hmotnost
 w_v - objemová vlhkost

Byl spuštěn iterační proces pro aproximaci semi-exponenciální funkcí a byly získány parametry funkce (Tab. 25).

Tab. 25 – parametry aproximační funkce

Parametr	Hodnota parametru
A	-1,6873e-02
B	-1,65046e-06
C	2,29557
D	21,9303



```

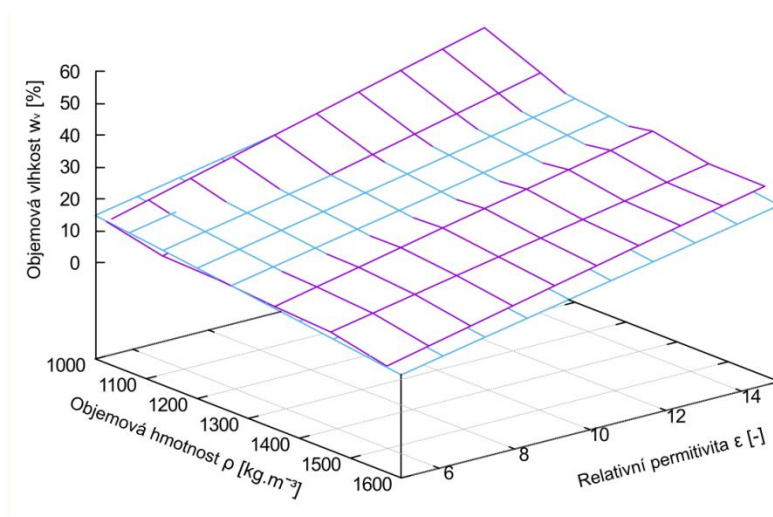
gnuplot
File Plot Expressions Functions General Axes Chart Styles 3D Help
Replot Open Save ChDir Print PrtSc Prev Next Options
gnuplot> set fit logfile 'C:\Users\Vozech\Škola\Diplomová práce\GnuPlot\novy_vypocet.txt'
gnuplot> GPFUN_1 = "f(x,y)=A*x+B*x**2+C*y+D"
gnuplot> f(x,y)=A*x+B*x**2+C*y+D
gnuplot> A=.1
gnuplot> B=.1
gnuplot> D=.1
gnuplot> C=.1
gnuplot> fit f(x,y) 'C:\Users\Vozech\Škola\Diplomová práce\GnuPlot\novy1.txt' using 2:1:3 via A,B,C,D
iter  chisq  delta/lim  lambda  A  B  C  D
0  1.1878241036e+12  0.00e+00  8.72e+04  1.000000e-01  1.000000e-01  1.000000e-01  1.000000e-01
1  4.8195003232e+07  -2.46e+09  8.72e+03  9.992635e-02  5.741328e-04  9.999942e-02  9.999994e-02
2  5.4563838630e+03  -8.83e+08  8.72e+02  9.991728e-02  -6.316535e-05  9.999941e-02  9.999993e-02
3  5.3460682580e+03  -2.06e+03  8.72e+01  9.906911e-02  -6.257860e-05  9.999877e-02  9.999861e-02
4  1.8990058019e+03  -1.82e+05  8.72e+00  6.190857e-02  -3.508403e-05  1.002793e-01  9.994060e-02
5  1.0361847071e+03  -8.33e+04  8.72e-01  3.277495e-02  -1.383674e-05  1.536704e-01  9.986925e-02
6  2.4123846925e+02  -3.30e+05  8.72e-02  2.155021e-02  -1.434081e-05  1.673047e+00  1.010139e-01
7  1.7167914586e+02  -4.05e+04  8.72e-03  1.680773e-02  -1.444979e-05  2.272024e+00  3.626057e-01
8  1.6825379543e+02  -2.04e+03  8.72e-04  -1.679402e-03  -7.427730e-06  2.286010e+00  1.219602e+01
9  1.6737787450e+02  -5.23e+02  8.72e-05  -1.674902e-02  -1.697597e-06  2.295488e+00  2.185088e+01
10 1.6737781619e+02  -3.48e-02  8.72e-06  -1.687297e-02  -1.650464e-06  2.295566e+00  2.193029e+01
iter  chisq  delta/lim  lambda  A  B  C  D
After 10 iterations the fit converged.
final sum of squares of residuals : 167.378
rel. change during last iteration : -3.48391e-007

degrees of freedom (FIT_NDF) : 35
rms of residuals (FIT_STDFIT) = sqrt(WSSR/ndf) : 2.18683
variance of residuals (reduced chisquare) = WSSR/ndf : 4.78222

Final set of parameters      Asymptotic Standard Error
=====
A = -0.016873                +/- 0.03559      (210.9%)
B = -1.65046e-006           +/- 1.36e-005    (824%)
C = 2.29557                  +/- 0.1593       (6.939%)
D = 21.9303                  +/- 22.74        (103.7%)

correlation matrix of the fit parameters:
      A      B      C      D
A    1.000
B    -0.997  1.000
C    -0.172  0.134  1.000
D    -0.998  0.993  0.140  1.000
gnuplot> print " fit function:", GPFUN_1
    
```

Obr. 43 – aproximace lineární rovinou



Graf 15 – aproximace dat exponenciální plochou

11.4 Ověření spolehlivosti

Pro ověření spolehlivosti byla použita rovnice semi-exponenciální plochy [9]. Byla náhodně vybrána data z měření Fáze 5, u kterých objemová hmotnost dosáhla hodnoty alespoň $\rho = 1000 \text{ kg.m}^{-3}$. Skutečné



hodnoty objemových hmotností a měřených permitivit, vybraných hodnot měření, byly dosazeny do rovnice plochy a byla vypočtena objemová vlhkost. Z vypočtených a skutečných hodnot objemových vlhkostí byla vyhodnocena chyba mezi aproximační funkcí a skutečným měřením. Stejně vyhodnocení bylo provedeno pro ověřovací měření Fáze 9 v podzemí.

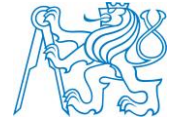
$$w_v(\rho, \varepsilon) = -1.69e^{-02} \cdot \rho - 1.65e^{-06} \cdot \rho^2 + 2.295 \cdot \varepsilon + 21.930 \quad [9]$$

Kde: ε - měřená permitivita
 ρ - objemová hmotnost
 w_v - objemová vlhkost

Tab. 26 – zpětné vyhodnocení objemové vlhkosti, stanovení chyby odvozené funkce

Zkouška	Měření	Objemová hmotnost	Relativní permitivita	Skutečná objemová vlhkost	Vypočtená objemová vlhkost	Chyba
		[kg.m ⁻³]	[-]	[%]	[%]	[%]
1	Fáze 5	1172	8,82	22,38	20,14	10,03
2	Fáze 5	1090	6,14	14,3	15,67	8,76
3	Fáze 5	1136	7,11	18,22	16,95	6,95
4	Fáze 5	1045	6,53	16,77	17,49	4,09
5	Podzemí	994	4,34	15,9	13,49	15,15

Použitím rovnice semi-exponenciální plochy [9] bylo při zpětném výpočtu objemové vlhkosti dosaženo průměrné chyby ~ 7,4 % pro materiál měření Fáze 5. Při zpětném vyhodnocení měření Fáze 9, které mělo ověřit funkčnost měření senzorem v podzemí, bylo dosaženo chyby ~ 15,15 %. Na chybu při měření Fáze 9 měla velký vliv malá objemová hmotnost materiálu a tedy i značná nehomogenita daného vzorku.



12 Instalace senzoru v experimentu

Vlhkostní TDR senzory budou v experiment instalovány do prohlubní, které vzniknou při odběrech vzorků odběrným prstencem. Předpokládá se, že v okolí senzoru bude sypký bentonit. Bude tak zajištěn dostatečný kontakt senzoru s bentonitem a bude minimalizována možnost poškození senzoru při hutnění. Po instalaci dojde k homogenizaci vlhkosti sypkého materiálu okolo senzoru a blízkého okolí pelet.

Po zhutnění dané vrstvy pelet budou odebrány vzorky z experimentu a na dno vzniklých prohlubní bude nasypán sypký bentonit. Na vrstvu sypkého bentonitu bude instalován senzor a ostatní volný prostor v prohlubni bude zasypán sypkým materiálem. Následně bude nasypána další vrstva pelet a bude provedeno hutnění vibrační deskou.



Obr. 44 – ilustrace instalovaného senzoru v prohlubni po odebraném vzorku, senzor – ilustrační foto (Decagon Devices)



13 Závěr

Těsnící část experimentu EPSP bude realizována z bentonitu 75. Délka bentonitové části bude 2m. Pro bentonitovou část se předpokládá využití hutněných pelet a nástřiku recyklátu. Cílem práce bylo ověřit navržený způsob hutnění vrstev a nástřiku bentonitu v experimentu a navrhnout způsob odběru vzorků při výstavbě. Pro monitoring bylo cílem provést kalibraci vlhkostních senzorů na materiál experimentu a navrhnout způsobu jejich instalace.

Při ověřování hutnění byly realizovány dva testy hutnění do testovací bedny za různých podmínek. Testy prokázaly, že při hutnění v ~ 10 cm mocných vrstvách bylo dosaženo průměrné suché objemové hmotnosti $\rho_d = 1453 \text{ kg.m}^{-3}$, což splňuje požadavek na minimální suchou objemovou hmotnost $\rho_d = 1400 \text{ kg.m}^{-3}$. Pelety budou ukládány v ~ 10cm mocných vrstvách do vzdálenosti od přístropí cca 1,7 m.

Při testování nástřiků byla požadovaná suchá objemová hmotnost $\rho_d = 1400 \text{ kg.m}^{-3}$. Bylo celkem provedeno 7 testovacích nástřiků a odebráno 54 vzorků k vyhodnocení. Požadavky byly splněny pro bentonit zrnitosti materiálu (0 – 5) při nastavení stroje na průtok záměsové vody 50 l.min^{-1} a délky dopravní hadice 10 m. Průměrná suchá objemová hmotnost nástřiku těchto parametrů byla $\rho_d = 1505 \text{ kg.m}^{-3}$.

Pro kontrolu kvality prací při výstavbě byl na základě dostupného plánu instrumentace a závěrů z hutnění a nástřiků sestaven plán odběru vzorků. Kvalita prací bude kontrolována dvěma způsoby, sledováním objemu použitého materiálu a odběrem vzorků z různých míst bentonitové části experimentu. Vzorky budou získány odběrným válcem a bude vyhodnocena objemová hmotnost a vlhkost.

V rámci monitoringu se počítá s využitím TDR senzorů, které byly pro materiál experimentu kalibrovány. Na homogenním materiálu byla provedena kalibrace pro různé hodnoty objemových hmotností a vlhkostí. Výstupem byla kalibrační funkce se spolehlivostí měření ~ 7,4 %, která byla implementována do měřicího systému URC Josef. Kalibraci je možné využít pro pelety, je ale nutné počítat s menší spolehlivostí měření.

V rámci instalace senzorů v experimentu bylo navrženo využít prohlubně vzniklé odběrem vzorků. Nejbližší okolí senzoru bude kvůli instalaci ze sypkého homogenního bentonitu.

Vzhledem ke zdržení harmonogramu výstavby nebylo možné instalovat senzory přímo v experiment a sepsat technickou zprávu z průběhu výstavby. Realizace se předpokládá v červnu – červenci 2015.



14 Seznam použité literatury

1. Topp, G.C., Davis, J.L., Annan, A.P. (1980) Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. *Water Resources Research*, 16, 574 – 582.
2. Hansen Johanna, Posiva Oy (2013), *Deliverable n°D1.2 Project Plan including risk management plan*, DOPAS project FP7 EURATOM, no. 323273, on-line: http://www.posiva.fi/files/3021/D1_2_DOPASProjectPlan_final_ver1_0.pdf
3. White, M., Doudou S., Neall, F. (2014), *Deliverable n°D2.1 Version n°1.1 Design Bases and Criteria*, DOPAS project FP7 EURATOM, no. 323273; Galson Sciences Limited, on-line: http://www.posiva.fi/files/3564/DOPAS_Deliverable_D2_1_Design_Bases_and_Criteria_v1_1_2_final_SESAM.pdf
4. Vašíček R., Svoboda, J., Trpkošová, D., Večerník, P., Dvořáková, M. *Deliverable n°D3.16 Testing plan for EPSP laboratory experiment*, DOPAS project FP7 EURATOM, no. 323273; Czech Technical University in Prague, May 2013, on-line: http://www.posiva.fi/files/3794/DOPAS_D3_16_testingplanEPSPlab_20052013.pdf
5. Vašíček R., Levorová M., Hausmannová L., Šťáštka J., CTU in Prague; Večerník P, Trpkošová D, Gondolli J., ÚJV Řež, a. s. (2014); *Deliverable n° D3.17 Interim results of EPSP laboratory testing*, DOPAS project FP7 EURATOM, no. 323273; Czech Technical University in Prague, on-line: http://www.posiva.fi/files/3549/DOPAS_Deliverable_D3_17_Interim_results_of_EPSP_laboratory_testing_13.pdf
6. Svoboda J., Vašíček R., Smutek J., Šťáštka J. (2014), *Deliverable no°3.18 Testing plan for EPSP instrumentation and monitoring*, DOPAS project FP7 EURATOM, no. 323273; Czech Technical University in Prague
7. Centrum experimentální geotechniky: výzkumné a pedagogické pracoviště Fsv ČVUT v Praze, (*Centre of Experimental Geotechnics on the Faculty of Civil Engineering CTU*), Bentonit, vlastnosti, 13.5.2015, on-line: www.ceg.fsv.cvut.cz
8. FETHI BOUKSILA , MAGNUS PERSSON , RONNY BERNDTSSON & AKISSA BAHRI (2008) Soil water content and salinity determination using different dielectric methods in saline gypsiferous soil, *Hydrological Sciences Journal*, 53:1, 253-265, DOI: 10.1623/hysj.53.1.253 <http://dx.doi.org/10.1623/hysj.53.1.253>
9. *Návrh a provádění zemního tělesa pozemních komunikací*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010, 65 l
10. Filamos s. r. o. - Technický list – stroj na stříkaný beton řady SSB14, str. 3-5, 13.5.2015, [online], http://www.filamos.cz/wp-content/uploads/2008/06/SSB_14_24_techicky_list_cz.pdf
11. Hausmannová L., Šťáštka J., Vašíček R.: *Použití bentonitu v konstrukci hlubinného úložiště radioaktivního odpadu*, ČVUT v Praze, fakulta stavební, Centrum experimentální geotechniky, Odpadové fórum 2011



12. Bátková, K., Matula, S., Miháliková, M. 2013. Multimediální učebnice hydropedologických terénních měření. 2. doplněné vydání [on-line]. Česká verze. Česká zemědělská univerzita v Praze. Praha. Nestránkováno. Dostupné z: <http://hydropedologie.agrobiologie.cz>. ISBN: 978-80-213-2434-3.
13. Hausmannová L., Šťáška J., Vašíček R.: *Vývoj technologie stříkaného bentonitu*, ČVUT v Praze, fakulta stavební, Centrum experimentální geotechniky, 2015
14. Keramost, a. s., *producent výrobků na bázi bentonitů*, aktualizováno 13.5.2015, on-line: <http://www.keramost.cz/cz/produkty/bentonity/bentonity-pro-stavebnictvi>
15. Posiva (1995), finská společnost nakládání s radioaktivním odpadem. aktualizováno 13.5.2015, on-line: <http://www.posiva.fi/en/>
16. (SÚRAO) Správa úložišť radioaktivních odpadů, *radioaktivní odpady*, aktualizováno 13.5.2015, on-line: <http://www.rawra.cz/cze/Uloziste-radioaktivnich-odpadu/Radioaktivni-odpady/Co-je-radioaktivita>
17. Šťáška J., *Přírodní bentonity v environmentálních konstrukcích*, bakalářská práce, ČVUT v Praze, fakulta stavební, Centrum experimentální geotechniky, 2008
18. Šťáška J. Bc.: *Stříkané jíly (Sprayed Clays)*, ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Centrum experimentální geotechniky, 2009
19. URC Josef, *Podzemní laboratoř Josef*, ČVUT v Praze, fakulta stavební, 2007, on-line: <http://www.uef-josef.eu>
20. Decagon Devices, Inc. 5TE SOIL MOISTURE, TEMPERATURE, & ELECTRICAL CONDUCTIVITY SENSOR, aktualizováno 13.5.2015 on-line: <http://www.decagon.com/products/soils/volumetric-water-content-sensors/5te-soil-moisture-temperature-and-electrical-conductivity-sensor/>
21. Arcadis, 2015, Technická zpráva o zaměření meziprostoru pro experiment DOPAS, Ing. Tomáš Křemen Ph.D., V Praze dne 30. 1. 2015
22. Vozech, 2013, Využití pelet ve stříkaných jílových těsněních, Pellets in sprayed clay sealin layers, bakalářská práce, Praha 2013
23. SEDLÁK, Bedřich a Ivan ŠTOLL. *Elektřina a magnetismus*. 1. vydání. Praha : Academia a Karolinum, 1993. ISBN 80-200-0172-7.
24. ČGS – geofond (2002-2005): *Bentonit, charakteristika a užití*, 13.5.2015, on-line: http://www.geofond.cz/dokumenty/nersur_rocenky/rocenkanerudy99/html/bentonit.html