

## PODĚKOVÁNÍ

Disertační práce navázala na mé předchozí výzkumné práce, které jsem řešil pod odborným vedením prof. Ing. Jaroslav Pacovského, CSc. a který je i mým školitelem. Ve své práci využívám všechny předchozí získané zkušenosti z experimentálního výzkumu, a proto mé poděkování náleží v první řadě právě jemu.

Další velké poděkování samozřejmě patří celé rodině, a to hlavně rodičům, paní Miroslavě Šťátkové a Jiřímu Šťátkovi, dále pak partnerce Kateřině Sklenářové, dětem Lauře a Šimonovi a prarodičům.

Další poděkování patří určitě kolegům z Centra experimentální geotechniky Fakulty stavební ČVUT v Praze.

V práci jsou využívány i výsledky z projektů, které byly většinou financované ze zdrojů ČVUT v Praze a Správy úložišť radioaktivních odpadů, a tak je příhodné poděkovat i těmto institucím.

Děkuji také společnostem Keramost a.s. (zastoupená Ing. Zdeňkem Vyskočilem) a Českým lupkovým závodům a.s. (zastoupená Ing. Pravoslavem Hamouzem a Ing. Jiřím Tvrzem). Tyto společnosti poskytly svoje prostory a technologie pro vývoj technologie výroby bentonitových pelet.



## ABSTRAKT

Hlavním cílem disertační práce je navrhnout a odzkoušet zaplnění technologické spáry pro svislý způsob uložení kontejneru s vyhořelým jaderným palivem. Téma výzkumu bylo vybráno na základě zkušeností z výstavby prvního českého in-situ fyzikálního modelu úložného místa (Mock-up Josef). Při výstavbě modelu byly ponechány technologické spáry pro bezproblémovou instalaci experimentu. Technologické spáry ale ovlivňují důležité vlastnosti bentonitové vrstvy. Se spárami se počítá i v konstrukci hlubinného úložiště. V České republice je téma zaplnění technologických spár zcela nové, tzn., tato problematika nebyla dosud řešena.

Nejdříve byly definovány problémy spojené s existencí tzv. technologických spár mezi bentonitem a horninou. Hlavním důvodem pro zaplnění technologické spáry je odvod tepla z bentonitu do horniny. Po výběru základního materiálu byly odzkoušeny technologie pro poloprovozní výrobu pelet z Bentonitu 75. Poté byly odzkoušeny technologie pro aplikace pelet do technologické spáry mezi bentonitem a horninou.

Testovanými formami bentonitu byly pelety, granuláty, mletý bentonit a směsi. Pro zaplnění spár byly testované technologie volného sypání bentonitu bez setřesení, se setřesením a technologie stříkaného jílu. Při aplikačních testech bylo sledováno dosažené zhutnění, podle kterého lze určit další důležité vlastnosti bentonitu, např. hydraulickou vodivost.

Výzkumné práce se také zaměřily na termofyzikální vlastnosti bentonitové vrstvy a na změny vedení tepla. Dále byla provedena analýza fyzikálního modelu Mock-Up Josef (MCJ). Autor práce se podílel na návrhu MCJ a zodpovídá za jeho provozování a vyhodnocování. Data a výsledky z eMCJ jsou v práci popsány a vyhodnoceny a jsou použity pro ověření některých poznatků a závěrů.

Veškeré realizované technické a výzkumné práce byly provedeny s poloprovozními technologiemi, kterými je možné zajistit potřebné množství materiálu.

Ze získaných poznatků o českém bentonitu lze čerpat informace pro další výzkum bariér hlubinného úložiště a pro návrh úložiště vyhořelého jaderného paliva. V práci popsané technologie jsou využitelné i mimo problematiku ukládání radioaktivních odpadů, např. je reálné využití bentonitových pelet pro těsnění vrtů.



Hlavním závěrem práce je, že nalezené a odzkoušené zaplnění spáry mezi bloky a horninou má pozitivní vliv na vlastnosti bentonitové vrstvy. Zaplnění spáry je důležité z důvodů odvodu tepla, ale existují i další výhody, které jsou v práci prokázány a popsány.

Některé z výstupů práce byly publikovány v průběhu řešení a některé výsledky práce již byly použity pro výzkum inženýrských bariér, např. při výstavbě fyzikálního modelu těsnící zátky pro hlubinné úložiště (projekt DOPAS). Dále byly výsledky práce využity pro návrh fyzikálních modelů s dynamicky hutněnými těsníci vrstvami z bentonitových pelet.

**Klíčová slova:** bentonit, bentonitové pelety, technologické spáry, stříkání bentonitu, volné sypaní bentonitu, termofyzikální vlastnosti bentonitu, fyzikální model Mock-up  
Josef



## ABSTRACT

The main aim of the thesis is to design and test the filling of the technological gap for the vertical disposal of the container with spent fuel in deep repositories. The theme of the research was selected on author's experiences from the construction of the first Czech in-situ physical model of bentonite barrier (Mock-up Josef). Technological gaps were left in the construction of the model to ensure trouble-free installation of experiment but gaps has an effect on the important properties of the bentonite layer. Technological gaps can be expected even the deep repository construction too. In the Czech Republic, the issue of filling of technological gaps is completely new, so it has not yet been solved.

At first, problems related to the existence of so-called technological gaps between bentonite and rock were defined in this thesis. The main reason for filling the technological gap is improve of heat conduction from bentonite to the rock. Due to the general requirements for the disposal and its materials, Bentonite 75 (existing results) was selected for this research. After the selection of the basic material, the technology for pilot production of the bentonite pellets was tested. Then technology for application of the material to the technological gap was tested. The materials used in the gap-filling tests included pellets, granules, powder and mixtures thereof. The means of application studied consisted of the free fall pouring method, with and without vibration, and the spray method and the aim was to verify the way in which they worked with the various types and forms of material. The most important geotechnical parameter of the material, i.e. dry density, was determined following the application of the materials. The research also focused on the thermophysical properties of the bentonite layer and changes in heat conduction. An analysis of the physical model Mock-up Josef was also carried out. Mock-up Josef was co-designed by the author of thesis and the author of this work is responsible for operation and evaluation of Mock-up Josef. The data and results from the experiment are used for evaluations in the thesis.

All the technical and research work carried out were implemented with semi-operative technologies capable of providing the necessary amount of material.



The findings on Czech bentonite can also be used for further research and design of a spent nuclear fuel repository. In the work described the technologies are usable also outside the issue of radioactive waste disposal e.g. for use of bentonite pellets for borehole sealing.

The main conclusion of the thesis is that the found and tested gap filling between the blocks and the rock has a positive influence on properties of the bentonite barrier. Gap filling is especially important due to heat conduction, but there are other problems that are described and solved in the work.

Some of the outputs of the thesis were published during the course of the project, and some results of the work have already been used to investigate engineering barriers, eg for the construction of a physical model of a sealing plug for deep repository (DOPAS project). In addition, the results from the thesis were used for the design of physical models, which are designed for the research of a dynamically compacted sealing layer of bentonite pellets.

**Keywords:** bentonite, bentonite pellets, bentonite gap filling, compaction methods for the bentonite, thermophysical properties of the bentonite, physical model Mock-up  
Josef



## OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ</b> .....	<b>13</b>
2.1	HLUBINNÉ ÚLOŽIŠTĚ V ČR.....	13
2.2	TECHNOLOGICKÉ SPÁRY.....	15
2.2.1	<i>Důvody pro zaplnění technologické spáry mezi bentonitem a horninou</i> .....	16
2.2.2	<i>Rozměry technologické spáry</i> .....	17
2.2.3	<i>Technologie zaplnění technologické spáry a výsledky ze zahraničí</i> .....	18
2.3	VLASTNOSTI BENTONITOVÉ VRSTVY.....	20
2.4	TERMOFYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI BENTONITOVÉ VRSTVY.....	20
2.4.1	<i>Experimentálně měřené termofyzikální vlastnosti bentonitu</i> .....	21
2.4.2	<i>Stanovení termofyzikálních vlastností bentonitové vrstvy</i> .....	22
2.4.2.1	Existující metody pro měření.....	22
2.4.2.2	Existující početní vztahy pro početní řešení tepelné vodivosti bentonitu.....	23
2.4.2.2.1	Johansenova metoda.....	23
2.4.2.2.2	Početní řešení podle De Vries (1963):.....	24
2.4.2.2.3	Početní řešení dle Sakashity A Kumady (1998).....	25
2.4.2.2.4	Lineární korelace podle TANG, Anh-Minh, Yu-Jun CUI a Trung-Tinh LE. "A study on the thermal conductivity of compacted bentonites" (2006).....	25
2.4.2.2.5	Výpočet podle Kahr a Müller-Von Moos (1982) [5].....	26
2.4.2.2.6	Výpočet podle Knutsson (1983) [5].....	26
2.4.2.2.7	Výpočet podle Beziat et. al. (1988) [19].....	27
2.4.2.2.8	Výpočet podle Suzuki & Taniguchi (1999) [5].....	27
2.5	BENTONITOVÉ PELETY.....	28
2.5.1	<i>Možné technologie výroby pelet</i> .....	29
2.5.2	<i>Hodnocení kvality bentonitových pelet</i> .....	30
2.5.2.1	Fullerův výpočet ideální zrnitosti.....	31
2.5.3	<i>Finský výzkum</i> .....	32
2.5.4	<i>Švýcarský výzkum</i> .....	34
2.5.5	<i>Francouzský výzkum</i> .....	36
2.6	ČESKÝ BENTONIT A JEHO VLASTNOSTI.....	38
2.6.1	<i>Geotechnické vlastnosti Bentonitu 75</i> .....	39
2.6.1.1	Bobtnací tlak B75.....	40
2.6.1.2	Hydraulická vodivosti B75.....	41
2.7	REFERENČNÍ MATERIÁL GBM.....	42
2.8	FYZIKÁLNÍ MODEL MOCK-UP JOSEF (MCJ).....	43
2.8.1	<i>Konstrukce experimentu</i> .....	44



<b>3</b>	<b>CÍLE PRÁCE A PRACOVNÍ HYPOTÉZY .....</b>	<b>46</b>
3.1	CÍLE PRÁCE .....	46
3.1.1	<i>Definování požadavků na zaplnění technologické spáry.....</i>	<i>47</i>
3.1.2	<i>Výběr druhu bentonitu, úprava bentonitu do pelet a stanovení vlastností bentonitových pelet 47</i>	
3.1.3	<i>Stanovení termofyzikálních vlastností bentonitových pelet a bloků.....</i>	<i>47</i>
3.1.4	<i>Odzkoušení a výběr technologií pro zaplnění technologických spár.....</i>	<i>47</i>
3.1.5	<i>Výběr materiálu a technologie pro reálný model technologické spáry .....</i>	<i>48</i>
3.1.6	<i>Analýza fyzikálního modelu MCJ a výpočet tepelného gradientu .....</i>	<i>48</i>
3.1.7	<i>Definování parametrů bentonitové vrstvy z pelet na základě získaných poznatků .....</i>	<i>48</i>
3.2	PRACOVNÍ HYPOTÉZY .....	49
<b>4</b>	<b>METODY ZKOUMÁNÍ .....</b>	<b>50</b>
4.1	OBJEMOVÁ HMOTNOST VYSUŠENÉ ZEMINY .....	50
4.2	OBJEMOVÁ HMOTNOST ZEMINY.....	50
4.3	VÁHOVÁ (HMOTNOSTNÍ) VLHKOST.....	51
4.4	STUPEŇ NASYCENÍ (SATURACE).....	51
4.5	EFEKTIVNÍ OBJEMOVÁ HMOTNOST MONTMORILLONITU (EMDD) .....	52
4.6	TERMOFYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI .....	52
4.7	ZRNITOSTNÍ SLOŽENÍ .....	55
<b>5</b>	<b>VÝSLEDKY VÝVOJE A VÝZKUMU .....</b>	<b>56</b>
5.1	HLAVNÍ POŽADAVKY NA VÝZKUM.....	56
5.2	VÝBĚR DRUHU BENTONITU, ÚPRAVA BENTONITU DO PELET A STANOVENÍ VLASTNOSTÍ BENTONITOVÝCH PELET .....	56
5.2.1	<i>Technologie výroby pelet protlačováním matricí s kruhovými otvory (B75 PEL 12) .....</i>	<i>57</i>
5.2.1.1	<i>Pelety o průměru 8 mm.....</i>	<i>60</i>
5.2.1.2	<i>Pelety o průměru 12 mm – B75 PEL 12 .....</i>	<i>60</i>
5.2.1.3	<i>Vyhodnocení prvních zkoušek lisování a poloprovozní zkoušky .....</i>	<i>61</i>
5.2.1.4	<i>Plno provozní zkouška lisování bentonitových pelet B75 PEL 12 .....</i>	<i>62</i>
5.2.1.5	<i>Drcený materiál z B75 PEL 12 .....</i>	<i>65</i>
5.2.2	<i>Technologie výroby pelet z B75 lisováním mezi válci (REC).....</i>	<i>66</i>
5.2.2.1	<i>Zkoušené materiály z Keramostu a.s. ....</i>	<i>68</i>
5.2.3	<i>Úprava zrnitostního složení REC pro potřeby zaplnění technologické spáry.....</i>	<i>70</i>
5.2.3.1	<i>Váhová vlhkost REC MIX.....</i>	<i>71</i>
5.2.3.2	<i>Zrnitostní složení REC MIX I .....</i>	<i>71</i>
5.2.3.3	<i>Zrnitostní složení REC MIX II .....</i>	<i>72</i>
5.2.4	<i>Referenční zahraniční materiál – GBM .....</i>	<i>73</i>
5.2.4.1	<i>Vlhkost GBM .....</i>	<i>73</i>
5.2.4.2	<i>Zrnitost GBM .....</i>	<i>74</i>



5.3	ODZKOUŠENÍ A VÝBĚR TECHNOLOGIÍ PRO ZAPLNĚNÍ TECHNOLOGICKÝCH SPÁR .....	74
5.3.1.1	Zkoušky hutnění ve válci .....	75
5.3.1.2	Zkoušky zhutnění v malém modelu.....	76
5.3.1.3	Výsledky zkoušek a výběr technologie a materiálu pro zaplnění spáry.....	77
5.4	ODZKOUŠENÍ VYBRANÉ TECHNOLOGIE NA VELKÉM MODELU TECHNOLOGICKÉ SPÁRY .....	79
5.4.1	<i>Velký model technologické spáry</i> .....	79
5.4.2	<i>Výsledky testů zaplnění spáry a porovnání se zahraničím</i> .....	80
5.5	STANOVENÍ TERMOFYZIKÁLNÍCH VLASTNOSTÍ BENTONITOVÝCH PELET A BENTONITOVÝCH BLOKŮ Z BENTONITU 75 .....	82
5.5.1	<i>Lisované bloky</i> .....	82
5.5.2	<i>B75 PEL 12</i> .....	83
5.5.3	<i>REC MIX I a II</i> .....	85
5.5.4	<i>GBM NAGRA</i> .....	87
5.5.5	<i>Shrnutí a porovnání výsledků termofyzikálních vlastností pro vybrané materiály</i> .....	89
5.5.6	<i>Porovnání naměřených dat s existujícími početními řešeními</i> .....	90
5.6	ANALÝZA FYZIKÁLNÍHO MODELU MCJ.....	91
5.6.1	<i>Monitoring fyzikálního modelu</i> .....	92
5.6.1.1	Vývoj tlaku.....	94
5.6.1.2	Závěry z monitoringu tlaku .....	94
5.6.1.3	Vývoj teplot v bentonitové bariéře .....	96
5.6.1.4	Monitoring okolního masivu .....	97
5.6.2	<i>Odběry vzorků bentonitu</i> .....	98
5.6.2.1	Závěry z odběrů z experimentu MCJ .....	99
5.6.3	<i>Hornina</i> .....	103
5.6.4	<i>Závěry analýzy fyzikálního modelu MCJ</i> .....	104
5.6.5	<i>Porovnání výsledků z MCJ a s finským fyzikálním modelováním</i> .....	107
5.6.6	<i>Ověření výsledků a předpokladů z experimentu</i> .....	110
5.7	DEFINOVÁNÍ PARAMETRŮ BENTONITOVÉ VRSTVY Z PELET NA ZÁKLADĚ ZÍSKANÝCH POZNATKŮ A STANOVENÍ VLIVU TECHNOLOGICKÉ SPÁRY .....	111
<b>6</b>	<b>SHRUTÍ, DISKUSE A DOPORUČENÍ PRO DALŠÍ PRÁCE</b> .....	<b>113</b>
6.1	VÝBĚR MATERIÁLU, VÝROBA A VYUŽITÍ PELET.....	113
6.2	ZKOUŠKY SPÁR .....	116
6.3	PLNĚNÍ TECHNOLOGICKÝCH SPÁR V HÚ .....	117
6.4	STANOVENÍ TERMOFYZIKÁLNÍCH VLASTNOSTÍ ZKOUŠENÝCH MATERIÁLŮ.....	118
6.5	VÝSLEDKY Z FYZIKÁLNÍCH MODELŮ A ZAPLNĚNÍ TECHNOLOGICKÉ SPÁRY .....	119
<b>7</b>	<b>ZÁVĚRY</b> .....	<b>120</b>
<b>8</b>	<b>SYMBOLY</b> .....	<b>123</b>





<b>9</b>	<b>ZKRATKY A VYMEZENÍ NĚKTERÝCH POJMŮ .....</b>	<b>124</b>
<b>10</b>	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ.....</b>	<b>125</b>
<b>11</b>	<b>LITERATURA .....</b>	<b>133</b>
<b>12</b>	<b>PŘÍLOHY .....</b>	<b>145</b>
12.1	TECHNOLOGIE STŘÍKANÝCH JÍLŮ .....	145
12.2	ODBĚRY BENTONITU Z FYZIKÁLNÍHO MODELU .....	154
12.2.1	<i>Odběr č. 1.....</i>	<i>154</i>
12.2.2	<i>Odběr č. 2.....</i>	<i>155</i>
12.2.3	<i>Odběr č. 3.....</i>	<i>157</i>
12.2.4	<i>Odběr č. 4.....</i>	<i>158</i>
12.2.5	<i>Odběr č. 5.....</i>	<i>159</i>
12.3	VLASTNOSTI TONALITU Z MÍSTA EXPERIMENTU MCJ .....	161
<b>13</b>	<b>VYBRANÉ VÝSLEDKY Z MĚŘENÍ TERMOFYZIKÁLNÍCH VLASTNOSTÍ.....</b>	<b>164</b>
13.1	GBM – GRANULATED BENTONITE MIXTURE .....	164
13.2	B 75 PEL 15 DRCENÉ.....	165
13.3	REC MIX I.....	166
13.4	REC MIX II.....	167



# 1 ÚVOD

Hlavním cílem práce je návrh a experimentální výzkum zaplnění tzv. technologických spár, a to mezi horninou a bentonitovou vrstvou při ukládání vyhořelého jaderného paliva v hlubinném úložišti. Téma práce bylo vybráno i na základě zkušeností s provozováním a výstavbou fyzikálního modelu Mock-Up Josef (MCJ). Výsledky z fyzikálního modelování jsou v práci využity k ověření některých poznatků. Po návrhu tématu práce byla provedená rešerše, která potvrdila aktuálnost zvolené problematiky.

Bezpečnost ukládání vyhořelého jaderného paliva je založena na multibariérovém systému, který musí zabránit případnému úniku radionuklidů do biosféry po požadované době stovky tisíců let. První bariérou je konstrukce tzv. úložného obalového souboru (ÚOS). Dalšími bariérami jsou bentonitová vrstva obklopující ÚOS, vlastní hostitelská hornina a hloubka uložení (tzv. geobariéra).

Povolení pro výstavbu hlubinného úložiště má od roku 2016 zatím pouze finská společnost Posiva OY, a to pro výstavbu prvních částí (přístupových tunelů, šachet a experimentálních tunelů, viz Obr. 1). Finské HÚ je založené na systému KBS<sup>1</sup>, který vyvinula švédská společnost SKB<sup>2</sup>. Multibariérový systém KBS je navržen pro dva způsoby uložení úložného obalového souboru, a to KBS-3V (svislé uložení) a KBS-3H (vodorovné uložení). Obr. 2 zobrazuje řešení HÚ podle SKB a oba způsoby uložení. Ukládací tunely HÚ jsou vyraženy zhruba 500 m pod zemským povrchem, vyhořelé jaderné palivo je umístěné do ÚOS s měděným přebalem, bentonitová vrstva (buffer, může být z bloků, pelet, či kombinace) obklopuje ÚOS (canister) a tzv. backfill (bentonit či směs materiálů obsahující bentonit) je zaplnění přístupových tunelů.

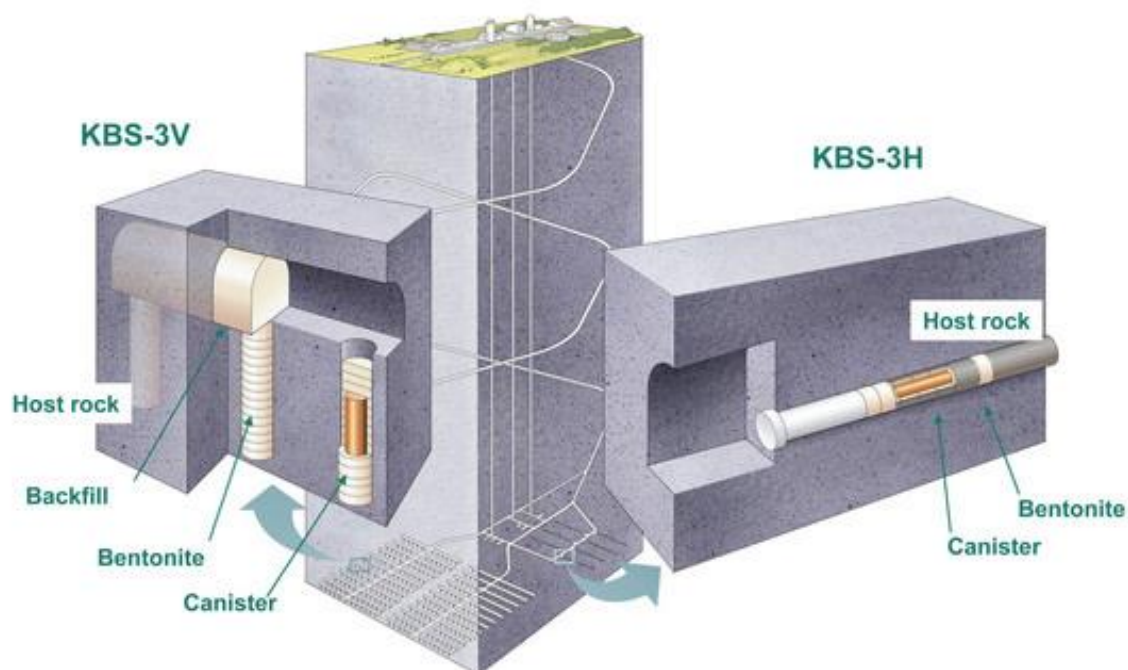
---

<sup>1</sup> KBS – zkratka pro úložný systém ÚOS (úložného obalového souboru) ze švédského slovního spojení kärnbränslesäkerhet. Toto spojení znamená bezpečnost jaderného paliva (<https://en.wikipedia.org/wiki/KBS-3>).

<sup>2</sup> SKB – švédská společnost odpovědná za ukládání radioaktivních odpadů Svensk Kärnbränslehantering AB



Obr. 1 – Obrázek z prvního úložiště pro vyhořelé jaderné palivo a další vysoceaktivní radioaktivní odpady ve Finsku – Olkiluoto; pohled do rozrážky pro testování technologií pro ukládání; foto autor 2017.



Obr. 2 – Švédské systémy KBS - 3V a KBS - 3H pro bezpečné uložení radioaktivních odpadů do horniny v hloubce zhruba 500 m pod zemským povrchem [1].



Pro omezení migrace radionuklidů z ÚOS jsou důležitými vlastnostmi bentonitové vrstvy nízká hydraulická vodivost<sup>3</sup>. Pro odvod tepla od ÚOS je podstatná dostatečná tepelná vodivost bentonitu<sup>4</sup>. Důležitou vlastností je i sorpční schopnost bentonitu, díky níž je bentonit schopen některé radionuklidy navázat do své struktury. V bentonitové vrstvě budou probíhat komplikované, vzájemně se ovlivňující procesy, a to mechanické změny (M), šíření vlhkosti a vody (H), šíření tepla (T) a chemické změny (C). Vliv na bentonitovou bariéru bude mít také nejspíše radioaktivní záření (R) [2], které vzniká při rozpadu radioaktivních prvků v ÚOS.

Mimo zmíněných fyzikálních a chemických parametrů budou mít vliv na bezpečnost i konstrukční řešení úložného místa. Konstrukční řešení musí zohlednit technologické možnosti výstavby zhruba 500 m pod povrchem země.

V České republice je prováděn výzkum zaměřený na problematiku ukládání radioaktivních odpadů několik desítek let. Materiálový výzkum byl směřován čtyřmi hlavními směry, a to na potenciální horninové prostředí, na bentonit, na kovové materiály pro úložný obalový soubor a na vyhořelé jaderné palivo. Drtivá většina výzkumu byla zaměřena na základní výzkum materiálů či na jejich interakce. V posledních letech jsou využívány pro ověření znalostí ze základního výzkumu fyzikální modely. Z velkých fyzikálních modelů byl první experiment Mock-up-Cz, který byl vystavěn a provozován Centrem experimentální geotechniky v laboratořích Fakulty stavební ČVUT v Praze. Na úspěšný laboratorní projekt se zahraniční účastí navázaly in-situ projekty Mock-up Josef (MCJ) a Bentonity 95. Oba in-situ projekty byly realizovány v Podzemní laboratoři Josef. Projekt Bentonity 95 byl ukončen v roce

---

<sup>3</sup> Pro migraci radionuklidů, ale není důležitá jenom hydraulická vodivost, i když je to hlavní sledovaný parametr bentonitové vrstvy. Např. v literatuře [76] se píše: „Pokud bude hydraulická vodivost nízká vzhledem k vysokému (dostačenému) zhutnění bentonitu, tak pohyb radionuklidů bude probíhat molekulární difusí“. Existují i další vlastnosti, které ovlivní migraci radionuklidů např. sorpce.

<sup>4</sup> Tepelnou vodivost bentonitu, stejně jako další vlastnosti, ovlivňují např. stupeň saturace, mineralogie bentonitu, zrnitostní složení, obsah pórů, atd.



2015 a projekt MCJ je i nadále provozován a poskytuje velice cenné informace o chování zatíženého bentonitu. Na řešení obou in-situ projektů se autor práce podílel.

Ve světovém měřítku je podrobněji řešena obdobná problematika ve Finsku. Výsledky práce, stejně jako ve finském výzkumu, pomohou při tvorbě přesnějších výpočtů, např. výpočet vývoje teplot v hlubinném úložišti. Práce je tedy po výzkumné stránce zaměřena i na termofyzikální chování bentonitu (hlavně pelet, ale i bloků).

Jedním z přínosů disertační práce je odzkoušení nových technologií pro lisování bentonitu do pelet a ověření vlastností vylisovaných pelet. Všechny práce spojené s lisováním bentonitových pelet byly zaměřeny na vývoj a odzkoušení poloprovozní technologie na území České republiky a s českým bentonitem. Odzkoušené bentonitové pelety mohou být využity i v dalších aplikacích. Např. jeden ze zkoušených materiálů byl použit při výstavbě funkčního modelu těsnící zátky<sup>5</sup> hlubinného úložiště v Podzemní laboratoři Josef.

Výsledky práce byly využity pro další výzkumné úkoly, a jak prokázaly realizované práce, mají potenciál při uplatnění v praxi, a to i mimo obor ukládání radioaktivních odpadů (např. těsnění vrtů).

---

<sup>5</sup> Zátka byla realizována v rámci evropského projektu DOPAS - Full-Scale Demonstration Of Plugs And Seals, FP7 323273 – název projektu zátka EPSP - Experimental Pressure and Sealing Plug,



## 2 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ

Během rešeršních prací nebyly nalezeny v České republice konkrétní příklady řešení zvoleného tématu s využitím českého bentonitu. Lze tedy říci, že téma práce je aktuální a přinese nové poznatky využitelné v problematice ukládání radioaktivních odpadů v hlubinném úložišti.

V úvodu kapitoly je také nutné zmínit, že v zahraničí se předpokládá ve většině případů využití sodného bentonitu a v České republice se předpokládá využití vápenato-hořečnatého bentonitu. I když jde o bentonity s různou mineralogií, lze některé výsledky ze zahraničních projektů porovnávat s výsledky výzkumu dosaženými v této práci na českém, vápenato-hořečnatém bentonitu.

### 2.1 Hlubinné úložiště v ČR

Jedním z nejdůležitějších úkolů pro dlouhodobou izolaci radionuklidů je výběr vhodného místa pro výstavbu HÚ. Na území České republiky byly vybrány na základě regionálních geologických poměrů lokality, ve kterých by mohly být vysoce aktivní radioaktivní odpady uloženy, a lze předpokládat, že HÚ bude umístěno v granitech. V současnosti je vybráno několik lokalit pro podrobnější průzkum (geologie, hydrogeologie, seismika, apod.).

Kvalitní horninové prostředí bude přírodní bariérou bránící úniku radionuklidů. Přírodní bariéru budou doplňovat inženýrské bariéry. Jednou z inženýrských bariér je bentonitová bariéra. Důležitými geotechnickými vlastnostmi bentonitů pro maximální omezení migrace radionuklidů jsou hydraulická vodivost, propustnost pro plyny, difúze, a také sorpce. Důležitou vlastností pro zaplnění volných prostor a pro tzv. samohojení bentonitu je bobtnací schopnost bentonitu. Podstatná je také dostatečná tepelná vodivost, která je velice významná pro odvod tepla od ÚOS s vyhořelým jaderným palivem.

Mimo geotechnických vlastností je celá řada dalších, na které je třeba v průběhu návrhu jílové bariéry brát zřetel. V bentonitu budou probíhat změny (procesy), které souvisí zejména s mechanickým chováním materiálů (M), s průnikem vody (H), s šířením tepla



(T), biologickou aktivitou (B) a chemickými změnami (C). Vliv na jílovou bariéru bude mít pravděpodobně také radioaktivní záření (R), které vzniká při rozpadu prvků v ÚOS. Nejvhodnějšími modely pro popis procesů jsou komplexní (THMBCR) fyzikální modely. Komplexní fyzikální modely lze provozovat pouze v plánovaných podzemních laboratořích, které budou postaveny ve vybraných místech pro hlubinné úložiště, a které budou mít licenci pro práce spojené s manipulací vysoceaktivních radionuklidů. Před stavbou komplexních modelů je důležité získat představu o chování systému uložení pomocí méně složitých modelů, které jsou zaměřeny na některé ze sledovaných procesů v systému uložení. Data z fyzikálních modelů lze použít pro matematické modelování, které umožňuje simulaci chování systému uložení v dlouhodobém časovém horizontu.

Hlubinné úložiště je, ve většině případů (mimo ukládání do velkoprofilových vrtů o délkách několika kilometrů), systém na sebe navazujících tunelů. Tunely budou ukládací a přístupové. Vyražená podzemní část v hloubce okolo 500 m bude s povrchem spojena šachtami, komíny a přístupovými tunely. Všechny podzemní části budou muset být postupně zaplněny. Zaplňování bude probíhat podle harmonogramu ukládání ÚOS v úložných místech a jednotlivých tunelech.

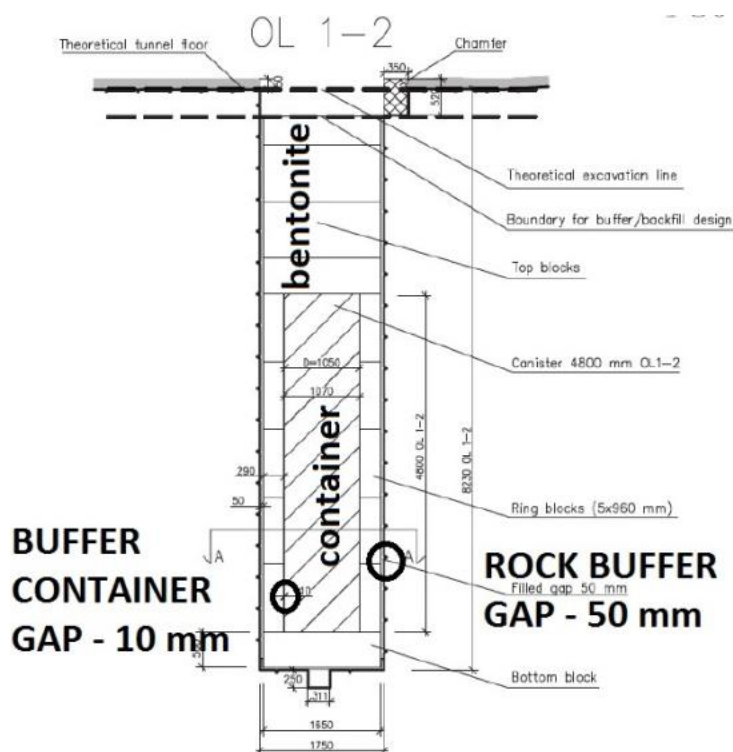
Podle požadavků kladených na materiál a místa jeho použití by měla být bentonit využitý při dvojí aplikaci. Buffer je bariéra s převažující tlumicí a těsnicí funkcí a obklopuje ÚOS. Backfill je bariéra s funkcí výplňovou a bude vyplňovat přístupové tunely k úložným místům s ÚOS.

Autor se v průběhu předchozího studia a experimentální činnosti podrobně seznámil s oběma využitími materiálu. Podle získaných zkušeností a provedené rešerše lze říci, že stále existují problémy, které by mohlo využití pelet, se správně zvolenou technologií aplikace, vyřešit, viz například vybrané téma této práce - řešení zaplnění spáry mezi bloky a horninou. Během rešeršní činnosti byla získána informace o probíhajícím mezinárodním projektu Lucoex (pracovní skupina WP 5 [3]), ve kterém se mj. řešilo zaplnění technologické spáry mezi horninou a bentonitovými bloky peletami. Předpokládané použití pelet pro zaplnění prostoru mezi stěnou úložné studny a lisovanými bentonitovými prefabrikáty je potvrzeno i v publikaci vydané Evropskou komisí - The Joint EC/NEA Engineered Barrier System Project: Synthesis Report (EBSSYN) z roku 2010 [4].

## 2.2 Technologické spáry

V ČR dosud nebyla věnována tématu větší pozornost, pouze v některých výzkumných zprávách byly citovány zahraniční reference, např. v [5]. V zahraničí jsou, mimo evropské publikace pojednávající obecně o systému uložení [4], podrobněji řešeny technologické spáry ve Finsku, např. [6] [7] [8]. Finská společnost POSIVA OY je nejdále s procesem licencování a implementace HÚ. Zaplnění spáry bylo také řešeno ve švédsko-finském projektu Prototype Repository Project, např. [9], v Japonsku [10] a také nově v Číně [11].

V hlubinném úložišti jsou v blízkosti ÚOS charakterizovány dva druhy technologických spár – spára mezi ÚOS a bentonitem a spára mezi bentonitem a horninou [12]. Na Obr. 3 jsou vyznačeny a popsány oba druhy technologických spár.



Obr. 3 – Svislý řez návrhem konstrukčního řešení úložného místa pro ÚOS ve finském konceptu [6] s vyznačením technologických spár včetně rozměrů (10 mm spára mezi bentonitovými bloky a ÚOS (BUFFER CONTAINER GAP); 50 mm spára mezi bentonitovými bloky a horninou (ROCK BUFFER GAP)).





### 2.2.1 Důvody pro zaplnění technologické spáry mezi bentonitem a horninou

Výzkumné práce v zahraničí (hlavně Finsko) se zabývaly např. vlivem různého vyplnění spár na teplotu v bentonitu. Jedním z cílů výzkumu je simulovat průběh maximální teploty bentonitu v čase, např. [13]. Vždy byl prokázán pozitivní vliv zaplnění spáry mezi bentonitem a horninou na odvod tepla od ÚOS. Existují i další důvody, v knize [8] se uvádí: „*Důvody pro zaplnění spáry je zlepšení tepelných, mechanických a chemických vlastností celého systému jako celku*“. Některé práce se zabývají konkrétními důvody, např. možnou erozí bentonitových bloků při přítoku vody z horniny do nezaplňené spáry [14], dále pak je jmenován jako důvod zamezení odpadávání úlomků horniny do volné spáry [8] a důležité je také zvýšení množství (objemové hmotnosti) bentonitu okolo ÚOS. Předchozí práce totiž prokázaly, že důležité vlastnosti bentonitu - hydraulická vodivost a bobtnací tlak - exponenciálně závisí na zhutnění bentonitu, např. [15]. Pokud by zaplnění spáry zvýšilo průměrnou objemovou hmotnost sušiny bentonitu v místě uložení ÚOS např. o 5 %, tak by se vlastnosti (hydraulická vodivost a bobtnací tlak) mohly zlepšit např. o 15 %, vždy záleží na hodnotě objemové hmotnosti sušiny.

Ve finském výzkumu [16] bylo provedeno několik testů zaplnění spáry o tloušťce 50 mm ( $\pm 25$ mm) zaměřených i na studium tlaků (radiální i axiální, bobtnací) v testovací komoře, viz Obr. 4. Byly zkoušeny různé způsoby zaplnění spáry (písek, bentonitová suspenze (tekutá směs bentonitu s vodou), různé druhy bentonitových pelet). Ve finském výzkumu bylo prokázáno: „*Bentonitové pelety byly více efektivní při generování a udržení bobtnacího tlaku, obzvláště při velikosti spáry 50 mm korespondující s nynějším referenčním návrhem* [16]“.



Obr. 4 – Vlevo obrázek finských testů zaplnění technologické spáry (zkoušky nerovnoměrně široké spáry) a vpravo model testovací komory [16].

### 2.2.2 Rozměry technologické spáry

Zahraniční práce se také zabývají vlastním technologickým řešením zaplnění technologické spáry v systému KBS -3V, např. [7]. Ve všech dostupných pracích se výzkum zaměřil na studium šířky technologické spáry 35 mm [13] a případně 50 mm [7]. Finské práce [8] předpokládají určitou nepřesnost při ukládání ÚOS a bentonitových bloků a rozměry technologické spáry mezi bloky a horninou se mohou pohybovat v rozmezí  $\pm 25$  mm (spára 50mm). Podle [8] je tedy nutné počítat s případnou šířkou spáry až 75 mm. V [8] je také uvedeno shrnutí předpokládaných rozměrů bentonitových bloků a dalších vlastností včetně rozměrů, viz Obr. 5.

Design parameter	Design value	Allowed deviation
<b>Disk blocks</b>		
Water content of disk blocks	17%	±1%-unit
Bulk density of disk blocks	1990 kg/m <sup>3</sup>	±20 kg/m <sup>3</sup>
Disk block outer diameter	1650 mm	±2 mm
Disk block height	400, 500 800 mm	±1 mm
<b>Ring blocks</b>		
Water content of ring blocks	17%	±1%-unit
Bulk density of ring blocks	2050 kg/m <sup>3</sup>	±20 kg/m <sup>3</sup>
Ring block outer diameter	1650 mm	±2 mm
Hole diameter in ring blocks	1070 mm	±1 mm
Ring block height	OL3: 875 mm LO1,2: 900 mm OL1,2: 960 mm	+2 mm
Inner gap width, buffer to canister	10 mm	
Outer gap width, buffer to rock	50 mm	±25 mm
<b>Pellets</b>		
Bulk density separate pellets	1850 kg/m <sup>3</sup>	±70 kg/m <sup>3</sup>
Dimensions	11x11x5 mm <sup>1)</sup>	-
Bulk density of pellets	1075 kg/m <sup>3</sup>	±50 kg/m <sup>3</sup>
Water content of pellets	17%	±1%-unit

Obr. 5 – Předpokládané rozměry a vlastnosti bentonitové vrstvy ve Finsku podle referenčního návrhu pro systém ukládání KBS 3V [6] [16] (disk blocks – plné bloky pod a nad ÚOS, ring blocks bloky okolo ÚOS).

### 2.2.3 Technologie zaplnění technologické spáry a výsledky ze zahraniční

Stejně jako v této práci se ve Finsku zabývají zaplněním spáry dvěma možnými způsoby, a to tzv. volným sypáním (s případným dohutněním) anebo technologií stříkaných jíílů, např. [7]; [8]. Při určování vhodnosti technologie je vždy hlavním parametrem dosažená objemová hmotnost sušiny bentonitu. Při zkouškách popsaných v [7]; [8] byly testovány různé druhy úprav bentonitu (pelety, granuláty, směsi). Výsledky objemové hmotnosti sušiny z finského výzkumu zaplnění spáry 35 mm shrnuje [7], viz Obr. 6.



Pellet/Granule material	Average dry density, Mg/m <sup>3</sup>	Average EMDD, Mg/m <sup>3</sup>	Water content, weight-%
Ibeco, Free fall pouring	0.829	0.71	16.1
Ibeco, Free fall pouring	0.833	0.71	16.1
Cebogel, Free fall pouring	0.904	0.78	22
Ibeco, Spraying	0.912	0.78	16.1
Ibeco, Spraying	0.934	0.80	16.1
Cebogel, Spraying	0.950	0.82	21.8
Mixture of Cebogel and Ibeco 65/35, Free fall pouring	0.981	0.85	19.5
Cebogel, Spraying	0.998	0.86	21.8
Minelco, Spraying	1.009	0.87	14.9
Minelco, Spraying	1.023	0.89	14.9
Minelco, Free fall pouring	1.032	0.90	14.2
Mixture of Cebogel and Ibeco 65/35, Free fall pouring+fork type vibrator	1.049	0.91	19.5
Mixture of Cebogel and Minelco 65/35, Spraying	1.056	0.92	18.6
Mixture of Cebogel and Minelco 65/35, Free fall pouring	1.067	0.93	18.1
Mixture of Cebogel and Ibeco 65/35, Spraying	1.069	0.93	19.5
Mixture of Cebogel and Minelco 65/35, Spraying	1.073	0.93	18.6
Mixture of Cebogel and Ibeco 65/35, Spraying	1.078	0.94	19.5
Minelco, Free fall pouring+Proctor hammer	1.092	0.95	14.2
Minelco, Free fall pouring+Proctor hammer	1.094	0.95	14.2
Mixture of Cebogel and Minelco 65/35, Free fall pouring+fork type vibrator	1.134	0.99	18.1
Mixture of Cebogel and Minelco 65/35, Free fall pouring	1.141	1.00	18.1
Mixture of Cebogel and Minelco 65/35, Free fall pouring+vibrator	1.196	1.05	18.1

Obr. 6 – Tabulka shrnující dosažené výsledky ve Finském výzkumu spáry o šířce 35 mm; důležitá je Average dry density – průměrná objemová hmotnost sušiny [7] (Pellet je označení pro zkušební materiály a za názvem např. Cebogel je uvedené stříkání (spraying); volné sypání (Free fall pouring) anebo volné sypání a strojové setřesení (free fall pouring +vibrator anebo + Proctor hammer)).



## 2.3 Vlastnosti bentonitové vrstvy

Při řešení problematiky hlubinného ukládání je bentonit uvažován za jeden z hlavních materiálů pro konstrukci inženýrských bariér [17]. Bentonit je nutné charakterizovat z různých hledisek (geotechnika, geochemie, mineralogie, biologie, atd.) a podle místa využití bentonitu (buffer či backfill). Bentonity musí splňovat kritéria, která budou určena na základě důkladného výzkumu a vývoje. Mezi důležité geotechnické vlastnosti patří: hydraulická vodivost, tepelná vodivost, bobtnací tlak, plasticita (konzistenční meze), mechanické vlastnosti (pevnost v tlaku) a reologie (stálost vlastností v čase).

Důležité pro odvození využitelnosti zkoušených technologií je sledování zhutnění bentonitu, které je vyjádřené objemovou hmotností sušiny. V ČR a i v zahraničí se objemová hmotnost sušiny používá jako základní parametr pro odvození dalších vlastností bentonitové vrstvy (např. hydraulické vodivosti, biologické aktivity, bobtnacího tlaku, atd.) [17]. Podle objemové hmotnosti sušiny lze tedy určit, zda je např. nutné bentonit více zhutnit, aby splnil požadavek na nízkou propustnost pro použití v okolí ÚOS (bufferu). Hranice pro minimální zhutnění bentonitu není prozatím v ČR stanovena.

## 2.4 Termofyzikální vlastnosti bentonitové vrstvy

Hlavním důvodem pro zaplnění technologické spáry je odvod tepla od ÚOS do horniny (např. [13]). Z tohoto důvodu bylo více řešeršních a výzkumných aktivit v této práci věnováno právě termofyzikálním vlastnostem bentonitové vrstvy. Mezi termofyzikální vlastnosti patří: tepelná vodivost, měrná tepelná kapacita a tepelná difuzivita. Tepelná vodivost je klíčovou vlastností pro tepelné výpočty. Dříve realizované práce, např. [5] [18] [13], uvádějí, že termofyzikální vlastnosti závisí na mineralogickém a zrnitostním složení bentonitu, teplotě prostředí, objemové hmotnosti a vlhkosti bentonitu.

Obecně se rozlišují tři druhy přenosu tepla: vedením (kondukcí) v látkách, prouděním (konvekcí) látek (kapalin, plynů) a elektromagnetickým vlněním (radiací). Pro jíly lze uvažovat o přenosu tepla pouze vedením, které probíhá ve spojitém látkovém prostředí. Jednotlivé částice látky si navzájem předávají kinetickou energii neuspořádaných



tepelných pohybů, která se tím přenáší z míst s vyšší teplotou do míst s nižší teplotou. Vedení tepla probíhá ve všech fázích bentonitu (kapalné, plynné a pevné fázi).

Rychlost přenosu tepla vyjadřuje tepelný tok nebo tepelný výkon  $Iq$  [W] (teplo přenesené plochou za jednotku času):

$$Iq = \frac{dQ}{d\tau} \quad \text{Rovnice 1,}$$

kde:  $Q$  [J] teplo,  $\tau$  [s] čas

Hustota tepelného toku  $q$  ( $\text{J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $\text{Wm}^{-2}$ ) je definována:

$$q = \frac{Q}{S} \quad \text{Rovnice 2,}$$

kde:  $Q$  [J] teplo;  $S$  [ $\text{m}^2$ ] plocha kolmá k tepelnému toku

Množství tepelné energie  $Q$ , které projde za čas  $\tau$  plochou  $S$  do hloubky  $d$  se určí ze vztahu:

$$Q = \lambda S \frac{\Delta T}{d} \tau \quad \text{Rovnice 3,}$$

kde:  $\lambda$  [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ;  $\text{J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ] součinitel tepelné vodivosti;  $\Delta T$  rozdíl teplot na vzdálenosti  $d$  [m]

#### 2.4.1 Experimentálně měřené termofyzikální vlastnosti bentonitu

Matematickým základem metod pro měření termofyzikálních veličin je diferenciální rovnice pro vedení tepla:

$$c_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div} (\lambda \text{grad} T) + q_0 \quad \text{Rovnice 4}$$

Pro izotropní látky můžeme rovnici přepsat na tvar:

$$c_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q_0 \quad \text{Rovnice 5}$$

**Tepelná vodivost** látek vyjadřuje schopnost vést teplo. Jedná se o číselné vyjádření množství tepla, které v ustáleném stavu prochází jednotkovým průřezem látky v jednotkovém gradientu za jednotku času. Schopnost látky vést teplo charakterizuje součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$  [ $\text{W}/\text{m}/\text{K}$ ]. Součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$  (měrná tepelná vodivost) je tedy výkon (teplo za jednotku času), který projde každým čtverečním



metrem desky o tloušťce 1m, jejíž jedna strana má o 1 Kelvin vyšší hodnotu než protilehlá (ve směru vedení tepla).

Součinitel tepelné vodivosti je definován Fourierovým zákonem

$$q_0(r) = \text{div } q = \text{div } (-\lambda \text{grad} T) = -\lambda \Delta T$$

$$\lambda = -\frac{q_0(r)}{\Delta T} \quad \text{Rovnice 6,}$$

kde:  $q_0(r)$  je tepelný výkon v jednotkovém objemu látky [ J.m<sup>-3</sup>.s<sup>-1</sup> ];  $\text{grad } T$  je gradient termodynamické teploty [ K ];  $\lambda$  [W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>] součinitel tepelné vodivosti

**Měrná tepelná kapacita**  $c$  [J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>] je teplo  $dQ$  nutné pro zvýšení teploty o  $dT$ . Měrná tepelná kapacita se tedy rovná teplu potřebnému k ohřátí látky o hmotnosti 1kg o 1K. Obecně se rozlišují měrná tepelná kapacita při stálém tlaku  $c_p$  a měrná tepelná kapacita při stálém objemu  $c_v$ .

$$c = \frac{1}{m} \frac{dQ}{dT} \quad \text{Rovnice 7,}$$

kde:  $m$  hmotnost látky [kg]

**Tepelná difuzivita**  $a$  [m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>] je schopnost látky vyrovnávat teplotní rozdíly při neustáleném vedení tepla v homogenním prostředí.

$$a = \frac{\lambda}{c_p \rho} \quad \text{Rovnice 8,}$$

kde  $\rho$  je hustota látky [kg.m<sup>-3</sup>]

## 2.4.2 Stanovení termofyzikálních vlastností bentonitové vrstvy

Cílem rešeršních prací v této kapitole bylo ověření vhodnosti vybraného měření pro stanovení termofyzikálních vlastností bentonitu. Druhá část kapitoly je zaměřena na rešerši dostupných početních řešení pro stanovení součinitele tepelné vodivosti bentonitu.

### 2.4.2.1 Existující metody pro měření

Přístrojové vybavení dostupné na pracovišti autora je přístroj ISOMET 2114. Tento typ nahradil starší typ ISOMET 2104. Způsob měření přístrojem ISOMET 2114 se nazývá Thermal probe method - tedy měření tepelnou sondou. Existují i další způsoby, např.



v práci [19] zabývající se měření termofyzikálních vlastností bentonitových pelet jsou uvedené další dvě metody. Celkem jsou tedy v práci [19] popsány tři metody:

1. Metoda měření tepelnou sondou (Thermal probe method)
2. Metoda měření tepelného toku (Heat flow meter method)
3. Metoda horkého disku (Hot disk method)

#### **2.4.2.2 Existující početní vztahy pro početní řešení tepelné vodivosti bentonitu**

Velice dobře jsou možnosti výpočtu součinitele tepelné vodivosti prezentovány v článku „A study on the thermal conductivity of compacted bentonites“ [18], který popisuje tři způsoby výpočtu. Další byly popsány v disertační práci Ing. Radka Vašíčka, Ph.D. [5], v práci Ould-Lahoucine [20] a ve finské práci věnující se zaplnění technologických spár [19].

##### **2.4.2.2.1 JOHANSENOVA METODA**

Početní řešení bylo připraveno Johansenem v roce 1975 [18] pro dobře zrněné zeminy se stupněm saturace  $S_r$  větším než 20%. Součinitel tepelné vodivosti je vyjádřen jako:

$$\lambda = (\lambda_{sat} - \lambda_{dry})K_e + \lambda_{dry} \quad \text{Rovnice 9,}$$

kde:  $\lambda_{sat}$  a  $\lambda_{dry}$  jsou tepelné vodivosti pro stejné objemové hmotnosti sušiny;  $K_e$  je funkce reprezentující vliv stupně saturace  $S_r$  na  $K$

$$K_e = 1.0 + \log_{10} S_r \quad \text{Rovnice 10}$$

Pro zeminy platí:

$$\lambda_{sat} = \lambda_s^{(1-n)} \lambda_w^n \quad \text{Rovnice 11,}$$

kde  $n$  je porosita a  $\lambda_w$  je tepelná vodivost vody





$$\lambda_s = \lambda_q^q \lambda_0^{1-q} \quad \text{Rovnice 12,}$$

kde  $\lambda_q=7,7$  W/m/K (tepelná vodivost křemene),

$\lambda_0=2.0$ W/m/K (tepelná vodivost dalších minerálů)

$$\lambda_{dry} = \frac{0.135\rho_d + 64.7}{\rho_s - 0.947\rho_d} \quad \text{Rovnice 13}$$

Dosazené hodnoty pro výpočet v [18] :

$K_s$  (pevné fáze)= 2.08W/m/K pro MX80

$K_w$  (vody) = 0.57 W/m/K

Objemové hmotnosti sušiny byly vkládány v jednotkách kg/m<sup>3</sup>.

#### 2.4.2.2 POČETNÍ ŘEŠENÍ PODLE DE VRIES (1963):

$$\lambda = \frac{(V_w/V)\lambda_w + F_a(V_a/V)\lambda_a + F_s(V_s/V)\lambda_s}{(V_w/V) + F_a(V_a/V) + F_s(V_s/V)} \quad \text{Rovnice 14,}$$

kde V objem vzorku, V<sub>w</sub> objem vody, V<sub>s</sub> objem pevné fáze, V<sub>a</sub> objem pórů; F<sub>s</sub> a F<sub>a</sub> jsou faktory ovlivňující velikost a orientaci zrn zeminy a volných pórů [18] .

$$F_s = \frac{1}{3} \left\{ \frac{2}{1 + \left(\frac{\lambda_s}{\lambda_w} - 1\right)0.125} + \frac{1}{1 + \left(\frac{\lambda_s}{\lambda_w} - 1\right)0.75} \right\} \quad \text{Rovnice 15}$$

$$F_a = \frac{1}{3} \left\{ \frac{2}{1 + \left(\frac{\lambda_a}{\lambda_w} - 1\right)g_a} + \frac{1}{1 + \left(\frac{\lambda_a}{\lambda_w} - 1\right)g_c} \right\} \quad \text{Rovnice 16,}$$

kde  $g_a = 0.333 - \frac{V_a/V}{n}(0.333 - 0.35)$  a  $g_c = 1 - 2g_a$

Dosazené hodnoty pro výpočet v [18] :



$\lambda_s$  (pevné fáze) = 1.5 W/m/K pro MX80

$\lambda_w$  (vody) = 0.57 W/m/K

Objemové hmotnosti sušiny byly vkládány v jednotkách  $\text{kg/m}^3$ .

#### 2.4.2.2.3 POČETNÍ ŘEŠENÍ DLE SAKASHITY A KUMADY (1998)

Toto početní řešení bylo vybráno jako nejvhodnější pro bentonity, které byl zkoušené v pracích Ould-Lahoucine [20].

$$\lambda = \lambda_{dry} \left\{ 1 + [(9.750n - 0.706)S_r]^{0.285n+0.731} \right\} \quad \text{Rovnice 17}$$

$$\lambda_{dry} = 0.0497 + 0.222(1-n) + 0.968(1-n)^3 \quad \text{Rovnice 18}$$

#### 2.4.2.2.4 LINEÁRNÍ KORELACE PODLE TANG, ANH-MINH, YU-JUN CUI A TRUNG-TINH LE. "A STUDY ON THE THERMAL CONDUCTIVITY OF COMPACTED BENTONITES" (2006)

V článku [18] byla definována korelace na základě naměřených výsledků tepelné vodivosti pro MX 80:

$$\lambda = \alpha \frac{V_a}{V} + \lambda_{sat} \quad \text{Rovnice 19,}$$

kde  $V_a/V$  porosita  $n$ ,  $\alpha$  parametr, který byl kalibrován v práci [18], viz Obr. 7 (v obrázku je také uvedeno  $\lambda_{sat}$  ( $K_{sat}$ ))

Work	Bentonite	$N_0$	$N_{total}$	$\alpha$	$K_{sat}$
Present work	MX80	7	27	-2.22	1.15
Villar (2000)	Cabo de Gata	2	56	-1.68	1.19
Ould-Lahoucine et al. (2002)	Kunigel-V1	2	14	-2.37	1.34
Kahr & Müller-Vonmoos (1982)	MX80	2	27	-2.15	1.31

$N_0$ : number of results used for calibration;

$N_{total}$ : number of results measured

Obr. 7  $\lambda_{sat}$  ( $K_{sat}$ ) a  $\alpha$  parameter pro MX80 [18]



#### 2.4.2.2.5 VÝPOČET PODLE KAHR A MÜLLER-VON MOOS (1982) [5]

Autoři uvádí, že použití vzorce bez dalších detailních informací je problematické. V jejich případě se vypočtené hodnoty lišily od naměřených.

$$\lambda = 0,56 + 0,60\rho + \frac{0,4\rho^3 w}{w + 1} \quad \text{Rovnice 20,}$$

kde  $w$  hmotnostní vlhkost [g/g],  $\rho$  objemová hmotnost [g/cm<sup>3</sup>]

#### 2.4.2.2.6 VÝPOČET PODLE KNUTSSON (1983) [5]

$$\lambda = \lambda_0 + K_e (\lambda_1 - \lambda_0) \quad \text{Rovnice 21,}$$

kde:

$$\lambda_0 = 0.034 \cdot n^{-2.1} \quad \text{Rovnice 22}$$

$$\lambda_1 = 0.56^n \cdot 2^{(1-n)} \quad \text{Rovnice 23}$$

$$K_e = 1 + \log S_r \quad \text{Rovnice 24,}$$

kde:

$\lambda_0$  tepelná vodivost při  $S_r = 0$  [W/m/K]

$\lambda_1$  tepelná vodivost při  $S_r = 100\%$  [W/m/K]

$K_e$  koeficient reprezentující vliv stupně saturace  $S_r$

$n$  pórovitost [cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>]

$$n = (\rho_s - \rho_d) / \rho_s \quad \text{Rovnice 25,}$$

kde:

$\rho_d$  = objemová hmotnost sušiny [g/cm<sup>3</sup>]

$\rho_s$  = specifická objemová hmotnost [g/cm<sup>3</sup>]



#### 2.4.2.2.7 VÝPOČET PODLE BEZIAT ET. AL. (1988) [19]

Tato metoda byla původně připravena pro francouzský jíl. V práci na bentonitu MX 80 byla použita Beziatova metoda jako odpovídající experimentálnímu měření pro MX 80.

$$\lambda = \lambda_s^{1-n} \lambda_w^{n \cdot S_r} \lambda_a^{n(1-S_r)} \quad \text{Rovnice 26,}$$

kde:

$\lambda_s$  tepelná vodivost pevné fáze = 2.6 W/m/K,

$\lambda_w$  tepelná vodivost vody = 0.6 W/m/K,

$\lambda_a$  tepelná vodivost vzduchu = 0.024 W/m/K,

$n$  pórovitost

$S_r$  stupeň saturace

#### 2.4.2.2.8 VÝPOČET PODLE SUZUKI & TANIGUCHI (1999) [5]

Pro bentonit při objemové hmotnosti sušiny 1,8 g/cm<sup>3</sup>.

$$\lambda = 5.18 \cdot 10^{-1} + 6.00 \cdot 10^{-2} w + 9.76 \cdot 10^{-4} w^2 - 8.00 \cdot 10^{-5} w^3 \quad \text{Rovnice 27}$$

## 2.5 Bentonitové pelety

Jako bentonitové pelety (směsi bentonitových pelet) se označují různé druhy upraveného lisovaného bentonitu s upravenou zrnitostí. Termínem bentonitová peleta mohou být označeny:

1. Válečky – lisované protlačováním skrz matrici o určitém průměru, např. 12 mm.
2. Čočky – lisované mezi dvěma protijedoucími válci, ve kterých jsou připravené otvory pro lisování čoček.
3. Koule o průměru např. 25 mm, ale i o průměru 2,5 mm.
4. Destičky – různé způsoby lisování.
5. Briketky – lisování mezi perforovanými válci (Obr. 8).
6. Drtě z předešlých jmenovaných.
7. Drt' z lisovaných bloků.
8. Různě zrnité směsi s různým podílem předešle jmenovaných, včetně jemně mletého bentonitu či různě drcených válečků apod.

V České republice se bentonitové pelety nevyrábí a existují pouze firmy, které je na český trh dováží (Getra [21] a Adassi Moravia [22]). Různé druhy pelet se hlavně využívají pro těsnění vrtů pro studny či tepelná čerpadla.



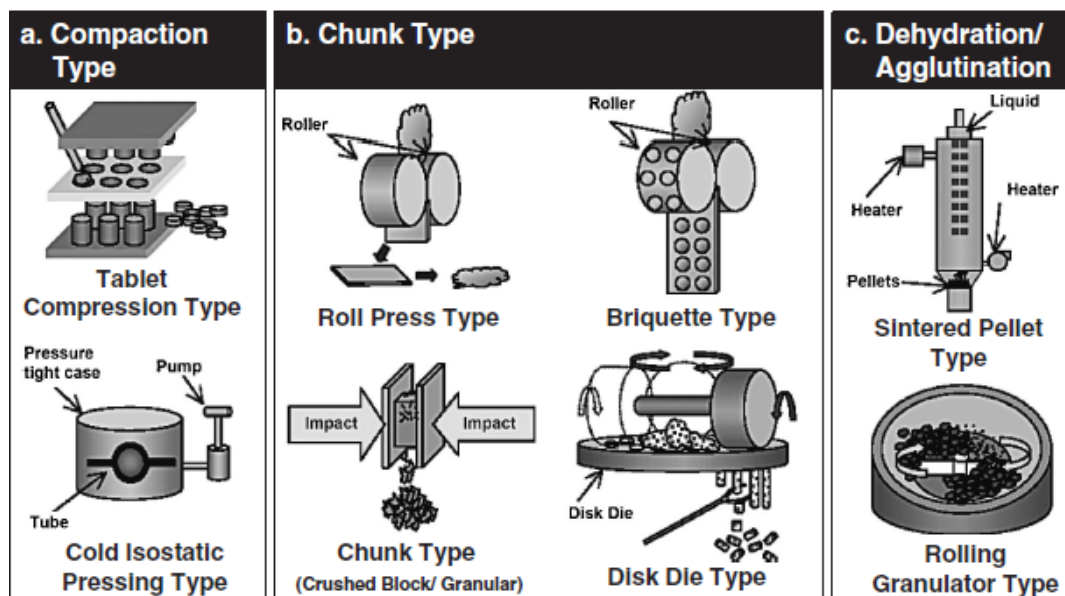
Obr. 8 – Foto bentonitových pelet (briketek) vyrobených lisováním mezi válci s perforací (foto autor).



### 2.5.1 Možné technologie výroby pelet

Pro výrobu bentonitových pelet se využívá několik způsobů, více v následujícím přehledu a také na Obr. 9:

1. Lisování tablet a čoček pomocí malých forem – jedná se o lisování bentonitu pomocí lisu a forem pro jednotlivé pelety.
2. Lisování pelet stlačeným vzduchem (izostatické lisování) – lisování bentonitu tlakem vzduchu, kdy je bentonit stlačený v membráně o rozměrech odpovídajících velikosti pelety.
3. Lisování mezi válci:
  - a. Lisování mezi válci s hladkou stěnou – kontinuální lisování.
  - b. Lisování mezi válci s perforovanou stěnou – v lisovacích válcích jsou připraveny otvory, které odpovídají rozměru pelet.
4. Drcení větších bloků bentonitu – vylisované bentonitové bloky o objemu několika desítek  $\text{cm}^3$  se rozdrťí na menší bloky, např. o objemu do  $1 \text{ cm}^3$ .
5. Zhutňování bentonitu protlačováním skrz matrici s otvory o určitém průměru – vytvářejí se bentonitové válečky různých délek o stejném průměru, jako jsou otvory v matrici.
6. Sušení bentonitové pasty - sušení husté suspenze bentonitu a vody, sušením dojde k rozdělení směsi na různě velké agregáty bentonitu, avšak vzhledem k principu výroby dosahuje nízkých objemových hmotností.
7. Shlukování menších bentonitových zrn do větších celků - vlivem otáčivého pohybu nádoby stroje do sebe zrna bentonitu narážejí a tvoří větší celky (agregáty).



Obr. 9 – Možnosti výroby pelet [23] – uvedená reference popisuje 3 hlavní skupiny pro lisování pelet: a) Compaction Type – pelety lisované 1) Tablet Compression – lisované pomocí forem na jednotlivé pelety 2) Cold Isostatic – lisované stlačeným vzduchem v membráně (gumě) b) Chunk Type – pelety (drtě) vzniklé 1) Roll Press Type - lisováním mezi hladkými válci; 2) Briquette Type - lisováním mezi perforovanými válci; 3) Chunk Type – drcením bentonitových bloků; 4) Disk Die Type – protlačováním bentonitu skrz ocelovou matici s kruhovými otvory a poslední skupinou c) jsou pelety vyrobené sušením bentonitové suspenze (Dehydration - Sintered Pellet Type) a pelety vzniklé shlukováním menších zrn bentonitu do větších (Agglutination – Rolling Granulator Type)

## 2.5.2 Hodnocení kvality bentonitových pelet

Hlavním ukazatelem pro vyhodnocení kvality bentonitových pelet je ve většině případů uváděna objemová hmotnost sušiny pelety anebo sypaná hmotnost (objemová hmotnost sušiny volně sypaného materiálu). Dalším ukazatelem je efektivní obsah montmorillonitu EMDD (Effective Montmorillonite Dry Density), pro jehož stanovení je mj. nutné znát celkový obsah montmorillonitu v bentonitu [24]. Sledována je i vlhkost pelet.

### 2.5.2.1 Fullerův výpočet ideální zrnitosti

Důležitým ukazatelem je také čára zrnitosti podle Fullerova početního vztahu, který řeší výplň prostoru různě velkými zrny podobně jako na Obr. 10. Fullerova křivka je používána pro hodnocení pelet také ve švýcarském a finském výzkumu.

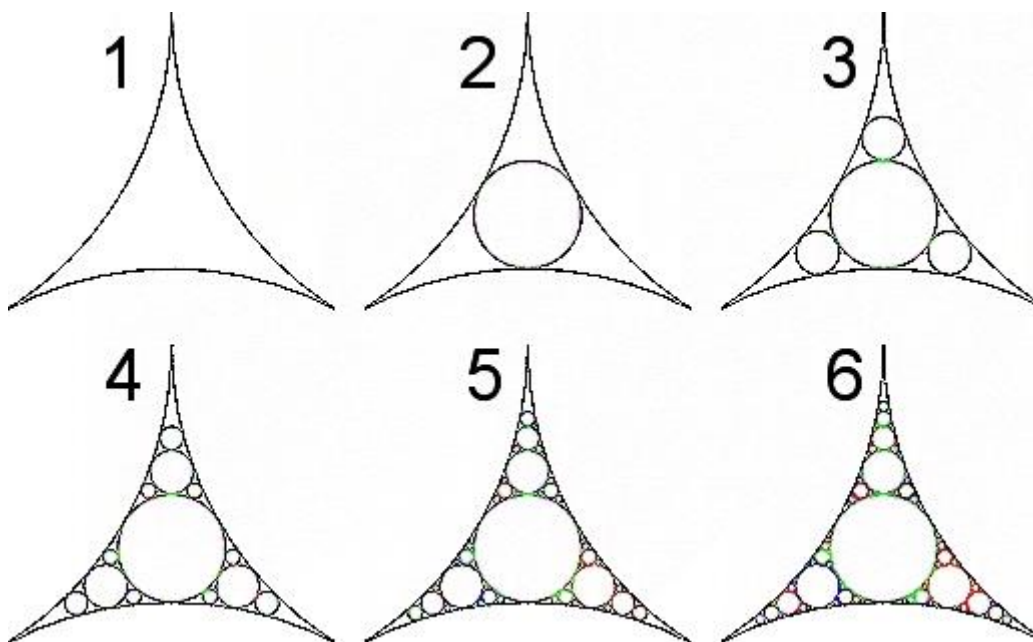
Fullerův výpočet definuje křivku zrnitosti, která by se měla přiblížit ideální zrnitosti pro zkoušený materiál:

$$y_i = 100 * \left(\frac{d_i}{D_{max}}\right)^n \quad \text{Rovnice 28,}$$

kde  $y_i$  je celkový příslušný propad k velikosti síta  $d_i$  v %

$D_{max}$  je jmenovitý rozměr největšího síta použitého při zrnitostním rozboru

$n$  je koeficient, např. se používá 0,5 [25] anebo 0,33 [26], v této práci se dále používá  $n=0,5$ .



Obr. 10 – Zjednodušený náčrt řešení vyplnění mezi mezizrnných prostor menšími zrny [25], podobné řešení nabízí Fullerův početní vztah.



### 2.5.3 Finský výzkum

Výzkum zaměřený na nalezení vhodných pelet či směsí ve Finsku (švédský systém KBS) lze rozdělit podle místa využití pelet v konstrukci HÚ [27]; [8]. První způsob využití se týká zaplnění technologické spáry mezi tzv. bufferem a horninou (okolo ÚOS). Druhý způsob slouží pro vyplnění prostorů (spár) mezi bentonitovými bloky a horninou při vyplňování přístupových štol (backfill) k jednotlivým úložným místům. V průběhu rešeršních prací nebyla získána informace, že by se počítalo s využitím pelet pro zaplnění spáry mezi tzv. superkontejnerem<sup>6</sup> a horninou při vodorovném uložení ÚOS, tzn. systém KBS-3H.

Ve společném finsko-kanadském projektu pro finské úložiště byly zkoušeny dvě technologie lisování pelet, a to mezi válci (roll-press machine) anebo protlačováním maticí s otvory o určitém průměru (např. 12 mm). Bentonitové pelety z obou technologií jsou znázorněny na Obr. 11.



Obr. 11 – Zkoušené bentonitové pelety ve finském výzkumu zaplnění technologické spáry; vlevo bentonitové pelety z technologie protlačování skrz matici; vpravo bentonitové pelety zhotovené technologií lisováním mezi válci s připravenými otvory, do kterých je bentonit zatlačován [8].

---

<sup>6</sup> Superkontejner – využití se předpokládá pro vodorovný způsob ukládání ÚOS. Superkontejner obsahuje ÚOS uložený v bentonitových blokách a perforovaný plášť superkontejneru. Celý superkontejner by byl sestavený mimo úložný tunel. Do úložného tunelu by byly superkontejnery postupně zasouvány.

Ve finsko-kanadském výzkumu byly zkoušeny pro zaplnění spáry různé druhy bentonitových pelet, přičemž nejvyšší objemové hmotnosti sušiny volně sypaných pelet byly  $1,2 \text{ g/cm}^3$ .

V práci [8] je také definován požadavek na maximální délku pelet protlačovaných skrz válec s ohledem na využití pro zaplnění spáry: „Pelety by neměly být delší než  $1/3$  spáry, do které jsou aplikovány. Při tloušťce spáry 50 mm musí být pelety menší než 17 mm. Tato velikost pelet byla stanovena z důvodu „klenbování“ (bridging) pelet na sebe v úzké spáře“.

Podrobněji jsou popsány další finské práce s peletami v [16], viz Obr. 12 a Obr. 13.



Obr. 12 – Finské pelety (nahore) a drtě (dole) zkoušené v práci [16].

	Cebogel	Hosakawa 2011	Hosokawa 2012
Bentonite type	Milos, Ca-bentonite	MX-80, Na-bentonite	MX-80, Na-bentonite
Manufacturing date	2010	2011	2012
Manufacturing method	Extrusion	Roller-compacted	Roller-compacted
Dimensions (mm)	varying length (~8-14), 6.3 diameter	12 x 12 x 5.5	12 x 12 x 5.5
Water content (%)	21.9	16.8	16.9
Poured Bulk density (kg/m <sup>3</sup> )	1050	1067	-
Dry density (kg/m <sup>3</sup> )	861	914	-
Crush strength (N)	170	136	-

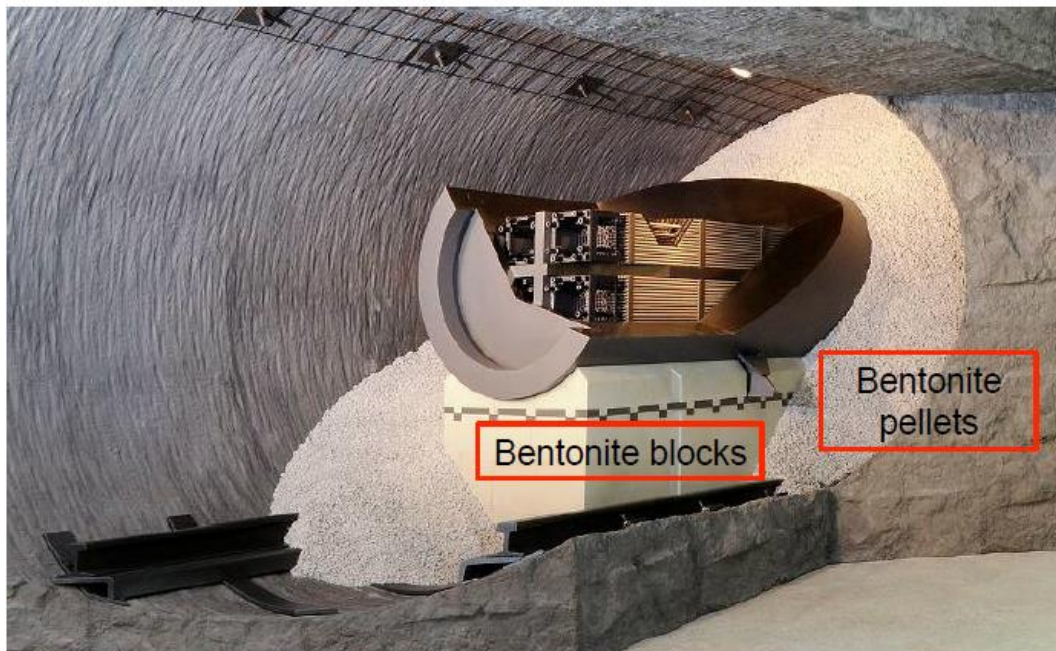
	MX-80 powder	Ibeco RWC powder 13 %
Origin	Wyoming, USA	Milos, Greece
Type	sodium, Na	calcium, Ca
Particle size (mm)	0-1	0-5
Water content (%)	12 ± 1.5	13 ± 1.5
Bulk density (kg/m <sup>3</sup> )	1100	1020 ± 50
Specific density (kg/m <sup>3</sup> )	2750	2750
Montmorillonite content (%)	≥ 75	≥ 75

Obr. 13 – Vlastnosti zkoušených pelet a drtí v [16] a vlastnosti zkoušených pelet a drtí v [3]. V tabulce jsou uvedeny vlastnosti zkoušených pelet, např. jejich rozměry (dimensions), vlhkosti (water content), způsoby výroby - pro Cebogel protlačováním a pro pelety Hosokawa lisováním mezi válci s perforací. V tabulce jsou také vypsány objemové hmotnosti po sypání (Bulk density).

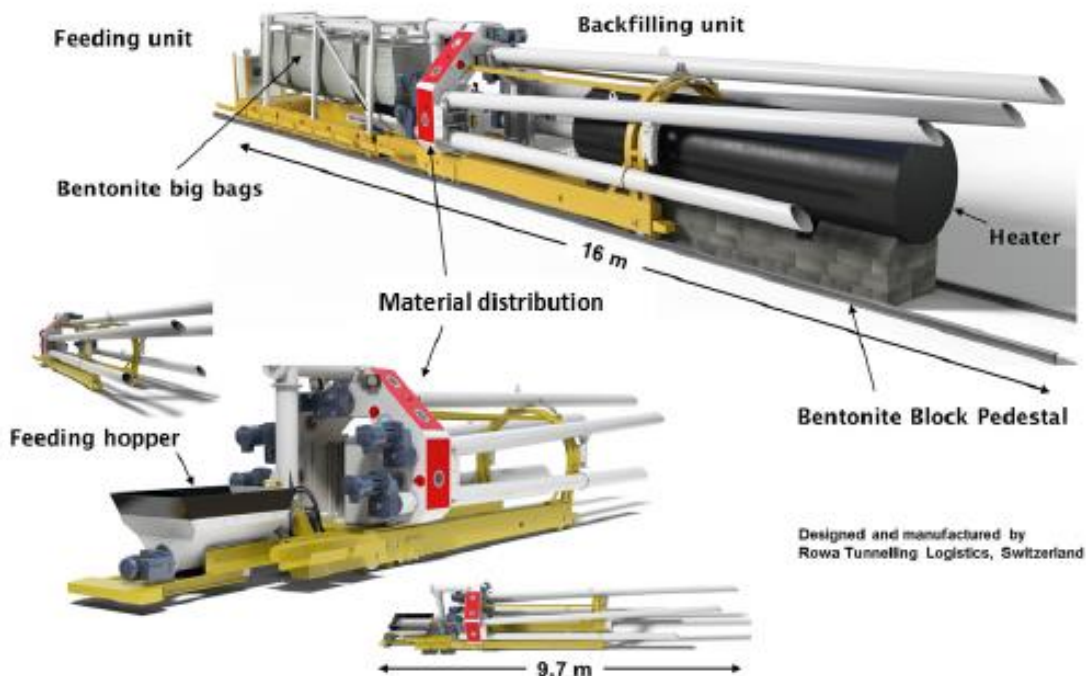
#### 2.5.4 Švýcarský výzkum

Švýcarský koncept je založen na horizontálním uložení ÚOS v jílové geologické formaci [28] na lisované bentonitové bloky (pedestal) [29]. Po uložení kontejneru bude kontejner obsypán bentonitovou směsí z pelet. Švýcarské pelety byly připraveny pro FE Experiment, který byl vybudován v podzemní laboratoři v Mont-Terri [30]. Granulovaný materiál byl pod názvem Granulated Bentonite Mixture (GBM) [31] připraven z rozdrcených bentonitových pelet, které měly průměrnou objemovou hmotnost sušiny 2,18 g/cm<sup>3</sup> a vlhkost okolo 5 % [31]. V průběhu FE experimentu byly zjištěny průměrné objemové hmotnosti sušiny GBM okolo 1,5 g/cm<sup>3</sup> maximálně 1,52 g/cm<sup>3</sup> [32]. GBM byl při aplikaci v FE experimentu hutněný šnekovými

dopravníky, které oproti volnému sypaní dohutní GBM na cca  $1,5 \text{ g/cm}^3$  oproti objemové hmotnosti sušiny volně sypaného materiálu  $1,42 \text{ g/cm}^3$  [32].



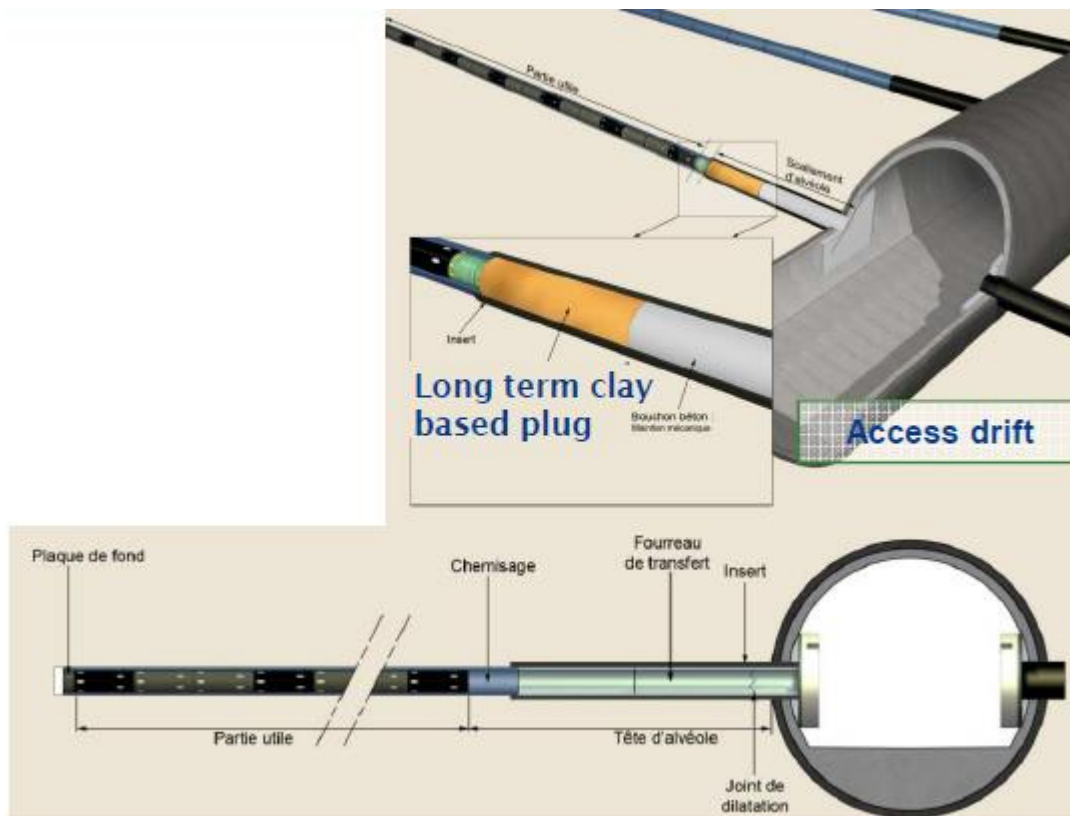
Obr. 14 – Řešení horizontálního způsobu ukládání VJP ve Švýcarsku [29].



Obr. 15 – Stroj se šnekovými dopravníky pro aplikaci GBM pro FE experiment [32], který nejenom GBM dopravuje, ale také jej dohutňuje.

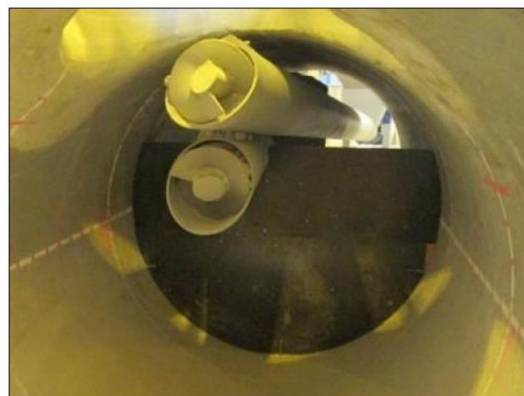
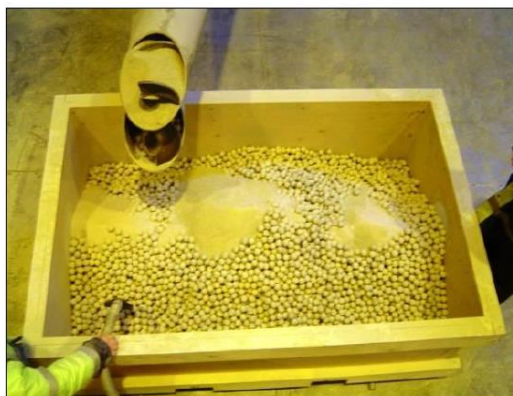
## 2.5.5 Francouzský výzkum

Ve Francii je vyvíjen horizontální způsob ukládání VJP. Francouzský způsob je založený na ukládání ÚOS přímo do horniny bez využití bentonitu jako bufferu např. [33]. Bentonit by měl být použit pro těsnící zátky, viz Obr. 16.



Obr. 16 – Zobrazení francouzského způsobu ukládání [33].

Výstavba těsnící zátky byla realizována v rámci projektu FSS, ve kterém byly použity bentonitové pelety [34]. Nejdříve proběhl test systému dvou šnekových dopravníků, viz Obr. 17. Spodní šnekový dopravník sype kulové pelety a horní dopravník přesypává kulové pelety mletým bentonitem. V průběhu experimentu nebyly prokázány očekávané hodnoty z laboratorních zkoušek, tj. objemová hmotnost sušiny volně sypané bentonitové směsí  $1,62 \text{ g/cm}^3$ . Při testu se objemové hmotnosti sušiny volně sypaného materiálu pohybovaly okolo  $1,5 \text{ g/cm}^3$ . Větší zhutnění při laboratorních testech mohlo být dosaženo dovibrováním směsi, viz Obr. 17 vlevo. Na obrázku je vidět paže pracovníka, který zřejmě dohutňuje (dovibrovává) sypanou směs. Tuto informaci se, ale nepodařilo najít v literatuře.



Obr. 17 – Obrázek z testování aplikace bentonitových pelet dvěma šnekovými dopravníky [34].



Obr. 18 – Obrázky z výstavby bentonitové vrstvy z pelet v FSS experimentu [34].



## 2.6 Český bentonit a jeho vlastnosti

Bentonit je montmorillonitický jíl se specifickými vlastnostmi [35], které umožňují např. bobtnání při přijímání vody. Bentonity jsou také téměř nepropustné pro vodu [36]. Jeho součástí je jílový trojvrstvý minerál montmorillonit, „v jehož mřížce je mezi dvěma vrstvami tetraedrů Si-O vrstva oktaedrů Al-(OH). Protože jsou trojvrství vždy k sobě obrácena vrstvami tetraedrů Si-O, je mezi nimi menší přitažlivost, jejich vzdálenost se tak může zvětšovat. Do vzniklých prostor může vnikat voda, což podmiňuje sorpci vody, kationů a živin, nepropustnost pro vodu, plasticitu, zvětšování objemu apod. [37].“

Rozlišují se dva druhy bentonitu – sodný a vápenato-hořečnatý bentonit, např. [38]. České bentonity patří do skupiny vápenato-hořečnatých bentonitů. Na začátku práce bylo rozhodnuto, že jedním z cílů bude použití českého bentonitu. Na základě výsledků předchozího výzkumu byl pro výzkum technologických spár vybrán Bentonit 75. Stejný bentonit byl použit i pro fyzikální model Mock-up Josef. Vlastnosti tohoto bentonitu se ale mohou měnit, což je způsobeno nehomogenitou bentonitu jako přírodní těžené suroviny.

Bentonit 75 je bentonit z ložiska Černý Vrch. Bentonit 75 je dodáván ve formě jemně mletého prášku s podílem zrn nad 0,063 max. 1%, s vlhkostí 3-12 % (obvykle 8 %) a s pH 7,5 viz [39].

Chemické a mineralogické složení Bentonitu 75 je popsáno např. v [40], viz Obr. 19:



	Content (wt%)	Minerals	Content (wt%)
SiO <sub>2</sub>	51.91	Montmorillonite	75.5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.52	Illite	3.9
TiO <sub>2</sub>	2.28	Kaolinite	3.1
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8.89	Quartz	8.1
FeO	2.95	Anatase	2.6
MnO	0.11	Calcite	3.1
MgO	2.22	Siderite	1.8
CaO	4.60	Ankerite	0.5
Na <sub>2</sub> O	1.21	Cristobalite	1.4
K <sub>2</sub> O	1.27		
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.40		
CO <sub>2</sub>	5.15		
Loss of ignition	10.65		
Natural amount of water	6.94 ± 0.43		

\*Mineral composition based on chemical composition and X-ray diffraction (XRD) analysis.

Obr. 19 – Chemické a mineralogické složení bentonitu Bentonitu 75 z roku 2013 [40].

### 2.6.1 Geotechnické vlastnosti Bentonitu 75

Tato kapitola shrnuje vybrané výsledky geotechnických vlastností B75. Tyto výsledky jsou součástí interních dokumentů pracoviště autora a byly publikovány, např. i v rámci projektu Mock-up Josef. Na Obr. 20 jsou shrnuté některé vlastnosti Bentonitu 75. Další vlastnosti jsou uvedeny v následujících kapitolách.

Bentonit 75	
w <sub>L</sub> =	210%
w <sub>p</sub> =	61%
ρ <sub>s</sub> =	2.823g/cm <sup>3</sup>

Obr. 20 – Tabulka s mezí tekutosti w<sub>L</sub>, s mezí plasticity w<sub>p</sub> a s ρ<sub>s</sub> měrnou hmotností B75 [41].



### 2.6.1.1 Bobtnací tlak B75

„Bobtnací tlak  $\sigma_{sw}$  [MPa] materiálu patří ke klíčovým geotechnickým vlastnostem pro správnou funkci inženýrské bariéry hlubinného úložiště. Velikost hodnot závisí zejména na vysušené objemové hmotnosti a mineralogickém složení. Zkouška bobtnacího tlaku probíhá souběžně se zkouškou hydraulické vodivosti. Probíhá zde přímé měření síly vyvolané saturovaným – bobtnajícím jílem, současně je zabráněno změnám rozměrů vzorku. Bobtnací tlak je pak stanoven [41] „:

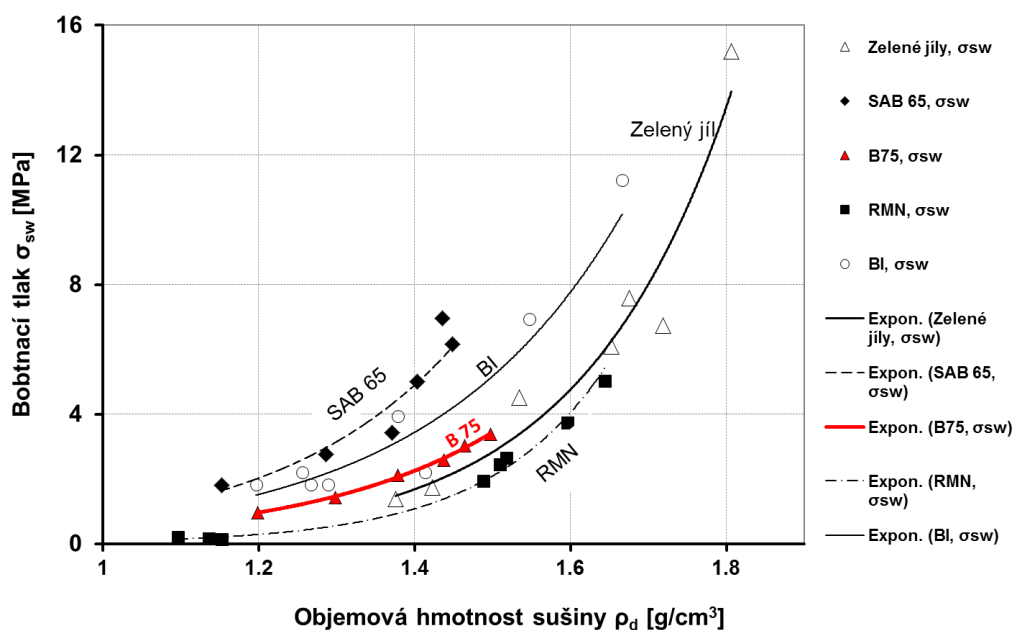
$$\sigma_{sw} = \frac{F}{A}$$

kde:

$F$  - Síla působící na čidlo [kN]

$A$  - Plocha vzorku kolmá na směr měření síly [m<sup>2</sup>]

Výsledné hodnoty B75 jsou společně s dalšími materiály znázorněny v grafu na Obr. 21.



Obr. 21 - Bobtnací tlak B75 a jeho porovnání s jinými materiály (RMN – bentonit z ložiska Rokle, SAB 65 – průmyslově dodávaný aktivovaný bentonit, BI – zkušební bentonit v rámci projektu Blízkých interakcí, Zelený jíl – přírodní velice kvalitní jíl zkušební v CEG (některé vlastnosti srovnatelné s bentonitem) [41].

### 2.6.1.2 Hydraulická vodivost B75

„Hydraulická vodivost ( $k$  [m/s]) materiálu patří ke klíčovým geotechnickým vlastnostem pro správnou funkci inženýrské bariéry hlubinného úložiště. Zkoušení a vyhodnocení hydraulické vodivosti probíhá na totožných vzorcích jako testy bobtnacího tlaku (při společné laboratorní zkoušce). Výpočet hydraulické vodivosti vychází z Darcyho zákona pro rychlost proudění [41]“:

$$v = k \cdot i$$

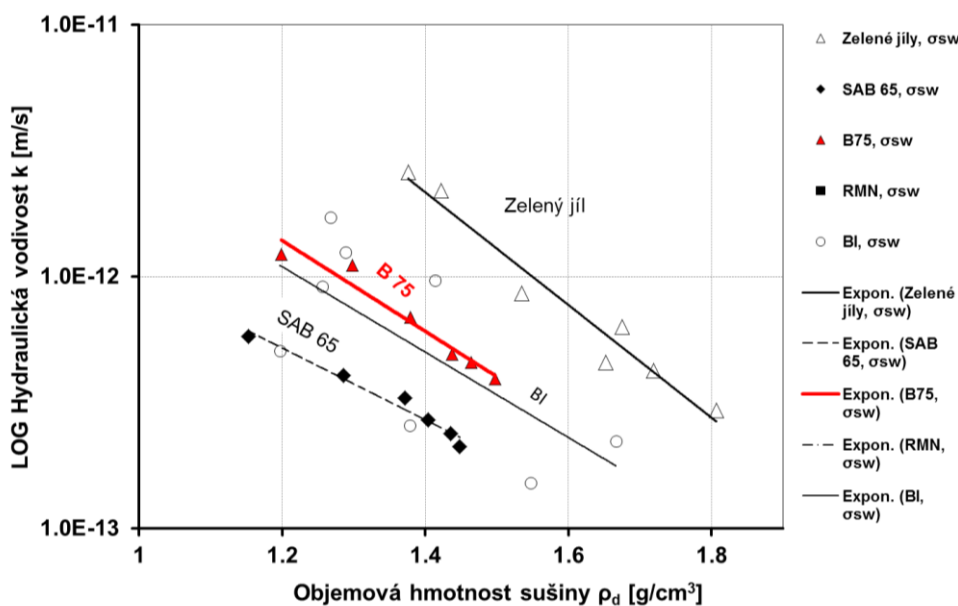
kde:  $v$  - Rychlost proudění ve vzorku [m/s];  $i$  - Hydraulický sklon [m/m]

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

kde: hydraulický sklon  $i$ :

kde:  $\Delta h$  - Hydraulická výška [m];  $\Delta l$  - Dráha, kterou musí částice projít zeminou [m]

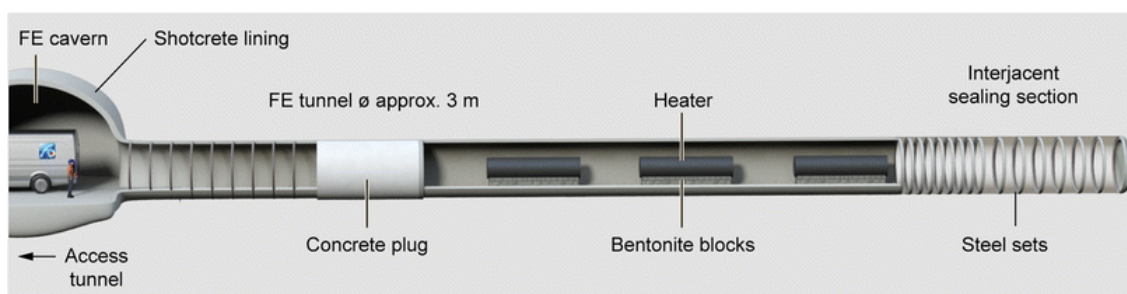
Výsledné hodnoty B75 znázorněny v grafu na Obr. 22.



Obr. 22 – Hydraulická vodivost nezátíženého materiálu a její porovnání s ostatními materiály (RMN – bentonit z ložiska Rokle, SAB 65 – průmyslově dodávaný aktivovaný bentonit, BI – zkoušený bentonit v rámci projektu Blízkých interakcí, Zelený jíl – přírodní velice kvalitní jíl zkoušený v CEG (některé vlastnosti srovnatelné s bentonitem) [41].

## 2.7 Referenční materiál GBM

GBM materiál byl zvolen pro tento výzkum jako referenční, protože má výborné vlastnosti. Po volném sypaní je u GBM dosahováno dobrých objemových hmotností. GBM materiál věnovala švýcarská společnost NAGRA<sup>7</sup>, která je zodpovědná za vývoj způsobu uložení ÚOS. Získaný materiál byl použit v podzemní laboratoři v Mont Terri pro výstavbu experimentu FE (Full-Scalle Emplacement Experiment) [42], ve kterém je testováno využití peletizovaného materiálu okolo vodorovně uložených topných těles simulujících tepelné vyzařování ÚOS, viz Obr. 23.



Obr. 23 – Řez experimentálním tunelem o průměru 3 m a naznačení řešení FE experimentu [30]. Z obrázku je zřejmé vodorovné uložení tří topných těles (heater) na bentonitových blocích (bentontonite blocks).

GBM je vyroben ze sodného bentonitu CEBO<sup>8</sup> National Standard [30]. Tento bentonit byl lisován mezi válci do pelet, které byly následně drceny a zrnitostně tříděny tak, aby výsledný materiál měl zrnitost odpovídající Fullerově křivce. Lisování pelet, následné drcení a výroba směsi podle Fullerovy křivky mělo za cíl dosáhnout objemové hmotnosti sušiny alespoň  $1,45 \text{ g/cm}^3$ . Bez úpravy sypaný bentonit dosahuje objemové hmotnosti sušiny pouze okolo  $0,9 \text{ g/cm}^3$  [30]. V literatuře se uvádí, že bentonit CEBO je vyráběn s vlhkostí 10 – 15 % a před lisováním pelet je vysoušen teplotou  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  proto, aby bylo dosaženo optimální vlhkosti 4 - 6 % pro výrobu GBM.

<sup>7</sup> NAGRA zkratka z Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle – Národní společnost pro nakládání s radioaktivními odpady

<sup>8</sup> Zkratka CEBO označuje bentonit od dodavatele bentonitu CEBO Holland.



## 2.8 Fyzikální model Mock-Up Josef (MCJ)

Část práce je zaměřena na vyhodnocení fyzikálního modelu MCJ. Pro tuto práci a vyhodnocení nalezeného řešení jsou důležité zejména geotechnické vlastnosti bentonitu a teplotní data z experimentu MCJ. Fyzikální modely obecně poskytují data, která jsou velice cenná a konkrétně in-situ modely mimo dat přinášejí i velice důležité zkušenosti, např. ověření použitých technologií. V této kapitole je uveden stručný popis experimentu MCJ. Výsledky z monitoringu jsou uvedeny v kapitole věnované výsledkům této práce. Na Obr. 24 je foto před umístěním experimentu do velkoprofilového vrtu v Podzemní laboratoři Josef.

Experiment MCJ je zaměřen na fyzikální modelování chování bentonitu, na který působí teplo a podzemní voda. Experiment je provozován v oblasti krystalických hornin (tonalit), tedy v předpokládaném reálném hostitelském prostředí HÚ. Model obsahuje topné těleso, simulující vyzařování tepla od ÚOS, umístěného do svislého velkoprofilového vrtu o průměru 750 mm a hloubce 2500 mm [43]. Topné těleso je obestavěno bentonitovou bariérou, která je sycena podzemní vodou z okolního horninového masivu. Bentonitová bariéra byla vystavěna z lisovaných segmentů [44].

Experiment MCJ navazuje na laboratorní experiment Mock-up-CZ [45]. Experiment je navržen ve stejném měřítku jako Mock-up-CZ. Mezi obdobné zahraniční projekty patří např. Long-term Experiment of Buffer Material realizovaný ve Švédsku v Äspö Hard Rock Laboratory [46], Temperature Buffer Test [47] realizovaný tamtéž a také FEBEX experiment ve Španělsku [48]. FEBEX experiment se skládal z laboratorního experimentu v CIEMAT (Centre for Energy, Environment and Technology, Španělsko) a in-situ experimentu v Grimselu (Grimsel Test Site; GTS, Švýcarsko).

In-situ experiment MCJ byl, na základě zkušeností, instrumentován obdobně jako předcházející laboratorní experiment Mock-Up-CZ, provozovaný v CEG v letech 2000 až 2008 [49]. Nejvíce čidel (více než 150) slouží pro sledování vývoje teploty uvnitř bentonitového tělesa. Teplotní čidla jsou umístěna i do okolní horniny. V bentonitovém tělese jsou dále umístěny hydraulické tlakové buňky snímající tlak v bentonitu ve třech různých směrech v 5 měřících profilech [44].

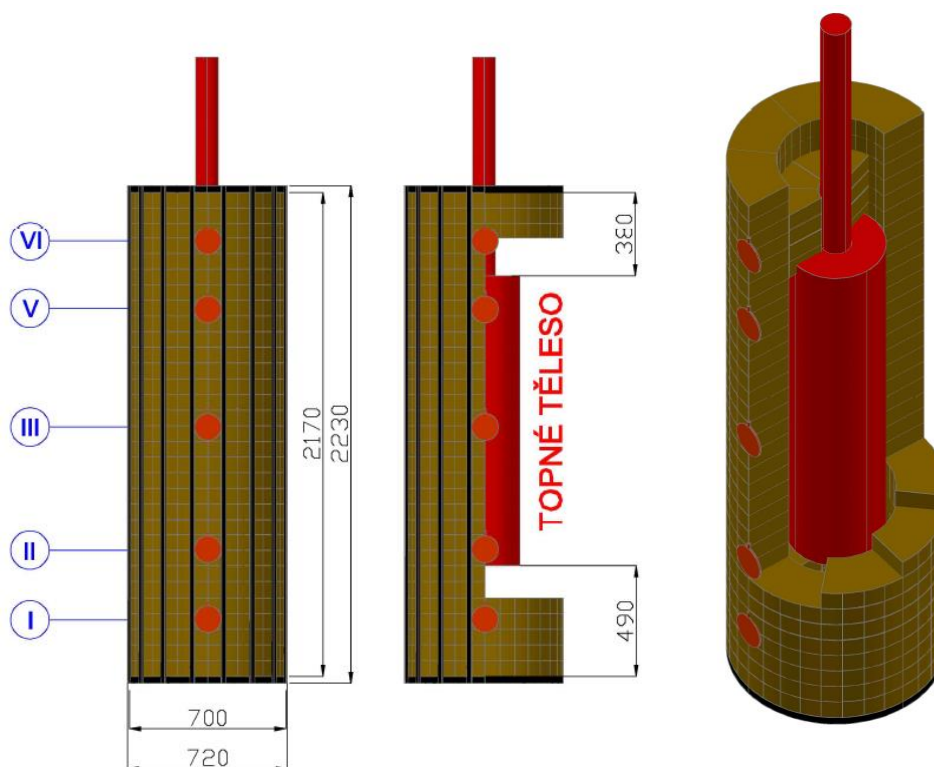


Obr. 24 – Experiment MCJ před spuštěním do velkoprofilového vrtu v Podzemní laboratoři Josef.

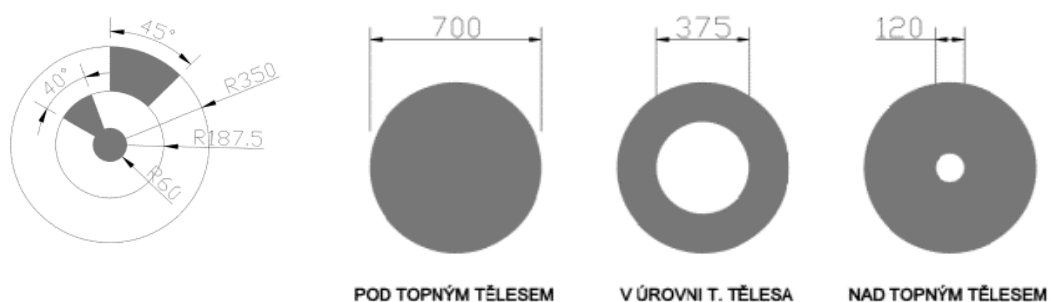
### 2.8.1 Konstrukce experimentu

Hlavní částí experimentu MCJ je bentonitová vrstva, která obklopuje topné těleso. Bentonitová vrstva byla vystavěna z lisovaných segmentů, které byly lisovány na objemovou hmotnost sušiny  $\rho_d=1,75 \text{ g/cm}^3$ . Pro lisování segmentů byl použit lis s lisovací silou až 600 kN [44].

Model je vystavěn ze 33 vrstev bentonitových segmentů. Výška jednotlivých vrstev je 67 mm a výška modelu je 2170 mm. Průměr kruhu vystavěného ze segmentů je 700mm (Obr. 25). Šest spodních vrstev bentonitových segmentů je složeno ze tří druhů segmentů (malý, střední a velký). Od sedmé vrstvy byly vynechány malé a střední segmenty. Vynecháním segmentů bylo vytvořeno místo pro topné těleso, které bylo usazeno přímo na šestou vrstvu. Od vrchu topidla byly při skladbě vrstvy opět použity malé prefabrikáty na zaplnění prostoru nad topidlem, viz Obr. 25 a Obr. 26. [44].



Obr. 25 – Konstrukční řešení experimentu MCJ; vlevo nárys experimentu se základními rozměry a s označením vodorovných monitorovacích profilů (I až VI); vpravo 3D vizualizace s vyříznutou částí pro znázornění topného tělesa [44].



Obr. 26 – Vlevo půdorysné rozměry středových  $r = 60$  mm, malých  $r = 187,5$  mm a velkých bloků R350 mm použitých pro výstavbu fyzikálního modelu Mock-up Josef; vpravo znázorněné řezy bentonitovou vrstvou v experimentu [44].



### 3 CÍLE PRÁCE A PRACOVNÍ HYPOTÉZY

Cíl práce byl definován na základě předchozích výzkumných prací a vychází z hypotézy, že je nutné zabývat se řešením technologických spár, a to nejenom při výstavbě HÚ, ale i v prvních fázích vývoje HÚ. Zkoumaná problematika nebyla dosud na území ČR řešena a i v porovnání se zahraničím se jedná o téma nové a v současnosti intenzivně řešené. Téma výzkumu bylo zvoleno i na základě zkušeností a výsledků získaných při návrhu, výstavbě a provozování fyzikálních modelů bentonitové vrstvy. Výsledky z fyzikálního modelu Mock-up Josef byly použity pro ověření některých předpokladů.

#### 3.1 Cíle práce

Hlavním cílem práce je nalezení řešení pro zaplnění technologické spáry mezi horninou a bentonitem pro svislý způsob ukládání VJP. V České republice a pro český bentonit nebyl problém technologických spár dosud podrobněji řešen. V současnosti probíhá zahraniční výzkum spojený se zvolenou problematikou a téma práce lze označit jako aktuální.

Na základě zkušeností z předchozího výzkumu autor navrhl využití tzv. bentonitových pelet<sup>9</sup> pro zaplnění spáry.

Nejdříve byly definovány problémy spojené s existencí technologických spár, dále byla provedena rešerše zahraničních prací ve vybrané problematice. Po seznámení se s problematikou bylo rozhodnuto, že se práce bude zabývat studiem technologické spáry o tloušťkách 35 mm a 50 mm. Hlavní cíl práce byl poté rozdělen na jednotlivé dílčí cíle. Také bylo stanoveno, že nalezené řešení (technologie a materiál) musí být proveditelné v průmyslovém měřítku.

---

<sup>9</sup> Termínem „bentonitové pelety“ se neoznačují pouze válečky lisovaného bentonitu, ale tímto termínem lze označit např. i drtě bentonitových prefabrikátů či směsi různých frakcí bentonitu atd. více v kapitole Bentonitové pelety 2.5 na straně 30.



### **3.1.1 Definování požadavků na zaplnění technologické spáry**

Prvním dílčím cílem bylo stanovit hlavní požadavky na výsledky výzkumu tak, aby byl splněn hlavní cíl. Navržené a odzkoušené řešení by mělo být také srovnatelné s výsledky z finského výzkumu, který je ve zvolené problematice nejdále.

### **3.1.2 Výběr druhu bentonitu, úprava bentonitu do pelet a stanovení vlastností bentonitových pelet**

První dílčí cíl byl zaměřen mj. na výběr českého materiálu, ze kterého by byly lisovány bentonitové pelety. Po provedení rešerše byl vybrán Bentonit 75 (B75). Pro lisování bentonitu do pelet byly vybrány dvě technologie.

Při zkouškách výroby pelet a po výběru materiálů pro další testování byly sledovány důležité parametry z pohledu hlavního cíle výzkumu. V průběhu prací byly zejména sledovány objemové hmotnosti, vlhkosti, zrnitosti a termofyzikální vlastnosti (součinitele tepelné vodivosti a měrné tepelné objemové kapacity).

### **3.1.3 Stanovení termofyzikálních vlastností bentonitových pelet a bloků**

Hlavním důvodem pro vyřešení problému technologické spáry je odvod tepla od kontejneru do horniny tak, aby nedocházelo k nadměrnému tepelnému zatěžování bentonitu. Pro to, zda zaplnění spáry zlepší odvod tepla a o kolik, je nejprve nutné stanovit termofyzikální vlastností uvažovaných bentonitových pelet. Z předchozích výzkumných prací vyplynulo, že nejvhodnější způsob pro stanovení termofyzikální vlastnosti je experimentální měření. Pro porovnání byly změřeny i termofyzikální vlastnosti bentonitových bloků. Získána data z měření byla také porovnána s existujícími početními modely, které jsou uvedené v kapitole 2.4.2.2.

### **3.1.4 Odzkoušení a výběr technologií pro zaplnění technologických spár**

Další dílčí cíl byl zaměřený na výběr a odzkoušení technologie pro zaplnění spár. Vzhledem ke zkušenostem s předchozího výzkumu byly odzkoušeny tři technologie, a to volné sypání, volné sypání a následné setřesení a technologie stříkaného jílu, na jejímž vývoji se autor práce podílel. Cílem při zkouškách technologií bylo dosažení co možná nejvyšší objemové hmotnosti sušiny.





### **3.1.5 Výběr materiálu a technologie pro reálný model technologické spáry**

Výsledky se závěrečných zkoušek s vybranou technologií a s vybraným materiálem materiálu musí být srovnatelné s výsledky výzkumu technologických spár v zahraničních projektech. To lze ověřit pouze na reálném, dostatečně „velkém“ modelu technologické spáry.

### **3.1.6 Analýza fyzikálního modelu MCJ a výpočet tepelného gradientu**

Experiment MCJ byl realizován s technologickými spárami, které mohly ovlivnit děje v experimentu. Předpokládalo se, že analýza experimentu MCJ prokáže vliv spár na vlastnosti bentonitu, na teplotu v bentonitu a v okolní hornině. Data z experimentu byla mj. využita pro výpočet tepelného gradientu a pro porovnání výsledků z obdobného fyzikálního modelu ze zahraničí.

### **3.1.7 Definování parametrů bentonitové vrstvy z pelet na základě získaných poznatků**

V práci zkoušené řešení musí být využitelné pro HÚ. Na základě výsledků práce by měly být definovány parametry, které budou využitelné např. pro zpřesnění tepelných výpočtů HÚ.



### 3.2 Pracovní hypotézy

Obecně platí, že vzduch není dobrým vodičem tepla a ve zkoumané problematice lze na něj nahlížet spíše jako na izolant než na vodič. Je tedy zřejmé, že vyřešení zvoleného tématu napomůže odvodu tepla od ÚOS do horniny. To bylo potvrzeno provedenou rešerší, ze které je zřetelné, že právě odvod tepla je důležitý pro ochranu bentonitu před případnými mineralogickými změnami způsobenými nadměrným tepelným zatížením bentonitu. Nicméně je nezbytné realizovat výzkumné práce pro český bentonit a pro technologie dostupné na území ČR. Výsledky by měly potvrdit závěry výzkumu ze zahraničí.

Existují i další důvody pro zaplnění spár. Je zřejmé, že zaplnění technologické spáry zlepší další vlastnosti bentonitové vrstvy, protože v místě uložení bude více bentonitu a při vyšší objemové hmotnosti sušiny je, např. nižší propustnost bentonitu. V práci navrženým a odzkoušeným zaplněním spáry bentonitovými peletami by se tedy měly zlepšit vlastnosti bentonitové vrstvy pro omezení úniku radionuklidů.

Dále autor předpokládal, že navržené řešení bude realizovatelné nejenom na experimentální úrovni, ale vyvinuté a odzkoušené postupy budou využitelné i v průmyslovém měřítku.

Dalším předpokladem bylo, že výsledky objemové hmotnosti českého bentonitu ve spáře budou srovnatelné s dosaženými výsledky ze zahraničí.

Analýza fyzikálního modelu MCJ by měla potvrdit předpoklad o vlivu spáry, protože u MCJ nebyla spára zaplněná.



## 4 METODY ZKOUMÁNÍ

Hlavními metodami výzkumu v této práci je využití primárních dat z experimentů, z měření a ze zkoušek. Primární data byla vyhodnocována podle toho, k jakému účelu sloužila. Data byla nejvíce využita pro grafické vyhodnocení závislostí, např. závislost součinitele tepelné vodivosti na objemové hmotnosti sušiny, ale také byla data použita do výpočtů, stanovení závislostí atd.

K sypkému bentonitu lze při výzkumu přistupovat jako k zemině, postupy pak vycházejí z norem pro zkoušení zemin. Pokud jsou zkoušeny bloky z vysoce kompakovaného bentonitu, lze využít normy pro horniny. Ale vzhledem k velmi specifickým vlastnostem bentonitu nelze vždy postupovat přesně podle těchto norem a využívají se vlastní upravené metodiky testování.

Velice důležitými zkouškami byly, s ohledem na zvolené cíle práce, zkoušky na stanovení objemové hmotnosti vysušené zeminy (sušiny) a zrnitosti a termofyzikální zkoušky.

### 4.1 Objemová hmotnost vysušené zeminy

Objemová hmotnost vysušené zeminy  $\rho_d$  [kg/m<sup>3</sup>] je definována jako podíl hmotnosti pevné fáze materiálu (sušeno při teplotě 105 – 110 °C) a celkového objemu vzorku. Vzorek lze považovat za vysušený, pokud se po 24 hodinách sušení vlhkost změní o méně než 0,1 %. Určuje se dle [50]:

$$\rho_d = \frac{m_d}{V} \quad \text{Rovnice 29,}$$

kde  $m_d$  – hmotnost vysušeného vzorku [kg],  $V$  – celkový objem vzorku [m<sup>3</sup>]

### 4.2 Objemová hmotnost zeminy

Objemová hmotnost  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] je definována jako podíl hmotnosti materiálu a celkového objemu vzorku. Určuje se dle [50]



$$\rho = \frac{m}{V} \quad \text{Rovnice 30,}$$

kde:  $m$  – hmotnost vzorku [kg],  $V$  – celkový objem vzorku [m<sup>3</sup>]

Vztah mezi hmotnostní vlhkostí, objemovou hmotností a vysušenou objemovou hmotností je:

$$\rho = \rho_d \left(1 + \frac{w}{100}\right) \quad \text{Rovnice 31,}$$

kde:  $w$  – vlhkost [-],

### 4.3 Váhová (hmotnostní) vlhkost

Obsah vody v zemině je definován jako podíl hmotnosti vody v zemině a hmotnosti vysušené zeminy – vlhkost  $w$  [%]. Určuje se dle [51]:

$$w = \frac{m_w}{m_d} * 100\% \quad \text{Rovnice 32,}$$

kde:  $m_w$  – hmotnost vody ve vzorku [kg],  $m_d$  – hmotnost vysušeného vzorku [kg]

Nejprve se zjistí hmotnost samotné váženky  $m_1$  (vysoušecí nádoby). Poté se zváží váženka s vlhkým vzorkem –  $m_2$ . Po vysušení (105 – 110 °C) se zjistí hmotnost  $m_3$ . Vlhkost je dopočítána podle vzorce:

$$w = \frac{m_2 - m_3}{m_3 - m_1} \quad \text{Rovnice 33}$$

### 4.4 Stupeň nasycení (saturace)

Stupeň nasycení jílu je poměr mezi objemem vody v pórech k celkovému objemu pórů vzorku. Nemá jednotky a udává se v procentech nebo jenom prostým číslem. Pro bentonit může nabývat hodnot větších než 1.



$$Sr = \frac{\rho_s \cdot (\rho - \rho_d)}{\rho_w \cdot (\rho_s - \rho_d)} * 100\% \quad \text{Rovnice 34,}$$

kde:  $\rho_s$  - měrná hmotnost zeminy (zrna),  $\rho_w$  - objemová hmotnost vody

## 4.5 Efektivní objemová hmotnost montmorillonitu (EMDD)

Efektivní obsah montmorillonitu (EMDD – Effective Montmorillonite Dry Density) se stanovuje početně, viz [24] a slouží především k porovnávání různých bentonitů (různá objemová hmotnost a různý obsah montmorillonitu) [24].

$$EMDD = (1 - f) * \left( \frac{\rho_d}{1 - \left( \frac{f * \rho_d}{\rho_s} \right)} \right) \quad \text{Rovnice 35,}$$

kde: EMDD je Efektivní objemová hmotnost montmorillonitu,

$\rho_d$  je objemová hmotnost sušiny,

$\rho_s$  je měrná hmotnost (zdánlivá hustota pevných částic), pro Bentonit 75 z ložiska Černý Vrch lze využít výsledky z projektu Bentonity 95, kde byla  $\rho_s$  stanovena na  $2,82 \text{ g/cm}^3$ , viz výsledky z projektu Bentonity 95 [52] [53], například pro zahraniční sodný bentonit je uváděná měrná hmotnost (grain density) také okolo  $2,8 \text{ g/cm}^3$ , např. [54],  $f$  je frakce neobtnavých materiálů ve vzorku (pro Bentonit 75 je dle obsahu montmorillonitu (75%)  $f=1-0,75=0,25$ , viz [40].

## 4.6 Termofyzikální vlastnosti

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



**Měrná tepelná kapacita  $c$  [J/kg/K]** je definována jako tepelná kapacita hmotné jednotky (podíl tepelné kapacity objektu a jeho hmotnosti), přičemž měrná tepelná kapacita  $c$  značí množství tepla potřebné k ohřátí 1kg látky o 1 K.

**Tepelná difuzivita  $a$  [m<sup>2</sup>/s]** (součinitel teplotní vodivosti) vyjadřuje schopnost látky vyrovnávat rozdílné teploty při neustáleném šíření tepla vedením v homogenním prostředí, je rovna podílu tepelné konduktivity a součinu její objemové hmotnosti a měrné tepelné kapacity při stálém tlaku.

Tyto veličiny jsou mezi sebou provázány vztahem:  $a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}$  Rovnice 36,

kde  $a$  - součinitel teplotní vodivosti [m<sup>2</sup>/s],  $\lambda$  - součinitel tepelné vodivosti [W/m.K],  
 $\rho$  - objemová hmotnost [kg/m<sup>3</sup>],  $c$  - měrná tepelná kapacita materiálu [J/kg.K]

Měrná objemová tepelná kapacita  $c_p$  [J/m<sup>3</sup>/K] je alternativní možností vyjádření množství tepla potřebného k ohřátí určitého množství látky – v tomto případě jde o 1 m<sup>3</sup>.

Vztah „měrných tepelných kapacit“ -  $c$  a  $c_p$  - udává rovnice:

$$c = \frac{c_p}{\rho} \quad \text{Rovnice 37,}$$

kde  $c$  - měrná tepelná kapacita materiálu [J/kg/K],  $c_p$  - měrná objemová kapacita materiálu [J/m<sup>3</sup>/K],  $\rho$  - objemová hmotnost [kg/m<sup>3</sup>]

Termofyzikální vlastnosti byly stanoveny přímým měřením. Pro měření termofyzikálních vlastností Centrum experimentální geotechniky využívá přístroj ISOMET 2114, který nahradil starší typ ISOMET 2104. Přenosný přístroj ISOMET 2114 je určen pro měření termofyzikálních vlastností různých materiálů. Měřenými vlastnostmi jsou tepelná vodivost, tepelná difuzivita, objemová tepelná kapacita a teplota. Výrobce uvádí použití ISOMETu pro stavebnictví, ale také pro geologické průzkumy zemin či hornin. Vhodnost použití přístroje pro jílové zeminy (bentonity) byla ověřena při dřívějších pracích. Laboratorní měření prokázala, že na tepelnou vodivost mají vliv objemová hmotnost, vlhkost a také teplota bentonitu. K přístrojům ISOMET se dodávají dva druhy sond.



Jehlová sonda se využívá pro měření v sypaných materiálech, či plastických materiálech, do kterých lze sondu zatlačit. Měření jehlovou sondou a teoretický základ pro měření s jehlovou sondou (needle probe) je dobře popsán např. [55]. Pro měření byla použita jehlová sonda o rozsahu dle tabulky:

Tab. 1 – Parametry jehlové sondy

Typ sondy	Interval měření tepelné vodivosti	Interval měření tepelné kapacity	Teplota
Jehlová sonda IPN 1100	0.035 až 2 W/m/K	$4 \cdot 10^4$ až $3 \cdot 10^6$ J/m <sup>3</sup> /K	-20°C až +70°C
IPN 1100 Přesnost měření	5% až 10% čtení + 0.001 W/m/K	15% čtení + $1 \cdot 10^3$ J/m <sup>3</sup> /K	1°C

Plošná sonda se využívá pro pevné materiály s rovným povrchem, na který lze sondu přiložit. Je vhodná pro měření bentonitu o vyšších objemových hmotnostech, např. lisovaných bloků. Pro měření byla použita plošná sonda o rozsahu dle tabulky:

Tab. 2 – Parametry plošné sondy

Typ sondy	Interval měření tepelné vodivosti	Interval měření tepelné kapacity	Teplota
Plošná sonda IPS 1100	0.04 až 6 W/m/K	$4 \cdot 10^4$ až $3 \cdot 10^6$ J/m <sup>3</sup> /K	-15°C až +50°C
IPS 1100 Přesnost měření	5% až 10% čtení + 0.001 W/m/K	15% čtení + $1 \cdot 10^3$ J/m <sup>3</sup> /K	1°C

Pro měření přístrojem ISOMET existují dvě normy, ve kterých je popsána metodika měření s jehlovou sondou. Jedná se o normy ASTM D 5334-08 - Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Soft Rock by Thermal Needle Probe Procedure [56] a Standard Test Method for Thermal Conductivity of Plastics by Means of Transient Line-Source Technique [57].

Podle informací od dodavatele měřícího zařízení byla metoda plošných sond vyvinutá z metody pro měření s jehlovou sondou z praktických důvodů. Odvrtání tvrdého vzorku



(např. horninového) je technicky náročné. Otvor pro sondu musí být přesný tak, aby byl zaručen kontakt sondy v místě měření, a to je při malém průměru sondy technicky obtížně řešitelné.

## 4.7 Zrnitostní složení

Velice důležitou vlastností zkoušených materiálů je jejich zrnitostní složení, které ovlivňuje zhutnění směsi. V případě nepřítomnosti jemných frakcí nejsou zaplněné mezi zrněné prostory a objemová hmotnost materiálu je tedy nižší. Pro zhodnocení zrnitosti zkoušených materiálů byla vybrána Fullerova křivka.

Zrnitostní složení se stanovuje podle normy Geotechnický průzkum a zkoušení - Laboratorní zkoušky zemin [58]. Výsledkem je zrnitostní křivka, což je součtová čára, jejíž každý bod udává, kolik procent z celkové hmotnosti vzorku činí hmotnost všech zrn menších než určitý průměr zrna  $d$ . Pro její stanovení existují dva nejčastěji používané laboratorní způsoby:

- sítový rozbor - prosévání na sítích standardizované řady pro zrna písčítá až šterkovitá
- hustoměrná metoda - pro zrna prachovitá, vychází ze Stokesova zákona, udávajícího vztah mezi průměrem zrn a rychlostí jejich usazování v kapalině

V této práci byl využit pouze sítový rozbor, protože zrnitost prachových zrn není z pohledu zhutnění bentonitu až tak zásadní jako obsah prachových zrn v celkovém obsahu bentonitu.





## 5 VÝSLEDKY VÝVOJE A VÝZKUMU

V této kapitole jsou shrnuty výsledky práce, které splňují požadavky definované na začátku práce. Některé z výsledků jsou diskutovány a porovnávány s referenčním materiálem či se zahraničními zkušenostmi.

### 5.1 Hlavní požadavky na výzkum

V rámci práce byly v první fázi definovány požadavky na výzkum:

1. Využití českého bentonitu.
2. Poloprovozní výroba pelet.
3. Navržení a odzkoušení technologie zaplnění spáry využitelné v praxi.
4. Testování zaplnění technologické spáry pomocí fyzikálních modelů, pro různé materiály a způsoby zaplnění, při splnění požadavku dosažení minimální objemové hmotnosti  $1 \text{ g/cm}^3$ .
5. Popsání vlivu zaplnění spáry na odvod tepla od kontejneru do horniny při využití výsledků z fyzikálních modelů.
6. Zhodnocení využitelnosti dosažených poznatků při výstavbě budoucího hlubinného úložiště.
7. Dosažené výsledky by měly být srovnatelné s výsledky výzkumu realizovaného v zahraničí.

### 5.2 Výběr druhu bentonitu, úprava bentonitu do pelet a stanovení vlastností bentonitových pelet

Výběr základního materiálu byl zvolen tak, aby materiál byl průmyslově dostupný a byl případně již testován (dostupné výsledky vlastností). Z vybraného Bentonitu 75 byl také vystavěn fyzikální model MCJ, jehož částečná analýza je také součástí této práce.



Vlastnosti českých bentonitů a B75 jsou blíže popsány v kapitole 2.6. B75 je mírně aktivovaný bentonit uhličitanem sodným – do 1% celkové hmotnosti bentonitu.

Po výběru bentonitu se další experimentální práce zaměřily na odzkoušení existujících technologií pro výrobu pelet a stanovení vlastností bentonitových pelet.

Po seznámení se s možnostmi výroby bentonitových pelet na území České republiky byly pro další zkoušky vybrány dvě technologie. Obě technologie splňují požadavek na případnou průmyslovou výrobu pelet. V obou případech bylo nutné získat souhlas průmyslového partnera s využitím existujícího know-how pro lisování bentonitových pelet. Dále byl vybrán GBM jako zahraniční referenční materiál pro výzkum.

### **5.2.1 Technologie výroby pelet protlačováním maticí s kruhovými otvory (B75 PEL 12)**

V průmyslovém provozu Českých lupkových závodů a.s.<sup>10</sup> byla upravena technologie, která je používána pro lisování pelet z kaolínu, viz Obr. 27. Po pečlivém seznámení se s výrobou pelet z kaolínu byl se zástupcem firmy připraven nový postup pro zkoušky lisování pelet z bentonitu B75.

Bentonit bylo nutné před lisováním vlhčit. Na začátku prací bylo rozhodnuto, že bentonit bude navlhčen zhruba na 30 % a podle průběhu prvních zkoušek se dvěma různými maticemi<sup>11</sup> se rozhodne o dalším postupu.

---

<sup>10</sup> České lupkové závody a.s. (ČLUZ a.s.) nezabývají se těžbou bentonitů, ale lupků (jílová hornina), disponují technologií pro lisování „protlačováním“ - používají pro kaolín, autor práce se podílel na optimalizaci technologie v ČLUZ pro lisování bentonitových pelet.

<sup>11</sup> Matrice - ocelová kruhová deska horizontálně umístěná ve stroji pro lisování pelet, kruhovými otvory v matici je lisovacími válci bentonit protlačován a vznikají tak bentonitové pelety - válečky



Obr. 27 – Kaolínové pelety z ČLUZ a.s.

Technologie ČLUZ a.s. je založena na protlačování materiálů skrz matrici. Zhutnění materiálů po vylisování závisí na velikosti tření na plochách děr v matrici. Obecně lze říci, že pokud je materiál sušší, tak lze po lisování očekávat vyšší zhutnění materiálu. Tento předpoklad potvrdily i výsledky z lisování pelet.

Vlhkost materiálu je při výrobě pelet limitujícím faktorem. V případě nízké vlhkosti materiálu (cca 15 %) nedochází při lisování k jeho spojení a zhutnění a materiál skrz matrici propadá - příliš suchý materiál netvoří pelety. Při nízké vlhkosti lisovaného materiálu se rovněž stroj pro lisování přehřeje a dojde k „zalepení“ otvorů v matrici. V případě lisování protlačováním je tedy nutné najít takovou vlhkost, při které se materiál ještě lisuje a zároveň nedochází k přehřívání stroje či k propadávání neslisovaného materiálu skrz matrici.

Strojní vybavení (dostupné matrice) umožnilo odzkoušet lisování bentonitových pelet o dvou průměrech. Na Obr. 28 je foto linky pro výrobu bentonitových pelet s označením B75 PEL 12. Na Obr. 29 vlevo je zobrazena matrice pro zhutňování pelet a vpravo jsou s matricí zobrazeny dva osově uložené ocelové válce, které protlačují bentonit skrz matrici.



Obr. 28 – Výrobní linka pro lisování pelet. Na obrázku jsou zřejmé dva pásové dopravníky. Horní pásový dopravník sype zvlhčený materiál do stroje, ve kterém se ztuhnou pelety protlačováním skrz matrici. Bentonitové pelety ze stroje samovolně vypadávají na spodní pásový dopravník, který dopravuje pelety k expedičnímu místu.



Obr. 29 – Vlevo matrice pro ztuhování pelet a vpravo detail umístění matrice ve stroji. Na obrázku vpravo jsou zřejmé dva válce (ocelová kola s vroubkou), které se horizontálně otáčejí po matrici (vertikální osa otáčení je ve středu matrice) a zároveň se otáčejí vertikálně (horizontální osa je ve středu válců zhruba 30 cm nad matricí). Válce (kola) svými otáčivými pohyby zatlačují bentonit do kruhových otvorů v matrici [8].

### 5.2.1.1 Pelety o průměru 8 mm

Po prvních dvou zkouškách bylo rozhodnuto, že pro další vývoj nebude matrice s průměrem otvorů 8 mm využita (Obr. 30), protože se matrice bentonitem postupně ucpávala. Již po prvních zkouškách tedy bylo zřejmé, že by lisování pelet o průměru 8 mm nebylo možné v plno provozním měřítku.



Obr. 30 – Vylisované bentonitové pelety o průměru 8 mm z ČLUZ a.s.

### 5.2.1.2 Pelety o průměru 12 mm – B75 PEL 12

Zkoušky lisování pelet o průměru 12 mm prokázaly aplikovatelnost postupu lisování v poloprovozu. Průběh lisování, oproti peletám s průměrem 8 mm, byl bezproblémový. Teplota stroje byl ustálena a nedocházelo k nežádoucímu přehřívání stroje. Po prvním testu byla postupně snižována vlhkost materiálu s cílem dosažení vyšší objemové hmotnosti lisovaného bentonitu. Při postupném snižování vlhkosti bylo dosaženo limitu lisování, tzn., byla nalezena vlhkost, při které ještě nedocházelo k přehřívání stroje pro lisování. Nejdříve byla realizována poloprovozní zkouška a pro projekt DOPAS [59] byla realizována plno provozní zkouška, při které bylo vylisováno 36 tun bentonitových pelet. Takto vylisované pelety byly označeny B75 PEL 12, viz Obr. 31.

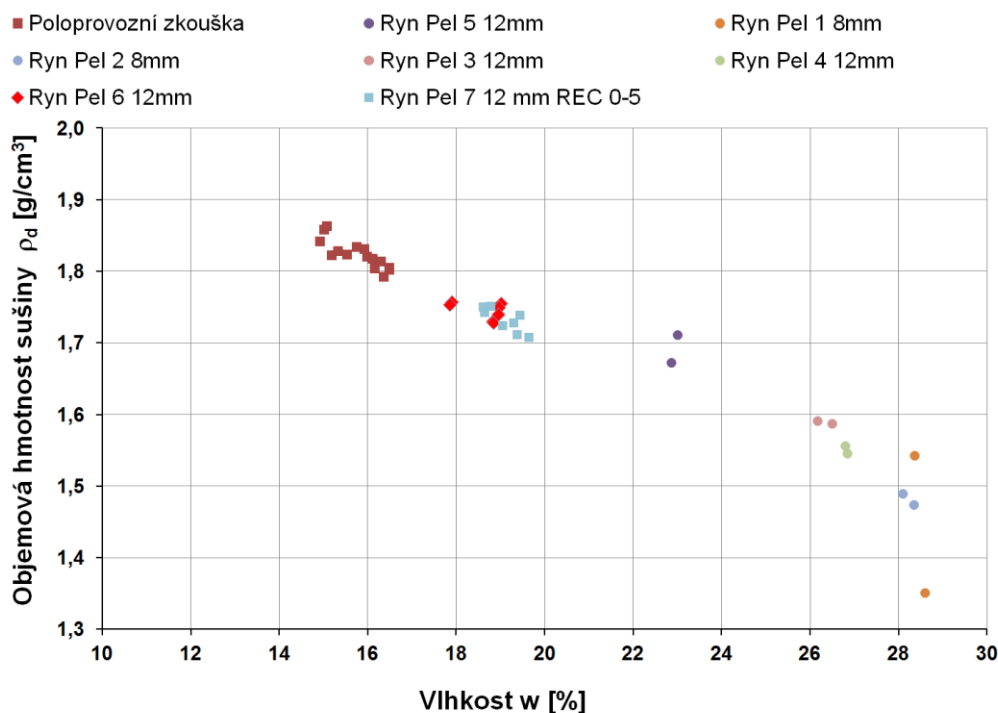


Obr. 31 – Fotografie vylisovaných bentonitových pelet o průměru 12 mm z ČLUZ a.s.

### 5.2.1.3 Vyhodnocení prvních zkoušek lisování a poloprovozní zkoušky

Postupným snižováním množství záměsové vody bylo dosaženo zvýšení objemové hmotnosti sušiny vylisovaných pelet. Při zhruba 15% vlhkosti bentonitu pro lisování došlo k přehřátí stroje. Poloprovozní zkouška byla realizována při vlhkosti materiálu 16%. Při poloprovozní zkoušce byly vylisovány tři tuny pelet B75 PEL 12. Poloprovozní zkouška byla také zaměřena na stanovení výkonu odzkoušené technologie. Výkon lisování pelet, včetně mísení bentonitu B75 s vodou, byl jedna tuna za jednu hodinu. Po poloprovozní zkoušce následovala plno provozní zkouška.

Graf na Obr. 32 znázorňuje závislost objemové hmotnosti sušiny na vlhkosti lisovaného bentonitu v průběhu zkoušek v ČLUZ a.s. V grafu jsou tmavě červeně znázorněny hodnoty z poloprovozní zkoušky, která byla realizována před plno provozní zkouškou.



Obr. 32 – Závislost objemové hmotnosti sušiny na vlhkosti lisovaného bentonitu v průběhu zkoušek v ČLUZ a.s.

#### 5.2.1.4 Plno provozní zkouška lisování bentonitových pelet B75 PEL 12

Cílem plno provozní zkoušky bylo ověřit výsledky z poloprovozní zkoušky. Pelety z plno provozní zkoušky byly použité pro těsnící část experimentu EPSP v rámci projektu DOPAS [60], viz (Obr. 33). Celkem bylo vylisováno 36 tun bentonitových pelet. Tabulka 1 uvádí statistické vyhodnocení plno provozní zkoušky a graf v Obr. 34 zobrazuje hodnoty objemové hmotnosti sušiny v závislosti na vlhkosti po plno provozní zkoušce. Pro vyhodnocení plno provozní zkoušky byly také provedeny zrnitostní rozbory, viz Obr. 35.

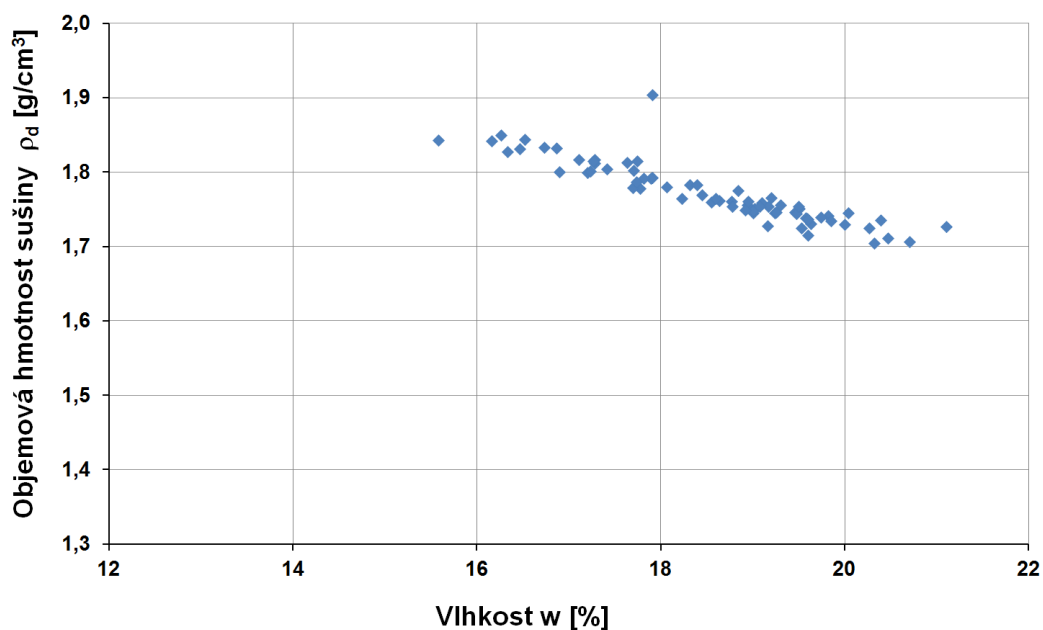
Tabulka 1 – znázorňuje statistické hodnoty pro vyhodnocení vlhkosti a objemové hmotnosti sušiny z plno provozní zkoušky. Protože se jednalo o plno provozní zkoušky, tak bylo provedeno i statistické vyhodnocení provedené výroby B75 PEL 12:

vlhkost pelety		objemová hmotnost sušiny	
Střední hodnota	0,185533612	Střední hodnota	1771,322
Chyba střední hodnoty	0,001454236	Chyba střední hodnoty	4,738512
Směrodatná odchylka	0,012339604	Směrodatná odchylka	40,20761
Minimum	0,155852843	Minimum	1704,228
Maximum	0,211083437	Maximum	1903,799
Počet vzorků	72	Počet vzorků	72

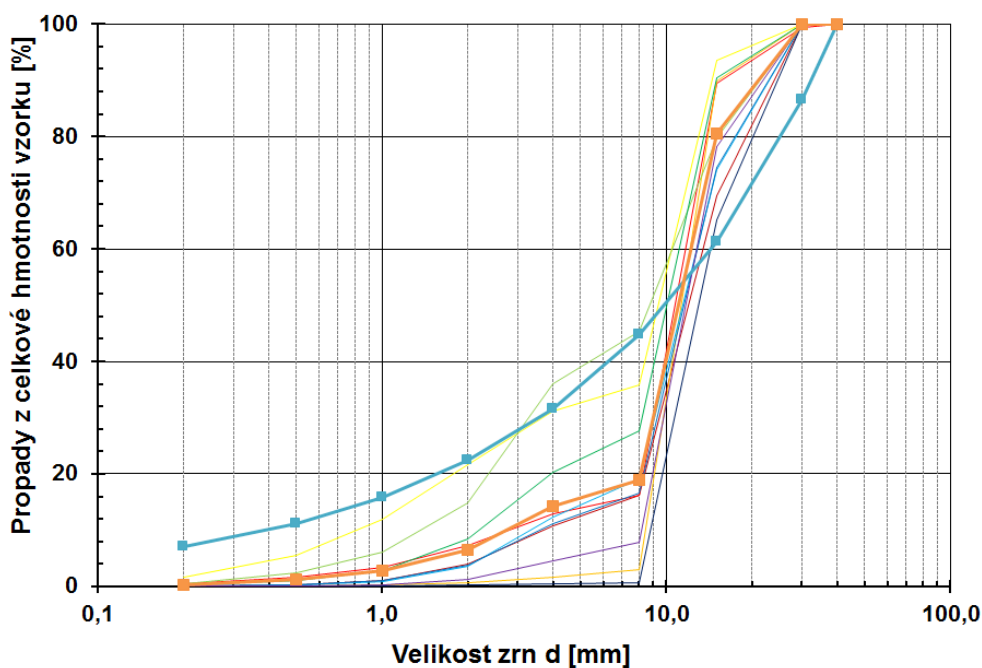


Obr. 33 – Bentonitové pelety o průměru 12 mm (B75 PEL 12) po plno provozní zkoušce lisování v ČLUZ a.s.





Obr. 34 – Graf znázorňující závislost objemové hmotnosti sušiny na vlhkosti lisovaného bentonitu při plno provozní zkoušce v ČLUZ a.s.(B75 PEL 12).



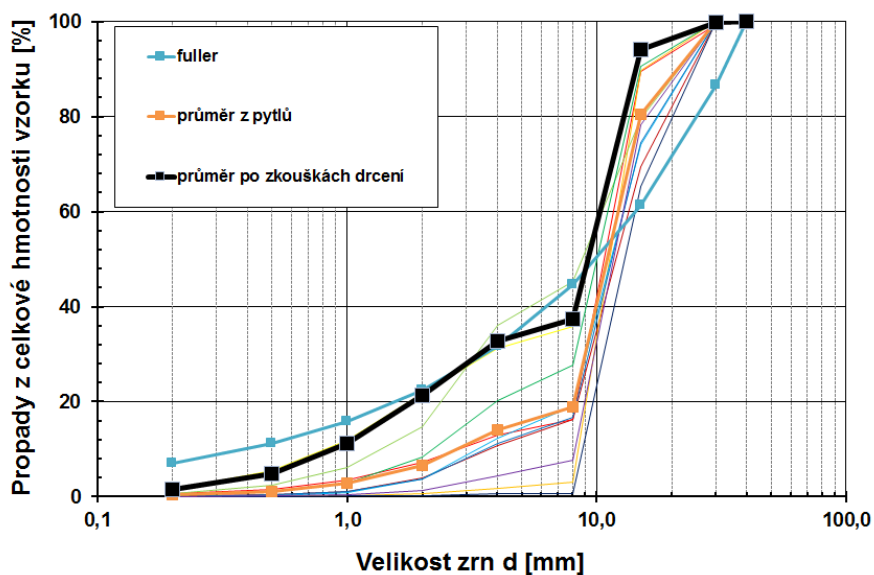
Obr. 35 – Graf znázorňující zrnitostní rozbor B75 PEL 12 po plno provozní zkoušce, v grafu je také znázorněná vypočítaná průměrná zrnitost B75 PEL 12 (silná oranžová čára) z křivek zrnitosti pro různé vzorky odebrané v průběhu výroby B75 PEL 12 (tenké čáry) a Fullerova křivka pro B75 PEL 12 (silná modrá čára).

### 5.2.1.5 Drcený materiál z B75 PEL 12

Jednou z možných úprav zrnitosti B75 PEL 12 je drcení materiálu. Toto drcení bylo v práci experimentálně odzkoušeno, viz ukázka na Obr. 36. Po drcení B 75 PEL 12 v projektu DOPAS byly provedeny zrnitostní rozbory drcených pelet B75 PEL 12, viz Obr. 37.



Obr. 36 – Experimentální drcení B75 PEL 12 s cílem úpravy zrnitosti.



Obr. 37 – Graf znázorňující křivky zrnitosti B 75 PEL 12; modrá čára je křivka podle Fullerového výpočtu; oranžová čára znázorňuje průměr B75 PEL 12 po plno provozní zkoušce a černá čára zobrazuje průměrnou křivku zrnitosti pro drcené pelety B 75 PEL 12 (podkladem pro průměrnou jsou tenké barevné čáry).

Z Obr. 37 je zřejmý pozitivní posun zrnitosti B 75 PEL 12 po drcení k Fullerově křivce. Zřejmě došlo k podrcení pelet na menší části, které lépe vyplňují prostor vzorku. U drcených pelet tak lze předpokládat vyšší zhutnění než při aplikaci nedrcených.

### 5.2.2 Technologie výroby pelet z B75 lisováním mezi válci (REC)

Tato technologie byla vybrána po konzultacích ve společnosti Keramost a.s., která se zabývá úpravou a těžbou bentonitu a je také dodavatelem zkoumaného bentonitu. Technologie lisování mezi válci je primárně určená pro lisování podsítného zbytku po výrobě sorbujících bentonitů. Jedná se o recyklační linku pro nežádoucí prachový zbytek. Po vylisování a vysušení je tzv. recyklát drcen, výsledné procentuální zastoupení zrn produktu obsahuje Tabulka 2.



Obr. 38 – Tzv. recyklát REC z B75 – lisovaný bentonit mezi válci, na obrázku jsou zřejmé destičky o hraně v řádech cm.

Autor se podrobně seznámil s technologií a odzkoušel různě zrněné drtě s cílem dosáhnout po zaplnění spáry maximálního zhutnění.

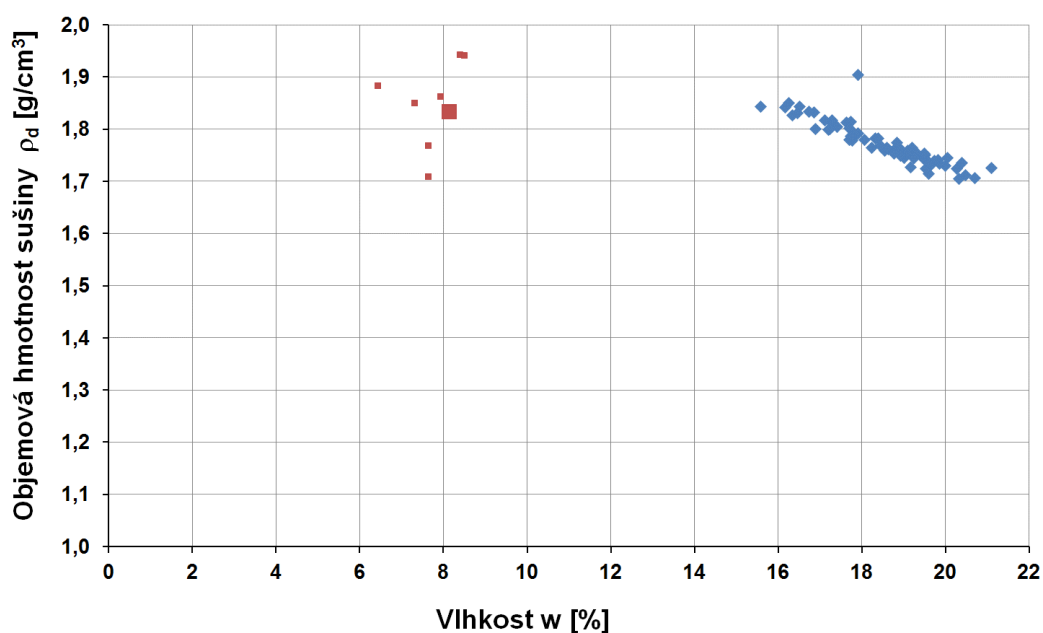


Tabulka 2 – procentuální zastoupení zrn tzv. recyklátu z Keramostu a.s. (podklady od Keramost a.s.)

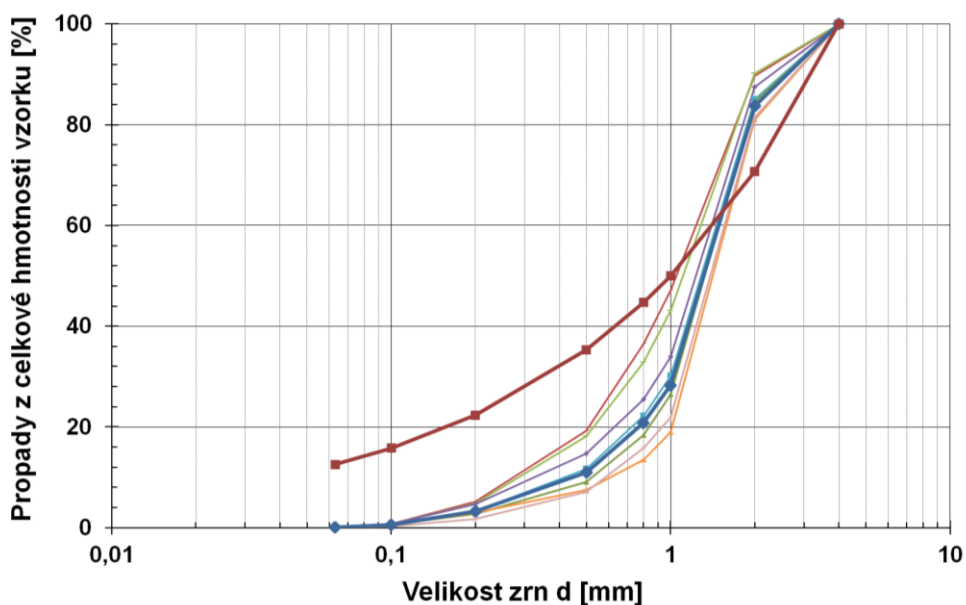
velikosti sít v mm				
> 5,0	> 2,0	> 0,8	< 0,8	
procentuální zastoupení zrn				
1,8	72,57	24,31	1,32	
1,96	71,83	24,63	1,58	
1,75	72,02	24,72	1,51	
1,7	73,48	23,17	1,65	
1,52	71,96	25,36	1,16	
1,97	67,84	28,63	1,55	
1,22	63,55	34,14	1,09	
1,65	64,88	31,96	1,52	
2,62	75,25	20,82	1,31	
2,87	80,08	15,61	1,44	
2,06	78,54	18,29	1,1	
1,78	75,66	20,77	1,78	
2,84	74,13	21,59	1,43	
2,83	75,41	19,81	1,93	
1,31	65,39	31,57	1,71	
2,17	75,06	21,61	1,15	
1,13	67,92	29,58	1,37	
1,29	70,15	26,98	1,58	
1,51	69,87	27,22	1,4	
průměr	1,89	71,87	24,78	1,45

### 5.2.2.1 Zkoušené materiály z Keramostu a.s.

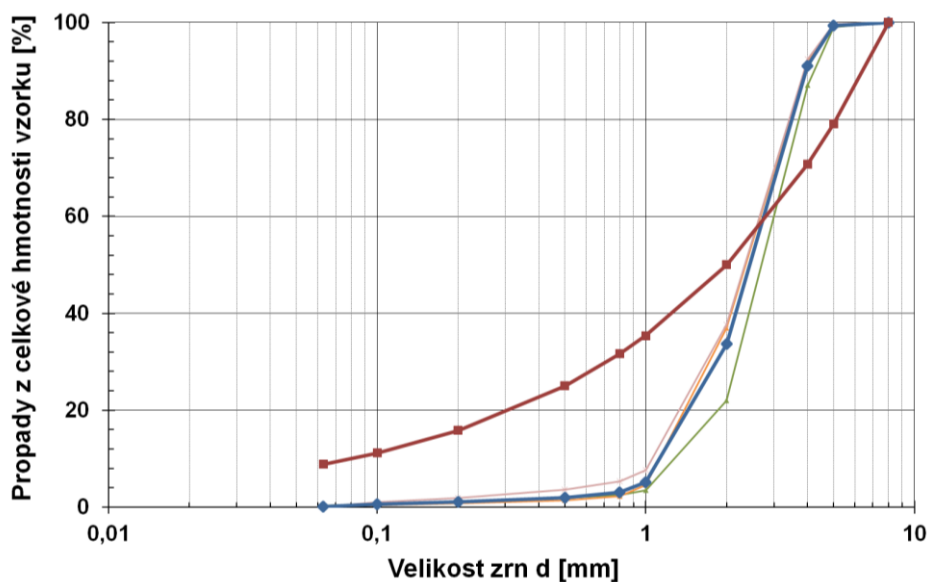
Oproti předchozí technologii (lisování bentonitových pelet v ČLUZ a.s.) lze měnit zrnitost směsi pelet, ale pouze kombinací zrnitostí, kterou umožňuje linka v Keramostu a.s., viz Tabulka 2. V první fázi byly testovány zrnitosti 0,8-2 mm a 0,8-5 mm. Materiál z Keramostu byl označený zkratkou REC. Také byly zjištěny objemové hmotnosti sušiny REC a byly porovnány s B75 PEL 12, viz Obr. 39. U obou materiálů bylo dosaženo podobné průměrné objemové hmotnosti sušiny okolo  $1,8 \text{ g/cm}^3$ , ale při různých vlhkostech materiálů.



Obr. 39 – Grafické znázornění dosažených objemových hmotností sušin (zhutnění) jednotlivých pelet; modře jsou znázorněny hodnoty pro B75 PEL 12 z ČLUZ a.s. a červeně hodnoty pro materiál z Keramostu a.s. označený jako REC.



Obr. 40- Grafické zobrazení průměrné křivky zrnitosti (silná modrá), která byla stanovená z tenkých pro různé vzorky REC 0,8-2 mm a porovnání zrnitosti s křivkou podle Fullera, která je v grafu vynesena silně a červeně.



Obr. 41- Grafické zobrazení průměrné křivky zrnitosti (silná modrá), která byla stanovená z tenkých pro různé vzorky REC 0,8-5 mm a porovnání zrnitosti s křivkou podle Fullera.

### 5.2.3 Úprava zrnitostního složení REC pro potřeby zaplnění technologické spáry

Z dřívějších výzkumných prací a ze zahraničních prací je zřejmé, že pro dosažení co možná nejvyšší objemové hmotnosti sušiny je nutné upravit zrnitost materiálů. Podle zrnitostních křivek materiálů byly průmyslově připraveny dvě směsi materiálu REC, a to směs zrnitostí 0,8-2mm a 2-5mm v poměru 7:3 (REC MIX I) celkem 2,5 tuny a 0,8-2 mm a 2-5 mm 1:1 (REC MIX II) v množství 1,6 tuny. Návrh poměru mísení byl určen na základě zkušeností z předchozích prací. Nelze předvídat zrnitostní složení dopředu, např. výpočtem, protože i technologie mísení mění zrnitostní složení. Důležité je, v souladu s cíli této práce, že mísení směsí probíhalo v průmyslovém měřítku v řádu několika tun. Materiál REC vyrobili pracovníci v Keramost a.s. z B95 a mísení směsí bylo provedeno v ČLUZ a.s.

Zrnitostní složení REC bylo upraveno a vzhledem k pozitivním výsledkům hutnicích zkoušek materiálu smíchaného v poměru 7:3 (REC MIX I, viz Obr. 42), byl tento materiál vybrán pro finální testování technologické spáry ve velkém modelu.



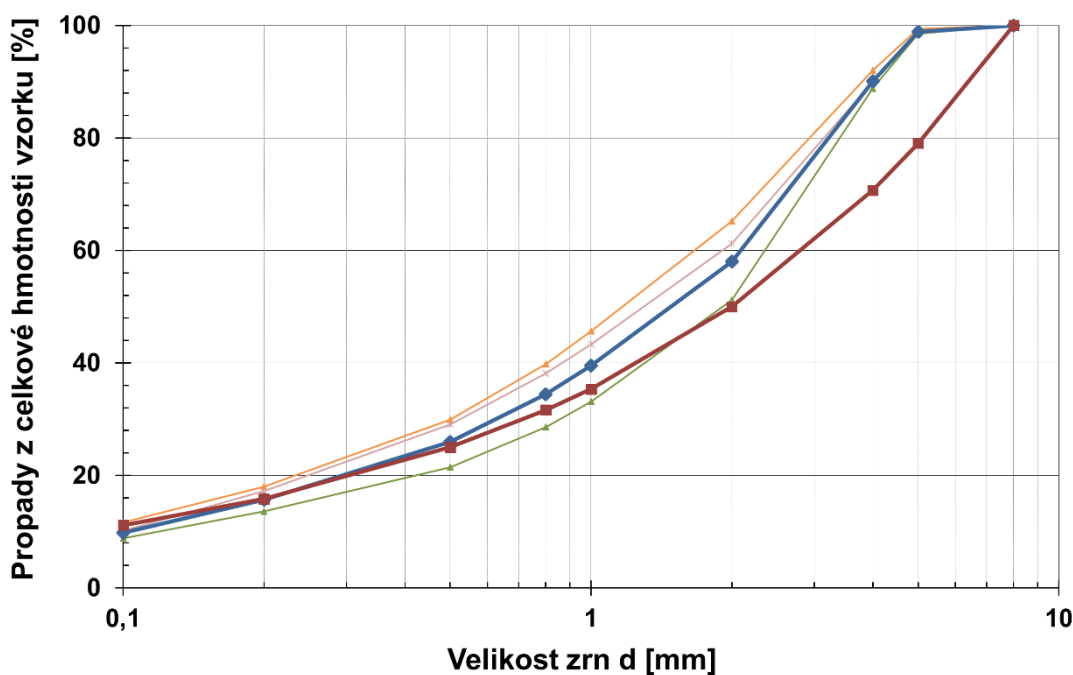
Obr. 42 – Foto REC MIX I při zkouškách v laboratoři.

### 5.2.3.1 Váhová vlhkost REC MIX

Laboratorně stanovené hodnoty vlhkosti u obou nových směsí byly po výrobě v průměru  $w = 6,5\%$ . V průběhu skladování před závěrečnou zkouškou došlo ke změně vlhkosti bentonitu REC MIX I na  $w = 9\%$ .

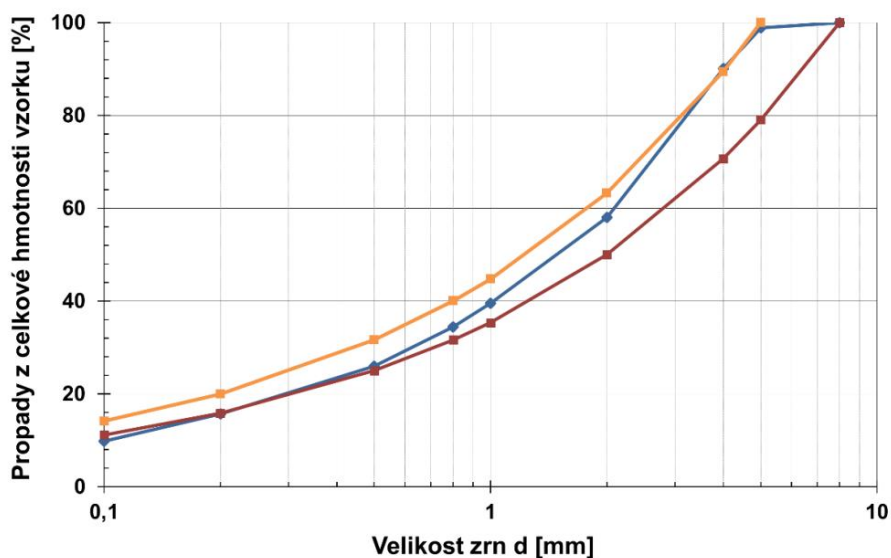
### 5.2.3.2 Zrnitostní složení REC MIX I

Z dosud získaných zkušeností a dosavadních výsledků se dalo předpokládat, že úpravou zrnitostí REC lze dosáhnout přiblížení se k Fullerově křivce. Zrnitostní rozbor na Obr. 43 prokázal, že průměrná zrnitost (REC MIX I) má podobné zrnitostně složení jako čára podle Fullera. Na Obr. 44 jsou, mimo průměrného zrnitostního složení REC MIX I, graficky znázorněné křivky podle Fullera pro různé  $D_{max}$ . Z Obr. 44 je zřejmé, že průmyslově připravená směs REC MIX I je svojí zrnitostí téměř shodná s „ideální“ zrnitostí.



Obr. 43- Grafické zobrazení průměrné křivky zrnitosti (silná modrá) pro REC 0,8-2 mm a REC 2-5 mm smíchaný v poměru 7:3 a porovnání zrnitosti s křivkou podle Fullera (silná červená).

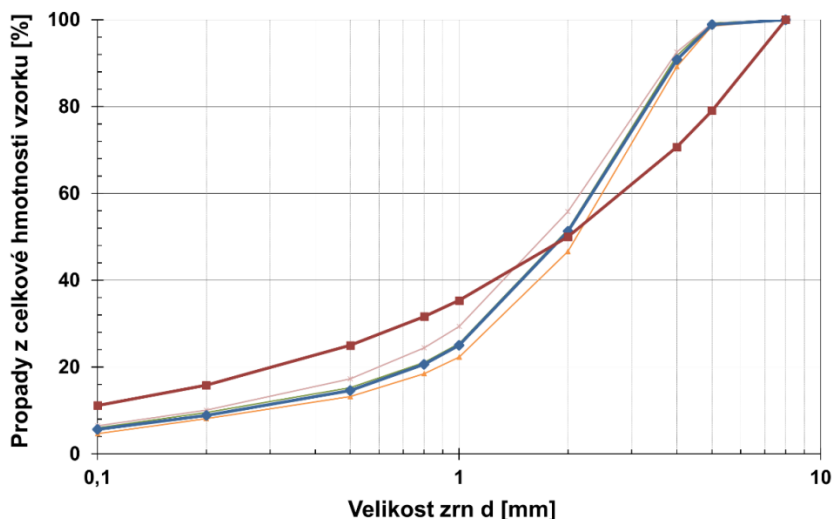




Obr. 44- Grafické zobrazení průměrné křivky zrnitosti (modrá) pro REC 0,8-2 mm a REC 2-5 mm smíchaný v poměru 7:3 (REC MIX I) a porovnání zrnitosti s křivkami podle Fullera pro  $D_{max}=8\text{mm}$  (červená) a  $D_{max}=5\text{ mm}$  (oranžová).

### 5.2.3.3 Zrnitostní složení REC MIX II

Zrnitostní rozbor na Obr. 45 prokázal, že průměrná zrnitost REC MIX II nemá podobné zrnitostně složení jako čára podle Fullerova výpočtu.



Obr. 45- Grafické zobrazení průměrné křivky zrnitosti (silná modrá) pro REC 0,8-2 mm a REC 2-5 mm smíchaný v poměru 1:1 (REC MIX II) a porovnání zrnitosti s křivkou podle Fullera (silná červená).

## 5.2.4 Referenční zahraniční materiál – GBM

Pro ověření některých postupů a měření byly testovány i bentonitové pelety GBM (Granulated Bentonite Mixture) [30] z NAGRY (Švýcarsko). GBM bentonitová směs byla navržena podle Fullerova výpočtu (křivky). Dle dostupných informací ze zahraničních výzkumů se jedná o nejlépe připravenou směs vzhledem k dosažené objemové hmotnosti po aplikaci a vzhledem k možnosti průmyslové výroby. Při průmyslové výrobě byly vylisovány desítky tun GBM pro in-situ test ukládání kontejneru ve švýcarské podzemní laboratoři Mont Terri [42].

Na GBM materiálu (viz Obr. 46) byly provedeny stejné zkoušky jako na uvedených zkoušených a vyvíjených směsích. Důležité bylo ověření některých použitých měření na zahraničním peletizovaném materiálu, pro který existují reference např. [61].



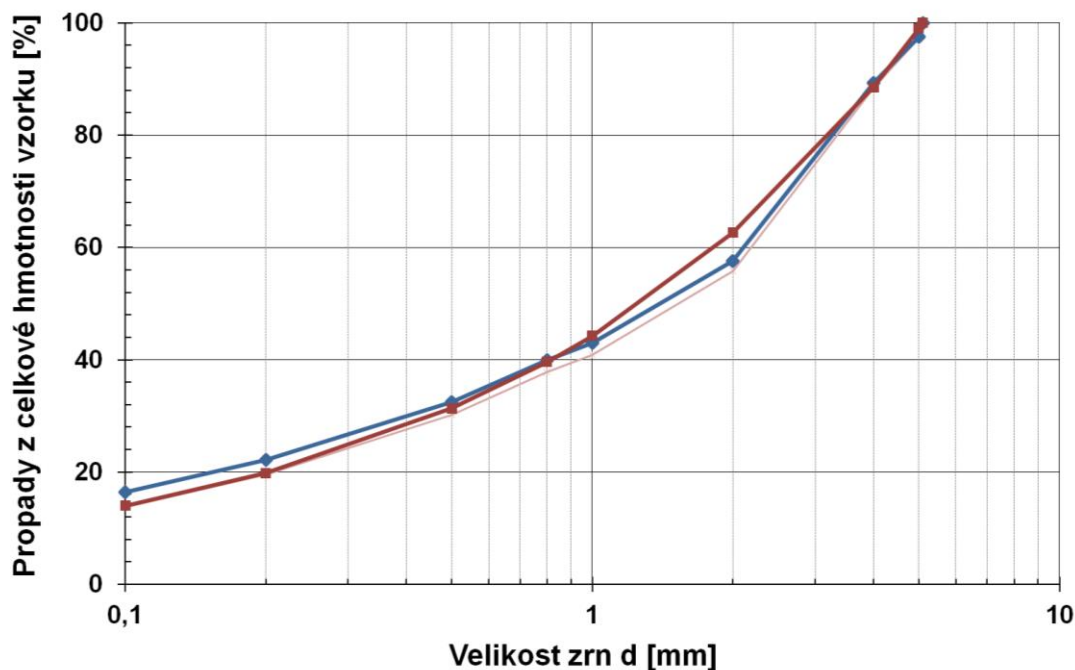
Obr. 46 – GBM z NAGRY při zkouškách v laboratoři.

### 5.2.4.1 Vlhkost GBM

Vlhkost (váhová) byla i pro GBM stanovena průběžně během zkoušek a pohybovala se od  $w=6,5\%$  do  $w=11\%$ .  $w=6,5\%$  byla vlhkost na začátku testování GBM a s  $w=11\%$  vlhkostí byl realizován závěrečný test zaplnění spáry.

### 5.2.4.2 Zrnitost GBM

Z grafu na Obr. 47 je zřejmá téměř optimální zrnitost GBM (je shodná s křivkou podle Fullera).



Obr. 47- Grafické zobrazení průměrné křivky zrnitosti (silná modrá) pro BGM a porovnání zrnitosti s křivkou podle Fullera (červená).

## 5.3 Odzkoušení a výběr technologií pro zaplnění technologických spár

Byly odzkoušeny tři technologie pro aplikaci materiálů do technologické spáry, a to volné sypání, volné sypání a následné setřesení a technologie stříkaného jílu. Technologie stříkaných jílu je poměrně nová a autor práce se podílel v CEG na jejím vývoji. Popis technologie stříkaného jílu je v příloze (kapitola 12.1).

U testovaných technologií bylo cílem dosáhnout u zkoušených materiálů co možná nejvyšší objemové hmotnosti sušiny. Nejprve byly provedeny zkoušky volného sypání do válce. Po zkouškách ve válci byl připraven malý model spáry o tloušťce 35 mm (výška modelu 250 mm a šířka 350 mm), na kterém byly odzkoušeny všechny tři technologie. Pro finální zkoušku by připraven velký model spáry o tloušťce 50 mm,



kteřá byla vytvořena na ploše o šířce 1500 mm a výšce 1000 mm. Na velkém modelu byla odzkoušena vybraná technologie a vybraný materiál a rovněž referenční materiál BGM.

V průběhu testování technologie sypání (volného a se setřesením) byly odzkoušeny různé druhy pelet či směsí. Některé výsledky nejsou v této práci publikovány, protože se jednalo pouze o informativní testy. V Tabulka 3 na straně 78 jsou uvedeny výsledky pouze pro jeden laboratorně připravený materiál, a to pro B75 REC F LAB MIX<sup>12</sup>. Tento materiál byl připravený z REC přesně podle Fullerova výpočtu. Nejdříve bylo připraveno 8 frakcí bentonitu REC. Po té byly frakce hmotnostně míchány, aby bylo dosaženo co nejlepší zrnitosti. Taková příprava materiálu však není, dle dostupných informací z úpraven, reálná v provozu firmy Keramost a.s. V práci navržené a odzkoušené mísení ze dvou frakcí bentonitu (materiál REC MIX I) zrnitostí téměř odpovídá Fullerově křivce a příprava REC MIX I je proveditelná v plno provozním měřítku.

### 5.3.1.1 Zkoušky hutnění ve válci

Ve válci o objemu 5 dm<sup>3</sup> bylo odzkoušeno volné sypání materiálu, ale rovněž bylo odzkoušeno dohutnění nasypané směsi setřesením anebo strojovým dovibrováním. Jak se později ukázalo při závěrečných zkouškách ve velkém modelu spáry, lze využít sypání ve válci, resp. možnosti zhutnění zkoušeného materiálu i ve spáře o šířce 50 mm. Ve válci také probíhalo měření termofyzikálních vlastností pelet přístrojem Isomet, viz Obr. 48. Výsledky ze zkoušek ve válci jsou shrnuté v Tabulka 3 (str. 78).

---

<sup>12</sup> B75 REC F LAB MIX – materiál připravený z REC a to a smícháním různých zrnitostních frakcí s cílem přiblížit se co nejvíce optimální zrnitosti definované podle Fullera



Obr. 48 – Válec 5 dm<sup>3</sup> pro zkoušení možností zhutnění zkoušených materiálů a pro stanovení termofyzikálních vlastností; foto je z měření a vpravo na obrázku je přístroj Isomet 2114.

### 5.3.1.2 Zkoušky zhutnění v malém modelu

Pro první zkoušky spáry byl navržen a připraven model o rozměrech 35 cm x 25 cm a tloušťce spáry 35 mm, viz Obr. 49. Model byl zkonstruován tak, aby odolal i tlaku při stříkání bentonitu. Přední strana modelu byla vyrobena z pevnostního bezpečnostního skla. Na malém modelu tak mohla být odzkoušena i technologie stříkaného bentonitu. Výsledky ze zkoušek z malého modelu spáry jsou shrnuté v Tabulka 3 (str. 78).



Obr. 49 – Obrázek malého ocelového modelu spáry.



### 5.3.1.3 Výsledky zkoušek a výběr technologie a materiálu pro zaplnění spáry

V Tabulka 3 jsou shrnuty výsledky zkoušek zhutnění. Celkem bylo zkoušeno 6 způsobů pro zhutnění materiálu:

1. Volné sypání do válce o objemu 5 dm<sup>3</sup>. Při tomto způsobu byl materiál sypán postupně do válce z co nejmenší výšky, tzn. z 5 až 10 cm.
2. Volné sypání a ruční setřesení bylo provedeno tak, že volně nasypáný materiál byl následně ručně vibrován, a tím došlo k setřesení materiálu uvnitř válce.
3. Volné sypání a strojové setřesení bylo realizováno tak, že po nasypání materiálu byl válec pevně usazen na laboratorní třepačku a třepán do úplného sednutí materiálu.
4. Volné sypání do spáry o šířce 35 mm – model spáry byl postupně zasypáván zkoušeným materiálem.
5. Volné sypání a setřesení materiálu v malé spáře – po nasypání materiálu do spáry bylo ručně s modelem spáry třeseno do úplného sednutí materiálu ve spáře.
6. Malý model spáry byl vyplněn materiálem, který byl aplikován technologií stříkaného jílu.



Tabulka 3 – Výsledky ze zkoušek zhutnění různých materiálů za použití různých technologií

Testy zhutnění různé materiály a různé technologie	Objemová hmotnost sušiny [g/cm <sup>3</sup> ]					
	Volné sypání (válec 5 dm <sup>3</sup> )	Volné sypání a maximální ruční setřesení (válec 5 dm <sup>3</sup> )	Volné sypání a strojové setřesení (válec 5 dm <sup>3</sup> )	Volné sypání (malý model spáry 35 mm)	Volné sypání a setřesení (malý model spáry 35 mm)	Stříkaný jí (malý model spáry 35 mm)
<b>B75 PEL 12 (rozdílné zrnitosti)</b>	0,9 -1,04	1 -1,27	x	0,99	x	x
<b>B75 PEL 12 drcené</b>	1,12	1,37	x	x	x	x
<b>B75 REC 0,8-2</b>	1,03	1,21	x	1,06	1,21	x
<b>B75 REC 0,8-5</b>	1,07	1,25	x	1,03	1,20	1,20
<b>B75 REC F LAB MIX</b>	1,21	1,50	x	x	x	x
<b>REC MIX I</b>	1,28	1,42	1,52	x	x	x
<b>REC MIX II</b>	1,26	1,40	1,46	x	x	x
<b>GBM (referenční materiál)</b>	1,30	1,42	1,56	x	x	x



Vzhledem k výsledkům testů zaplnění spáry na malém modelu byla pro další testování vybrána technologie tzv. volného sypání. Technologii volného sypání je případně možné doplnit ještě setřesením, které, i podle výsledků této práce, zlepší zhutnění bentonitových pelet. Pro závěrečné testování byl vybrán materiál REC MIX I neboť jej lze získat v průmyslovém měřítku, tj. v několika desítkách tun, a výsledky z hutnicích testů byly velice dobré.

## **5.4 Odzkoušení vybrané technologie na velkém modelu technologické spáry**

Pro závěrečné testování byla vybrána technologie volného sypání, a to vzhledem k tomu, že se jedná o nejjednodušší způsob umístění bentonitu a stejná technologie byla zkoušená i ve finském výzkumu. Jako materiály byly vybrány REC MIX I a GBM jako referenční materiál.

### **5.4.1 Velký model technologické spáry**

Pro finální testování byl navržen a vyroben model spáry o tloušťce spáry 50 mm, výšce 1000 mm a šířce 1500 mm. Model, stejně jako malý model, měl přední stranu z bezpečnostního skla. Materiál byl do spáry sypán plastovým válcem o objemu 5 litrů. Sypaný materiál byl vážen a při znalosti objemu spáry byla dopočítána objemová hmotnost. Při zkouškách byly odebrány vzorky pro stanovení vlhkosti materiálu. Podle vlhkosti materiálu byla pak dopočítána objemová hmotnost sušiny. Po testu technologie volného sypání bylo s celým modelem zavibrováno a došlo ke zhutnění materiálu. U obou testovaných materiálů (REC MIX I a GBM) došlo ke zhutnění o zhruba 6% (snížení objemu).





Obr. 50 – Model velké spáry a testy volného sypání bentonitu do spáry; vlevo je foto modelu spáry před zkouškou s násypkou; vpravo nahoře je foto z plnění spáry a vpravo dole je model spáry po vyplnění zkoušeným materiálem.

#### 5.4.2 Výsledky testů zaplnění spáry a porovnání se zahraničím

Výsledky testů jsou znázorněny v Tabulka 4, ze které je zřejmé, že v této práci odzkoušený materiál je srovnatelný se zahraničním referenčním. Výsledky zvolenou technologií zaplnění spáry a vybraným materiálem jsou příznivější než výsledky získané při obdobném výzkumu realizovaném v zahraničí (směs označená jako Mixture Ceb+Min 65/35; Finsko [16]).



Tabulka 4 – porovnání výsledků ze všech testů a se zahraničními poznatky

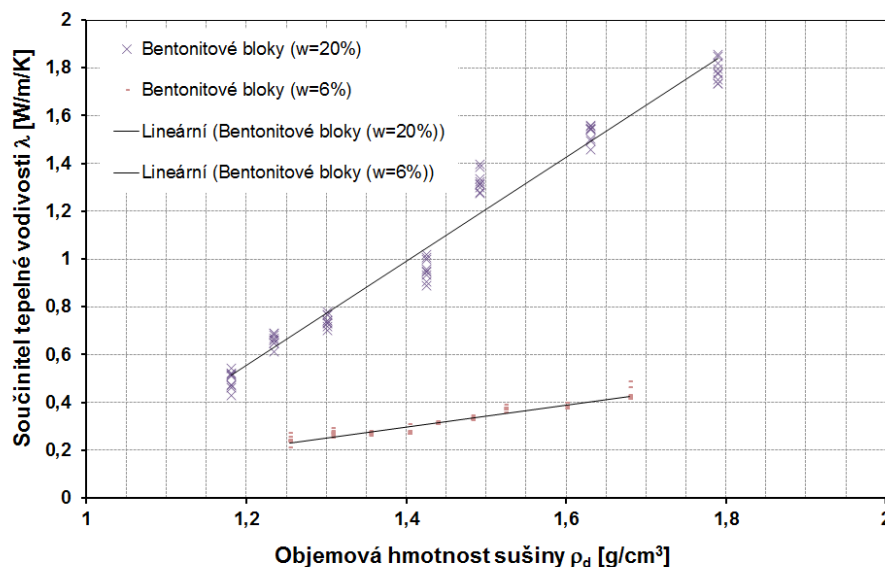
Testy zhutnění různých materiálů a různé technologie	Objemová hmotnost sušiny [g/cm <sup>3</sup> ]							
	Volné sypání (válec 5 dm <sup>3</sup> )	Volné sypání a maximální setřese ní (válec 5 dm <sup>3</sup> )	Strojové setřese ní (válec 5 dm <sup>3</sup> )	Volné sypání (malý model spáry 35 mm)	Volné sypání a setřese ní (malý model spáry 35 mm)	Stříkaný jíl (malý model spáry 35 mm)	Volné sypání (spára 50 mm)	Volné sypání a jemné setřese ní (spára 50 mm)
<b>B75 PEL 12</b>	1,04	1,27	x	0,99	x	x	x	x
<b>B75 PEL 12 drcené</b>	1,12	1,37	x	1,08	x	x	x	x
<b>B75 REC 0,8-2</b>	1,03	1,21	x	1,06	1,21	x	x	x
<b>B75 REC 0,8-5</b>	1,07	1,25	x	1,03	1,20	1,20	x	x
<b>B75 REC F LAB MIX</b>	1,21	1,50	x	x	x	x	x	x
<b>REC MIX I</b>	1,28	1,42	1,52	x	x	x	1,30	1,38
<b>REC MIX II</b>	1,26	1,40	1,46	x	x	x	x	x
<b>GBM (ref. materiál)</b>	1,30	1,42	1,56	x	x	x	1,31	1,39
<b>Finské testy [8] a [7]</b>								
<b>70% Swedish pellets, 30% LD-30</b>	x	x	x	x	x	x	1,34	1,42
<b>100% Wyoming, large (AECL)</b>	x	x	x	1	x	x	x	x
<b>100% Milos A (AECL)</b>	x	x	x	0,95	x	x	x	1,1
<b>Cebogel QSE</b>	x	x	x	0,85	x	1	x	0,87
<b>Hosakawa 2011</b>	x	x	x	0,86	x	x	x	x
<b>Ibeco</b>	x	x	x	0,83	x	1	x	0,85
<b>Minelco</b>	x	x	x	x	x	1,03	x	x
<b>Mixture Ceb+Min 65/35</b>	x	x	x	x	x	x	1,15	1,2

## 5.5 Stanovení termofyzikálních vlastností bentonitových pelet a bentonitových bloků z Bentonitu 75

Cílem těchto prací bylo experimentální měření a stanovení termofyzikálních vlastností vybraných materiálů pro zaplnění spáry. Dále byly experimentálně měřeny vlastnosti bentonitových bloků. Práce byly realizovány pro porovnání vlastností vybraných materiálů a lisovaných bloků a výsledky z těchto prací byly využity pro výpočet vlivu spáry na odvod tepla od ÚOS. Termofyzikální vlastnosti byly měřeny i na referenčním (GBM) materiálu pro porovnání s vybraným materiálem a také pro srovnání způsobu stanovení součinitele tepelné vodivosti s referencí z NAGRY. Všechna experimentálně naměřená data byla vyhodnocena hlavně graficky a byly stanoveny rovnice pro určení závislosti součinitele tepelné vodivosti na objemové hmotnosti.

### 5.5.1 Lisované bloky

Lisované bloky ve tvaru ( $v=5$  cm;  $d=12$  cm) byly připraveny lisováním bentonitu do ocelové formy v laboratořích Centra experimentální geotechniky.



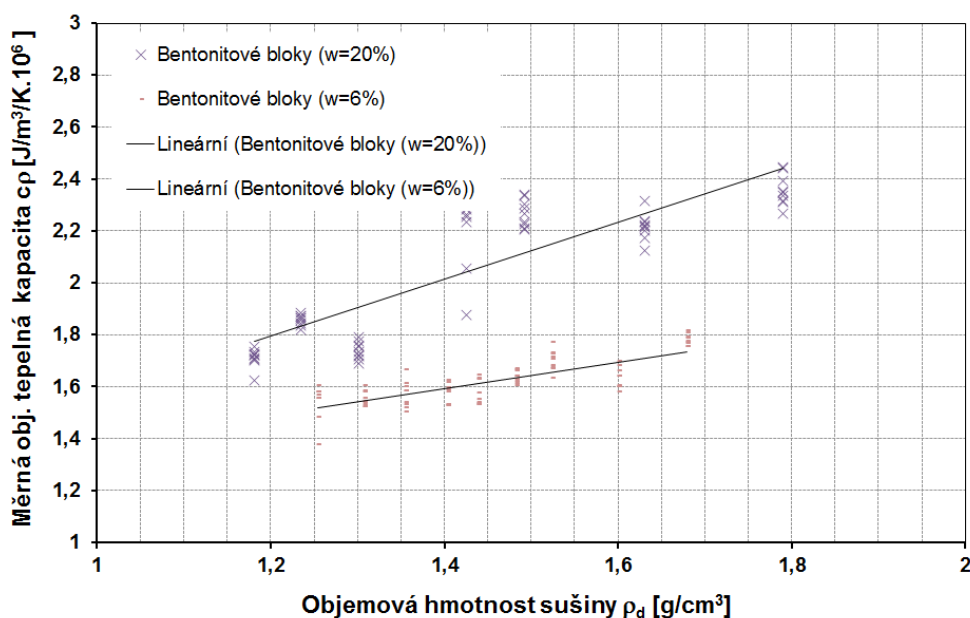
Obr. 51 – Graf závislosti mezi součinitelem tepelné vodivosti a objemovou hmotností sušiny pro lisované bentonitové bloky a pro dvě hodnoty vlhkosti bloků.

Závislost mezi součinitelem tepelné vodivosti a objemovou hmotností sušiny u lisovaných bloků pro dvě hodnoty vlhkosti:



$$\lambda = 2,1785\rho_d - 2,0591 \quad \text{pro} \quad w = 20,1\% \quad r^2 = 0,97$$

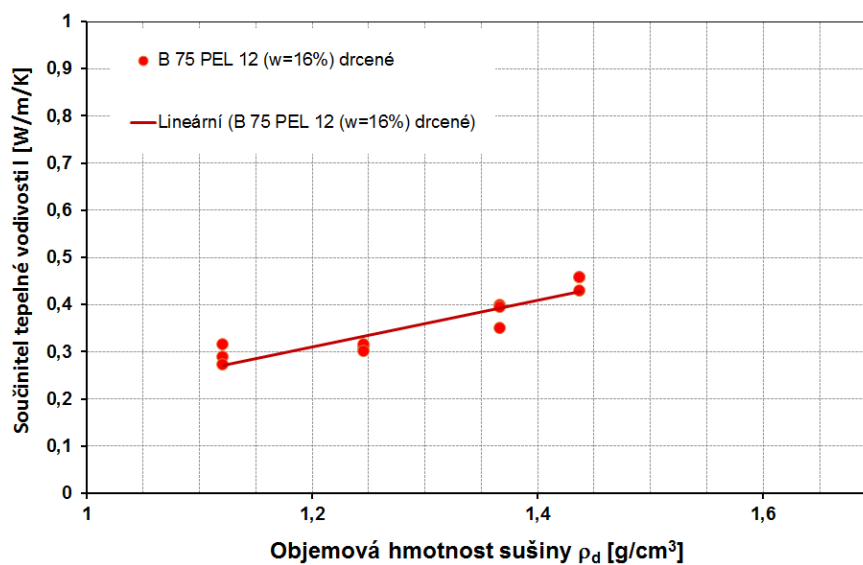
$$\lambda = 0,453\rho_d - 0,3361 \quad \text{pro} \quad w = 5,8\% \quad r^2 = 0,92$$



Obr. 52 – Graf závislosti mezi měrnou objemovou tepelnou kapacitou a objemovou hmotností sušiny pro lisované bentonitové bloky a pro dvě hodnoty vlhkosti bloků.

### 5.5.2 B75 PEL 12

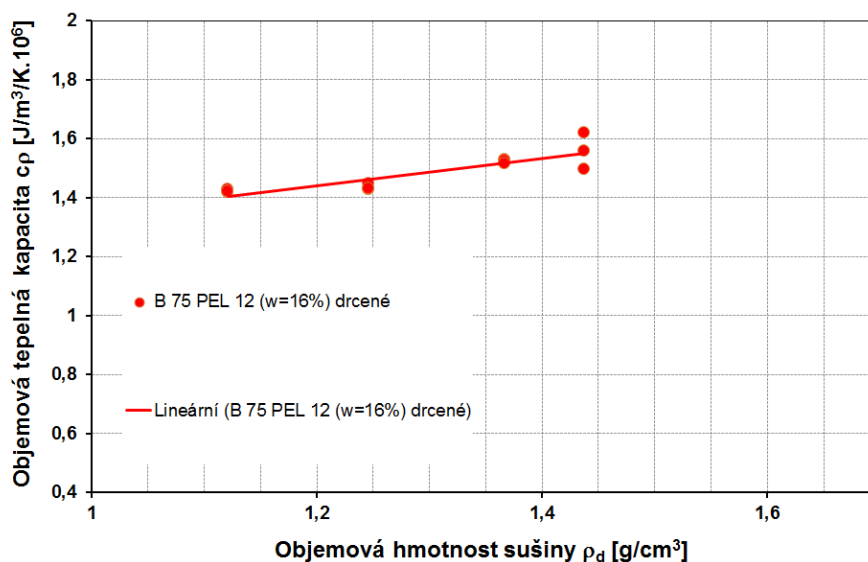
Součinitel tepelné vodivosti pro materiál B75 PEL 12 nebyl stanoven, protože měřicí přístroj ISOMET 2114 hodnoty nezměřil, a to zřejmě z důvodů velkých mezer mezi jednotlivými peletami. Tepelné vodivosti byly stanovené pouze pro B75 Pel 12 po drcení.



Obr. 53 – Graf vyjadřující závislost mezi součinitelem tepelné vodivosti a objemové hmotnosti sušiny pro bentonitové pelety B75 PEL 12 drcené ( $w=16\%$ ).

Závislost mezi součinitelem tepelné vodivosti a objemovou hmotností sušiny pro B75 PEL 12 drcené:

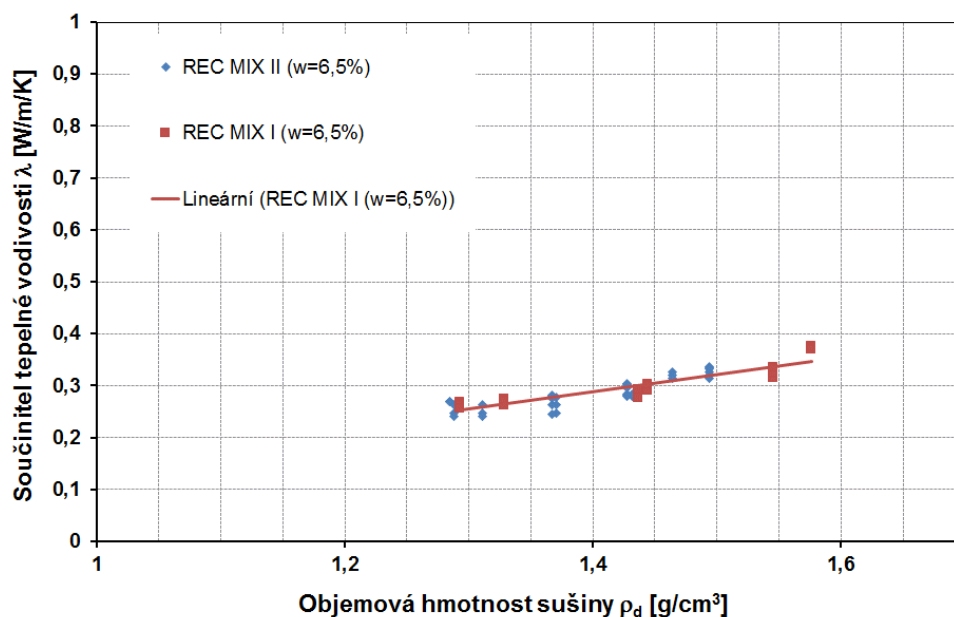
$$\lambda = 0,4912\rho_d - 0,2787 \quad \text{pro } w = 16\% \quad r^2 = 0,84 \quad \text{drcené B75 PEL 12}$$



Obr. 54 – Graf závislosti mezi měrnou objemovou tepelnou kapacitou a objemovou hmotností sušiny pro B75 PEL 12 ( $w=16\%$ ) před drcením a po drcení.

### 5.5.3 REC MIX I a II

Tepelná vodivost a měrná objemová tepelná kapacita byly stanoveny pro obě směsi REC MIX I a REC MIX II. Obě směsi mají téměř totožné termofyzikální vlastnosti, viz Obr. 57 a Obr. 58.

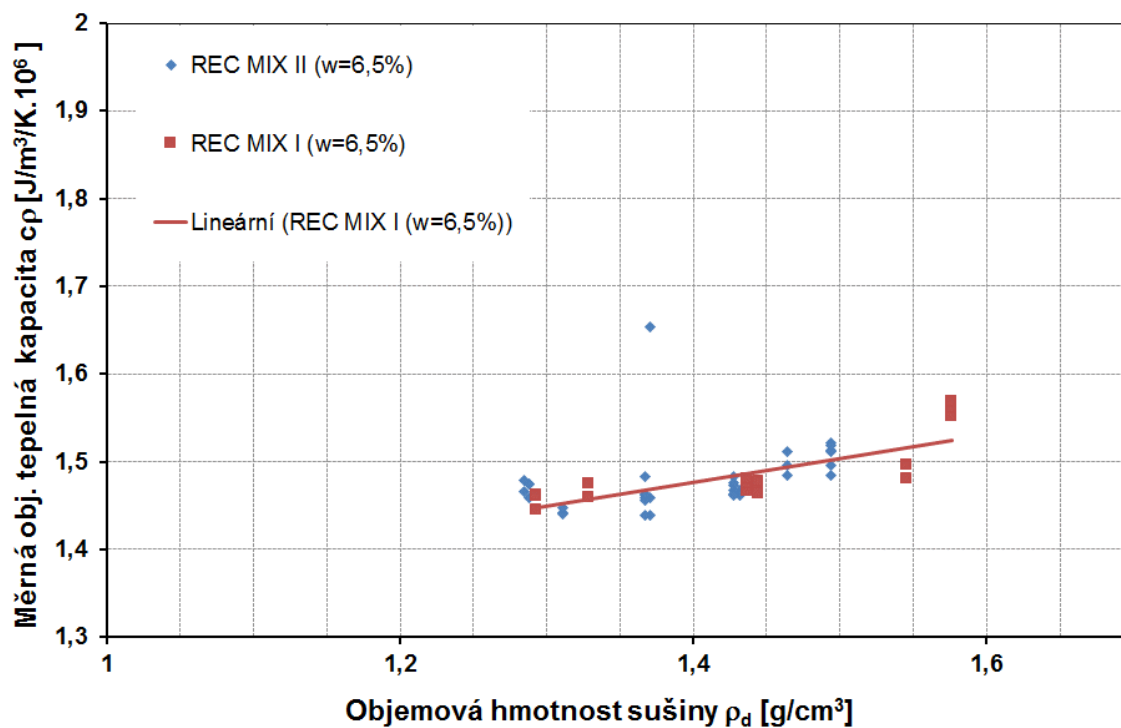


Obr. 55 – Graf závislosti mezi součinitelem tepelné vodivosti a objemové hmotnosti sušiny pro REC MIX I a II 12 (w=6,5%).

Závislost mezi součinitelem tepelné vodivosti a objemovou hmotností sušiny u REC MIX I A II:

$$\lambda = 0,3344\rho_d - 0,1799 \quad \text{pro } w = 6,5\% \quad r^2 = 0,82 \quad \text{pro REC MIX I}$$

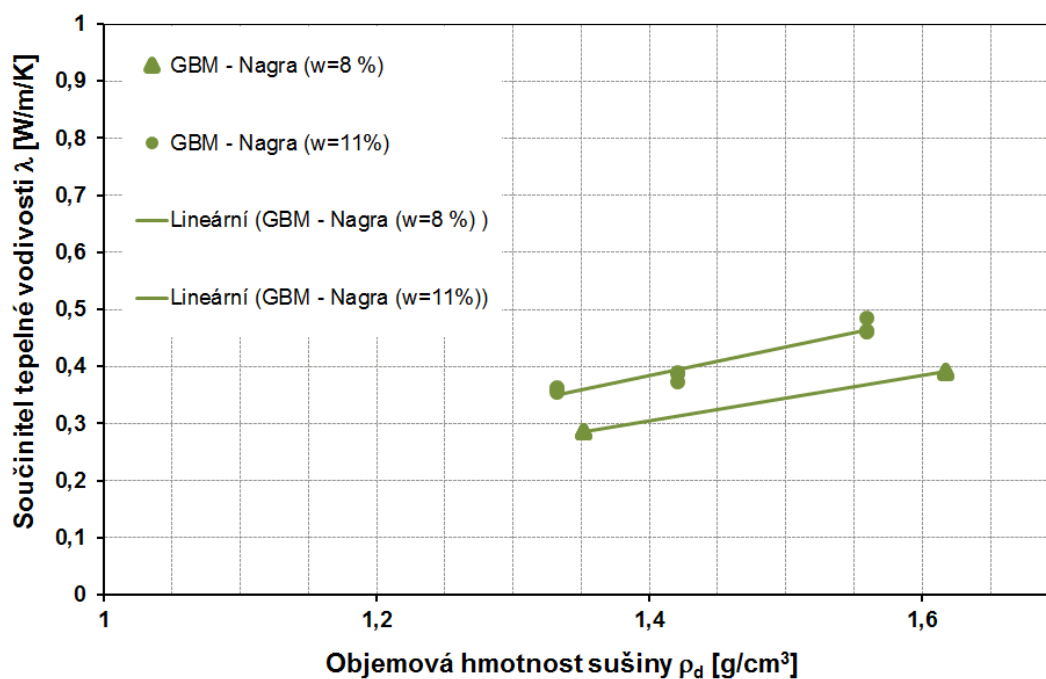
$$\lambda = 0,3562\rho_d - 0,2125 \quad \text{pro } w = 6,5\% \quad r^2 = 0,77 \quad \text{pro REC MIX II}$$



Obr. 56 – Graf závislosti mezi měrnou objemovou tepelnou kapacitou a objemovou hmotností sušiny pro REC MIX I a II (w=6,5 %).

### 5.5.4 GBM NAGRA

Termofyzikální vlastnosti byly stanoveny i pro zahraniční referenční materiál Granulated Bentonite Material (GBM). Výsledky z měření jsou zobrazeny na Obr. 57 a Obr. 58.



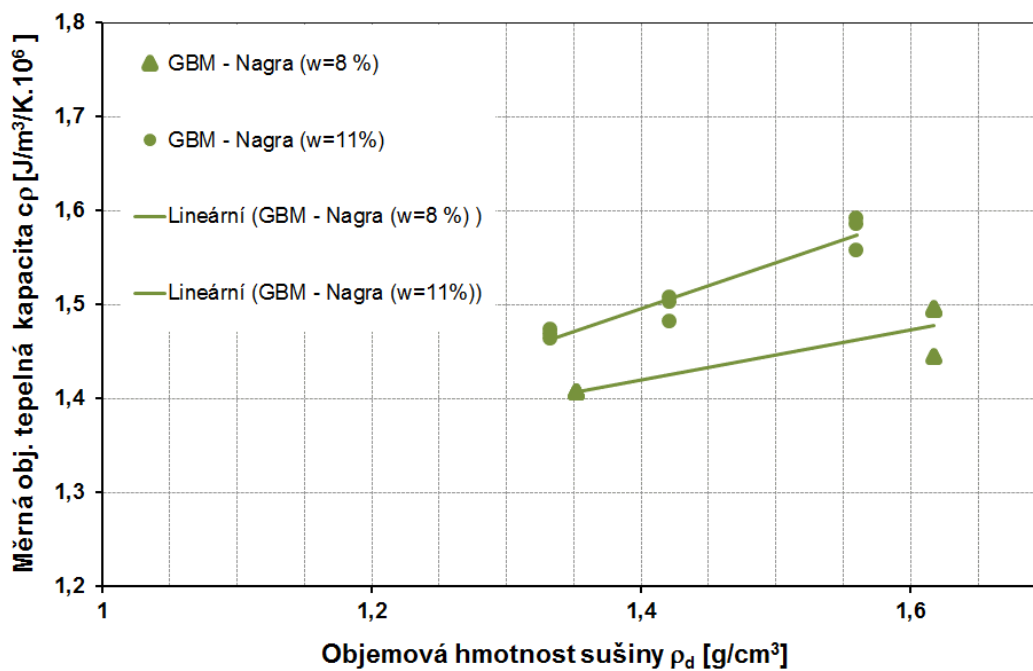
Obr. 57 – Graf závislosti mezi součinitelem tepelné vodivosti a objemové hmotnosti sušiny pro GBM NAGRA (w=8 % a w=11 %).

Závislost mezi součinitelem tepelné vodivosti a objemovou hmotností sušiny u REC MIX I A II:

$$\lambda = 0,2697\rho_d + 1,0421 \quad \text{pro } w = 8\% \quad r^2 = 0,82$$

$$\lambda = 0,4907\rho_d + 0,8088 \quad \text{pro } w = 11\% \quad r^2 = 0,93$$

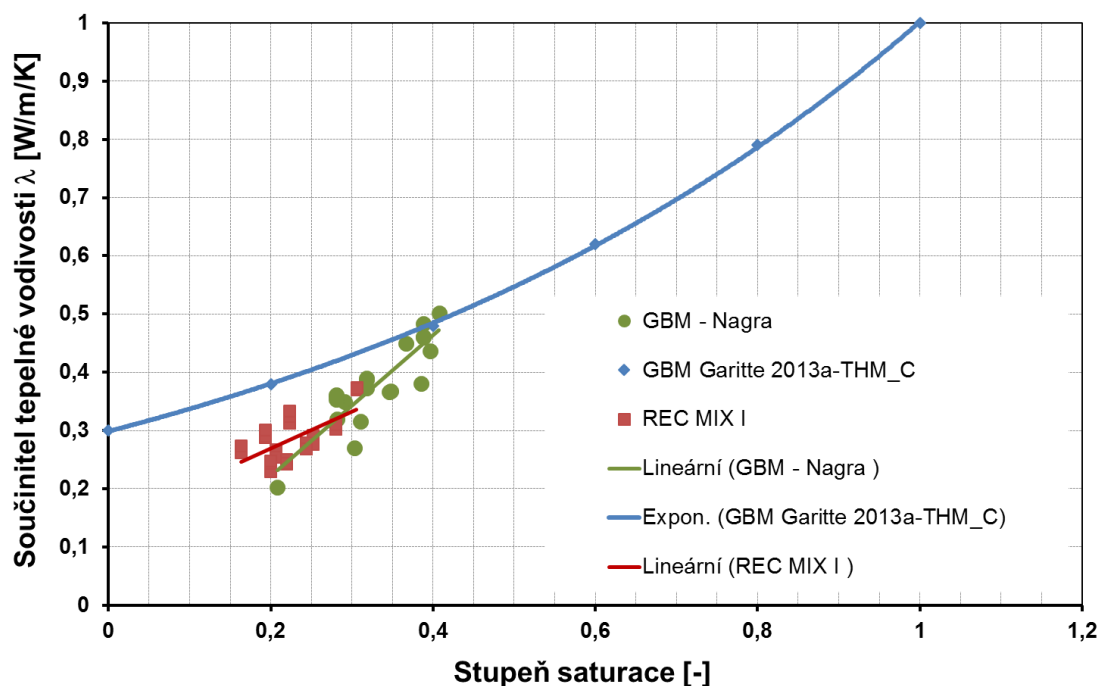




Obr. 58 – Graf závislosti mezi měrnou objemovou tepelnou kapacitou a objemovou hmotností sušiny pro GBM Nagra (w=8 % a 11 %).

### 5.5.5 Shrnutí a porovnání výsledků termofyzikálních vlastností pro vybrané materiály

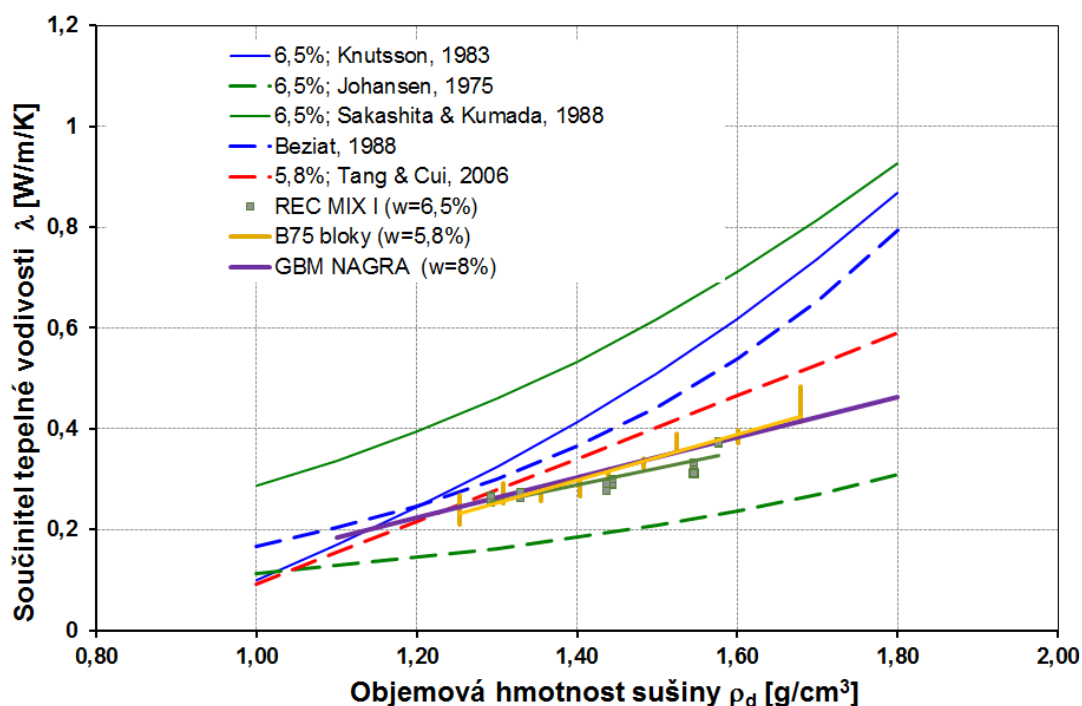
Naměřená data zkoušených materiálů (REC MIX I a GBM) byla porovnána se zaslanoou referencí z NAGRY, a to konkrétně s výsledky THMC modelování z roku 2013. Na Obr. 59 jsou porovnána naměřená data s modelem z NAGRY. Některá data odpovídají modelu, a to spíše u vyšších stupňů saturace ( $S_r=0,4$ ).



Obr. 59 – V grafu jsou zobrazena naměřená data pro REC MIX I a GBM. Data jsou v grafu porovnána s výsledkem THM\_C modelování zaslanoého od NAGRY (Garitte 2013a – THM\_C).

### 5.5.6 Porovnání naměřených dat s existujícími početními řešeními

V rámci rešerše k této práci byl připraven přehled existujících početních vyjádření pro součinitel tepelné vodivosti v kapitole 2.4.2.2. Početní vyjádření součinitele tepelné vodivosti založené na naměřených experimentálních datech ze zkoušených materiálů (REC MIX I, bentonitové bloky, BGM) byly pro zkoušené materiály porovnány s existujícími početními modely. Srovnávací vlhkost byla stanovena na cca 6 %. Z Obr. 60 je patrné, že naměřená data se nejvíce blíží početnímu vztahu podle Tang & Cui, 2006, viz kapitola 2.4.2.2.4 na straně 25.



Obr. 60 – Graf zobrazující různé početní řešení pro stanovení součinitele tepelné vodivosti, v grafu jsou také vykreslena data z experimentálního měření pro některé ze zkoušených materiálů (GBM, REC MIX I a bentonitové bloky).



## 5.6 Analýza fyzikálního modelu MCJ

Tato kapitola mj. obsahuje texty, grafy a výsledky z jiné autorovy práce, které byly publikovány i v rámci projektu Výstavba, provozování a vyhodnocení demonstračního experimentu MCJ, jehož zadavatelem je Správa úložišť radioaktivních odpadů. Pokud není uvedeno jinak, jde výhradně o texty, grafy a výsledky autora této práce, které jsou označeny kurzívou jako autocitace a odkazem na literaturu.

Pro potřeby této práce byla provedena analýza fyzikálního modelu MCJ s ohledem na fyzikální změny zatíženého bentonitu uprostřed výšky experimentu. Tyto změny objemové hmotnosti a vlhkosti mají vliv na termofyzikální vlastnosti bentonitu a na teplotní gradient v experimentu a v okolní hornině. V analýze experimentu se autor nejdříve zabývá měřeným tlakem v experimentu (souvisí hlavně s objemovou hmotností bentonitu) a teplotou v bentonitu a v okolní hornině. Tato data z fyzikálního modelu jsou důležitá pro predikci chování bentonitové vrstvy okolo kontejneru s vyhořelým jaderným palivem. Z analýz je zřejmý vliv technologických spár na vlastnosti bentonitu, např. nižší měřený tlak bentonitu.

V poslední části kapitoly je spočítán a vykreslen teplotní gradient v experimentu, a to po začátku zatěžování bentonitu v experimentu a po ustálení měřených teplot.

V rámci prací byly také provedeny svislé odběry bentonitu během provozu experimentu. Dá se říci, že odběr vzorků v průběhu experimentu je i v porovnání se zahraničím unikátní. Nebyla získána informace, že by při obdobných zahraničních experimentech byly v podmínkách in-situ odebírány vzorky.

Pro odběry vzorků bentonitu je používán autorem práce navržený a odzkoušený funkční vzorek Souprava pro odběr vzorků z bentonitové bariéry in-situ experimentů z roku 2013. Na obrázku Obr. 61 je znázorněn bentonitový válec (jádro) po odběru z experimentu. Bentonit je odebírán po válcích (jádrech) o průměru 32 mm a výšce do 70 mm.



Obr. 61 – Jádra ze čtvrtého odvrtu bentonitu, celkem bylo pro potřeby této práce analyzováno pět odběrů (výsledky a popis z jednotlivých odběrů včetně fotek jsou v příloze této zprávy).

*MCJ je zaměřen na fyzikální modelování chování bentonitové vrstvy podobně zatížené jako v plánovaném hlubinném úložišti. Bentonit je v modelu zatížen teplem a působením horninového prostředí. Tepelné zatížení bentonitu od topného tělesa simuluje vyzařování tepla od úložného obalového souboru s VJP. Tepelné zatížení může vést například k mineralogickým změnám v bentonitu [62].*

### **5.6.1 Monitoring fyzikálního modelu**

V průběhu provozování modelu jsou kontinuálně sbíraná data ukládána do databáze měřicího systému. Kromě vlastních naměřených dat, která systém uchovává v primárních jednotkách, databáze obsahuje komplexní informace o jednotlivých čidlech instalovaných v experimentu a deník experimentu.

*Čidla byla rozmístěna do devíti měřicích profilů I-IX. Profily I až VI jsou profily geotechnické bariéry. Profily VI, VII a VIII jsou teplotní profily instrumentovány digitálními čidly zapojenými paralelně. Paralelně zapojené digitální teploměry tvoří tzv. „řetězové teploměry“ o různé délce. Profily s převážně řetězovými teploměry VII a VIII byly instrumentovány i teploměry s čidly LM35DZ. Profil IX je, stejně jako teplotní profily VII a VIII, umístěn v obklopujícím horninovém prostředí. Profil IX obsahuje měřicí svorníky s tenzometry a „Crack meter“ tenzometrická čidla pro měření zavírání a rozevírání puklin. Do IX. profilu jsou zařazena i tenzometrická čidla na vzpěrných trubkách [62].*

Pro potřebu této práce jsou analyzována data z teplotních čidel (bentonit a hornina) a data monitorující tlak v experimentu.

*Pro měření tlaku byly použity hydraulické tlakové buňky (HTB). Tato měřidla jsou umístěna v každém měřicím profilu, a to jak ve směru radiálním, tak také ve směru*



*axiálním a tangenciálním. Toto rozmístění HTB umožňuje měřit vzniklá napětí ve třech rovinách. Veškeré HTB byly ihned propojeny pomocí kabelů do měřicí ústředny, kde dochází k transformaci naměřených signálů [62].*

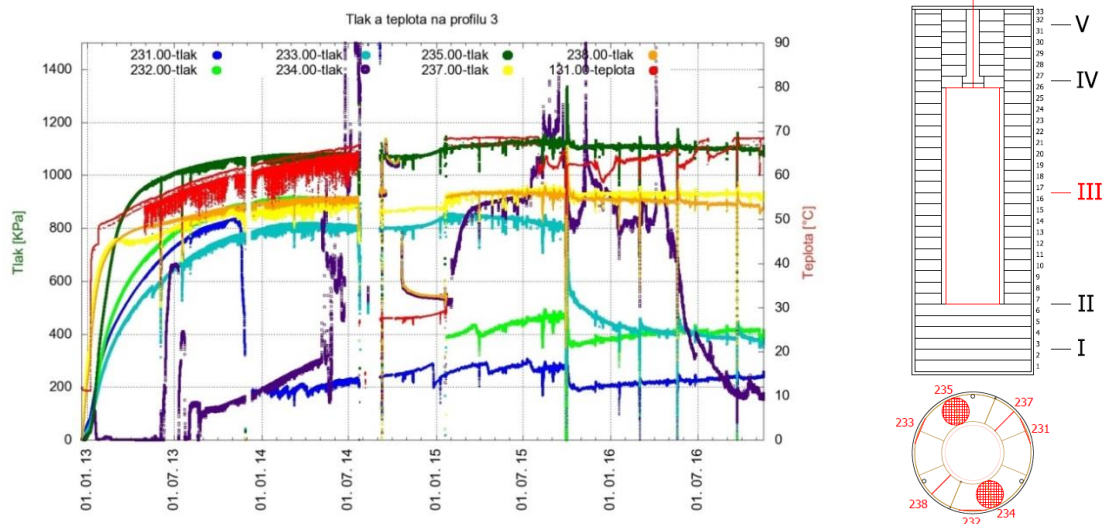
Počet buněk v jednotlivých měřicích profilech v experimentu MCJ – směrem ke svislé ose [62]:

- I. 8 HTB – 3 ve směru axiálním, 3 ve směru radiálním, 2 ve směru tangenciálním
- II. 8 HTB – 3 ve směru axiálním, 3 ve směru radiálním, 2 ve směru tangenciálním
- III. 7 HTB – 2 ve směru axiálním, 3 ve směru radiálním, 2 ve směru tangenciálním
- IV. 7 HTB – 2 ve směru axiálním, 3 ve směru radiálním, 2 ve směru tangenciálním
- V. 7 HTB – 2 ve směru axiálním, 3 ve směru radiálním, 2 ve směru tangenciálním

Pro potřebu analýzy byl vybrán měřicí profil uprostřed hloubky experimentu. Tento profil je nejvíce vhodný pro popis radiálního tepelného proudění v experimentu.

### 5.6.1.1 Vývoj tlaku

Hodnoty tlaku jsou zde zobrazeny v grafu společně s průběhem teploty.

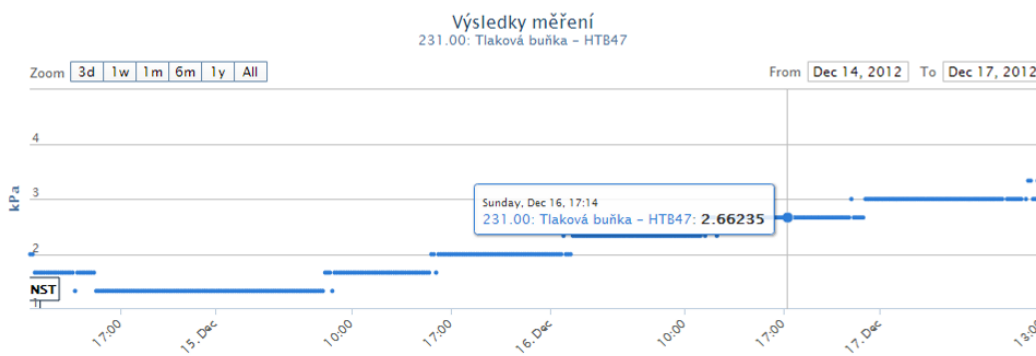


Obr. 62 – Znázornění hodnot z hydraulických tlakových buněk umístěných v profilu 3 (uprostřed experimentu) a vykreslení teploty z teploměru 131.

### 5.6.1.2 Závěry z monitoringu tlaku

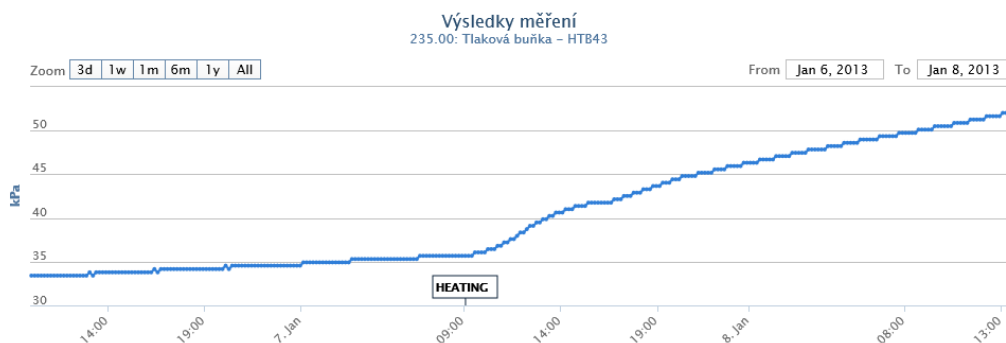
Hydraulické tlakové buňky poskytují informaci o průběhu bobtnání v bentonitové bariéře. Na základě prvních měření byla popsána např. tato pozorování:

1. K bobtnání dochází okamžitě po instalaci bentonitových bloků do vlhkého prostředí. Některá z čidel zachytila nárůst tlaku již v prvních hodinách provozu experimentu (Obr. 63).



Obr. 63- Výsledky měření tlaku čidlem 231 ukazují nárůst tlaků během několika hodin od uložení modelu.

2. Zapnutí topného tělesa a následné zatížení bentonitové bariéry teplem má okamžitý vliv na hodnoty tlaku – dochází k většímu nárůstu měřeného tlaku u některých čidel (Obr. 64).



Obr. 64 - Výsledky z měření tlaku čidlem 235 ukazují na nárůst tlaků po zapnutí topného systému.

3. Podle hodnot tlaků v jednotlivých měřicích profilech je zřejmé, že dochází k nerovnoměrné saturaci bentonitové bariéry. Tento závěr byl potvrzen in-situ odběry z bentonitového tělesa (viz kapitola 12.2).
4. Měřené tlaky v experimentu se neustále mění a pravděpodobně dochází k postupnému přesouvání hmoty bentonitu (např. do spár) a k homogenizaci bentonitové vrstvy.
5. Měřené tlaky nedosahují předpokládaných hodnot (nad 2MPa). I vzhledem k výsledkům objemové hmotnosti sušiny stanovené odběrem vzorků lze říci, že došlo ke snížení objemové hmotnosti sušiny bentonitové vrstvy. Hlavní vliv bude mít zřejmě bobtnání bentonitu do volných prostor (spár).



### 5.6.1.3 Vývoj teplot v bentonitové bariéře

Pro monitorování teploty v MCJ byly použity teploměry s čidly LM35DZ (Obr. 65; měřící rozsah do 150°C) a digitální teploměry DS18B20 (Obr. 66., Obr. 67).



Obr. 65 - Teploměr s čidlem LM35DZ před montáží do modelu.

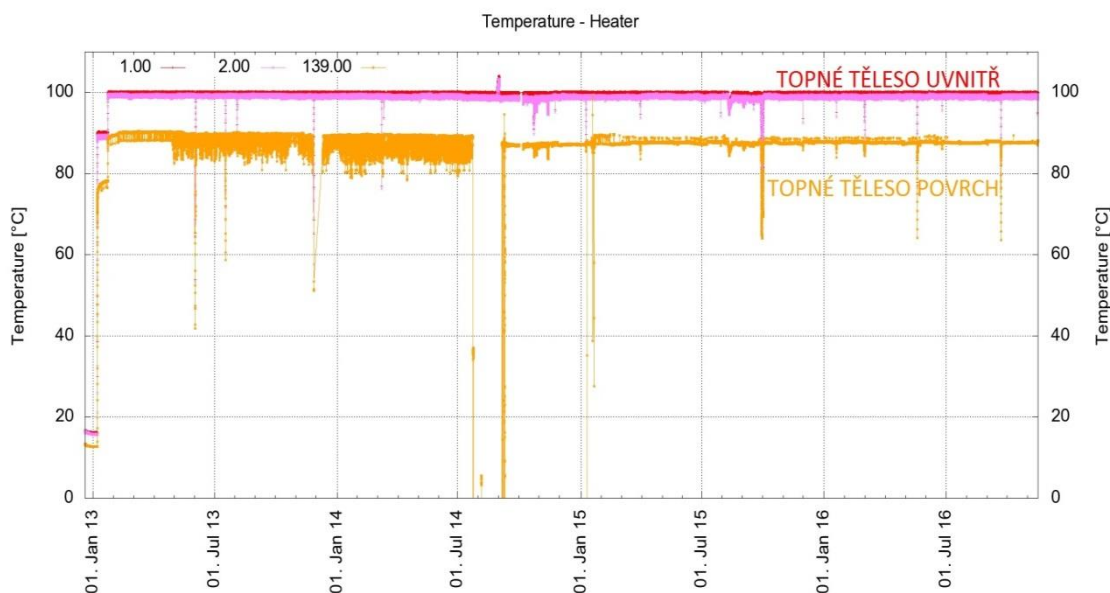


Obr. 66 - Svislé řetězové teploměry (v ochranných plastových trubičkách jsou patrná jednotlivá čidla).



Obr. 67 - Svislé řetězové teploměry a vodorovný teploměr 128 v průběhu výstavby modelu (v ochranných plastových trubičkách jsou patrná jednotlivá čidla).

Regulace výkonu topného systému probíhá na základě změny teploty měřené u regulátorů, které jsou uvnitř topidla. Data z teploměrů u regulátorů jsou kontinuálně monitorována (Obr. 68).

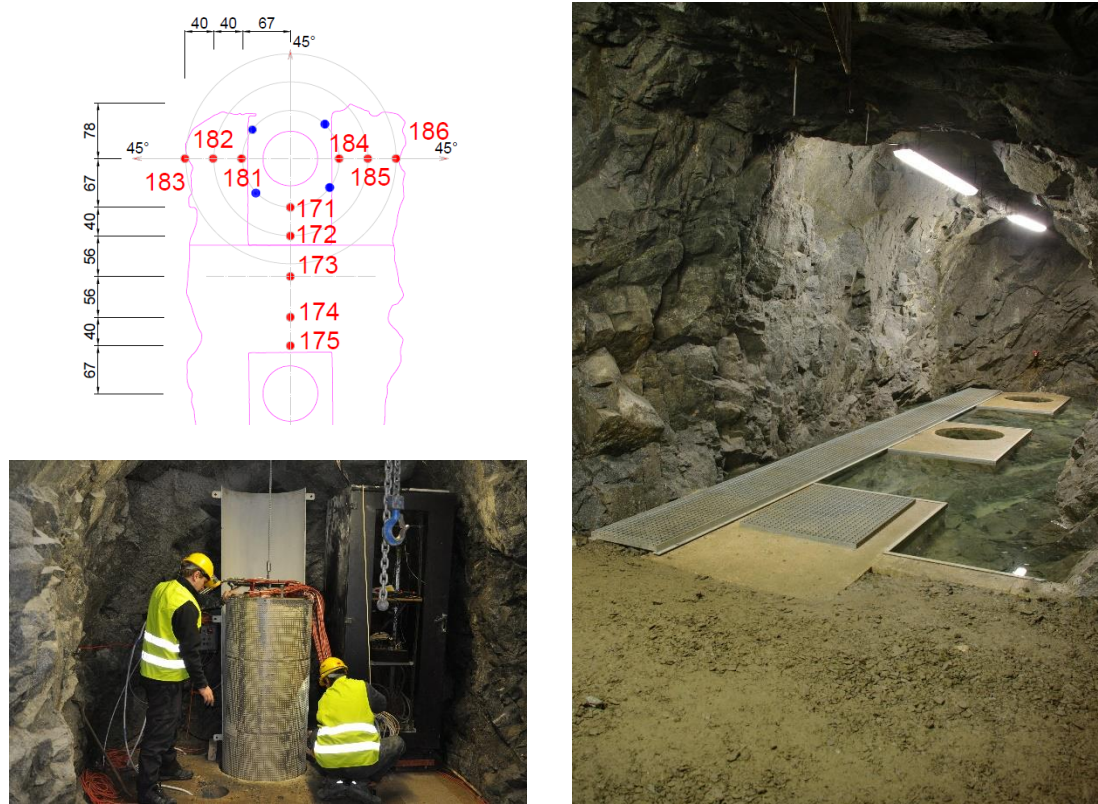


Obr. 68 - Průběh teploty uvnitř topného systému a na povrchu topidla (čidlo 139).

#### 5.6.1.4 Monitoring okolního masivu

Pro komplexní popsání fyzikálního modelu je důležitý i monitoring okolní horniny. Zejména hodnoty teploty v hornině jsou důležité pro analýzu provedenou v této práci.

V blízkém okolí úložného vrtu se odvrtalo 16 svislých vrtů o průměru 42 mm, do kterých se umístila čidla pro monitoring šíření tepla (12 vrtů s 3 m dlouhými řetězovými teploměry) a pro monitoring napjatosti okolního masivu (4 vrtvy s instalovanými 3m dlouhými měřícími svorníky). Všechny vrtvy byly vyvrtány svisle mimo vrtů pro teploměry u boků rozrážky (pod 45°, Obr. 69).



Obr. 69 – Nahoře vlevo je schéma monitoringu okolí studny (půdorys) včetně orientačního umístění a označení čidel – modré značky označují místa s měřicími svorníky a červené značky vyjadřují umístění teplotních čidel okolo vrtu pro experiment; vlevo dole je obrázek z instalace experimentu MCJ do vrtu a vpravo je obrázek z rozrážky, na počvě (dno) jsou vidět odvrtné velkoprofilové vrty.

### 5.6.2 Odběry vzorků bentonitu

Fyzikální model MCJ byl připraven pro možnost odběrů vzorků ze zatížené bentonitové vrstvy. Hodnoty získané z odebraných vzorků jsou důležité pro analýzu provedenou v této práci a vyhodnocení tepelné vodivosti bentonitu v modelu. Vzorky bentonitu byly odebírány ve svislém směru a byly provedeny ve dvou místech v různých hloubkách. Výsledky z jednotlivých odběrů jsou v příloze této práce, viz Odběry bentonitu z fyzikálního modelu.



### 5.6.2.1 Závěry z odběrů z experimentu MCJ

Na základě stanovení fyzikálních parametrů bentonitu z odběrů lze konstatovat:

1. Ve zkoušených profilech se objemová hmotnost snižuje směrem k víku modelu – to je zřejmě způsobeno redistribucí hmoty a nehomogenitou bariéry (tvárnice/ zásyp pod víkem/ obsyp trubek vedoucích k topnému tělesu) a únikem bentonitu okolo víka modelu.
2. Rozdíly mezi odběry jsou patrné z grafického vyjádření (Obr. 70, Obr. 71, Obr. 72). Podle hodnot vlhkosti je zřejmé, že se postupně ustaluje saturace a probíhá homogenizace bentonitové vrstvy. To potvrzují i výsledky z monitoringu – stále dochází ke změnám v měřeném tlaku.
3. Dva vzorky z prvního odběru, pět vzorků s druhého odběru a čtyři vzorky ze třetího odběru byly použity pro stanovení hydraulické vodivosti a bobtnacího tlaku v modelu zatíženého bentonitu. Získané hodnoty hydraulické vodivosti a bobtnacího tlaku z odběru budou porovnány i s výsledky nezatíženého materiálu. V grafech (Obr. 73, Obr. 74) jsou laboratorní výsledky hydraulické vodivosti a bobtnacího tlaku. Z grafu Obr. 73 je vidět velice nepatrné snížení bobtnacího tlaku u hodnot získaných na zatíženém materiálu oproti nezatíženému materiálu. Hodnoty hydraulické vodivosti jsou vyneseny do grafu (Obr. 74) společně s hodnotami získanými ze stejného nezatíženého materiálu. Stejně jako u hodnot bobtnacího tlaku lze pozorovat, že materiál po zatížení vykazuje ve všech případech mírné snížení oproti vstupním hodnotám, materiál je méně propustný. Dle výsledků z mineralogických rozborů nebyly prokázány mineralogické změny významného rozsahu, proto nelze říci, co přesně má vliv na snížení hodnot hydraulické vodivosti a bobtnacího tlaku. I výsledky ze zahraničních experimentů jsou nejednoznačné, viz Tabulka 5.

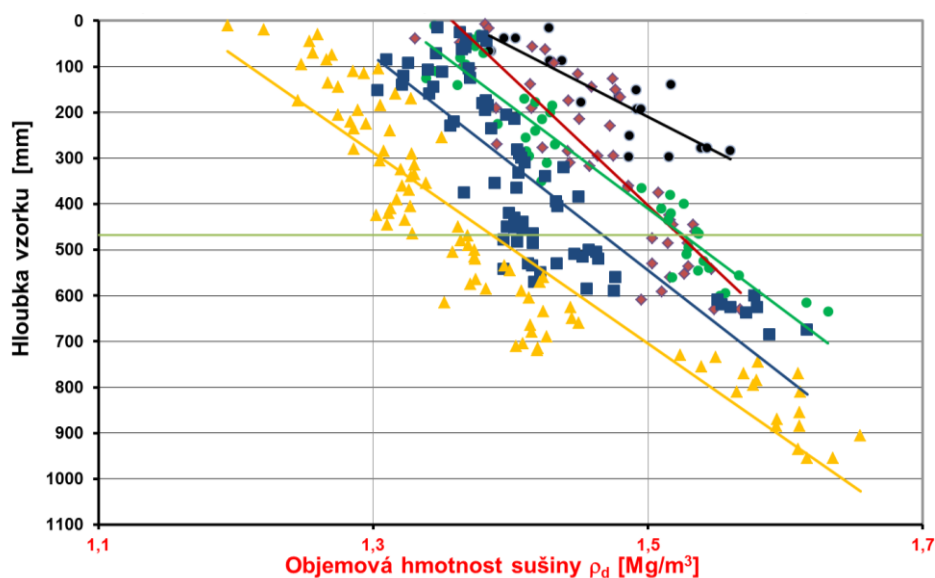


Tabulka 5 – shrnující výsledky změn hydraulické vodivosti a bobtnacího tlaku z vybraných experimentů (I. Hanusová; L. Hausmannová; J. Šťástka 2017- reference z přípravy článku):

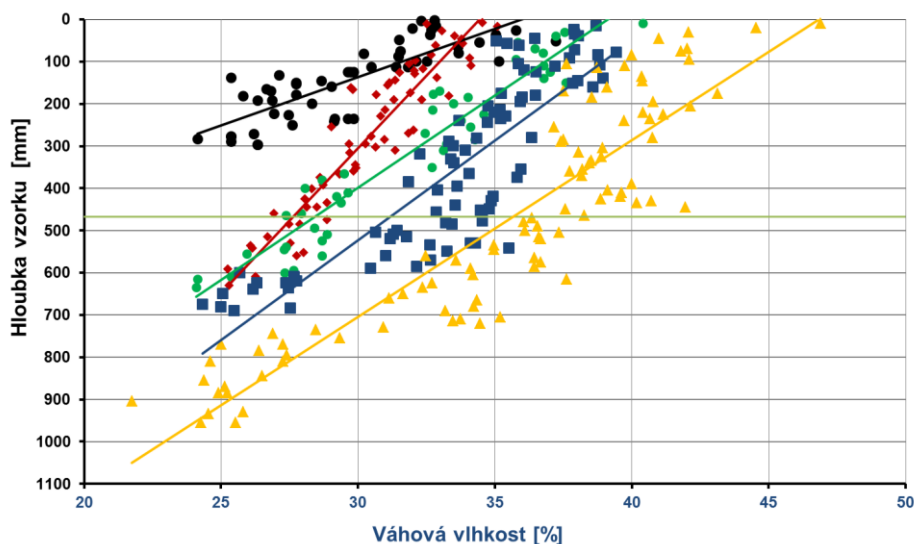
In-situ experimenty	Hydraulická vodivost	Bobtnací tlak
Mock-up Josef	-	-
ABM [63]	0	0/-
CRT [64]	-	0
TBT [65]	0/+	-
LOT [66]	-	0

*Zvýšení (+), snížení (-) anebo žádné změny (0) parametrů oproti vstupním hodnotám zkoušených bentonitů; např. u ABM experimentu bylo snížení hodnot bobtnacího tlaku pozorováno pouze u některých bentonitů*

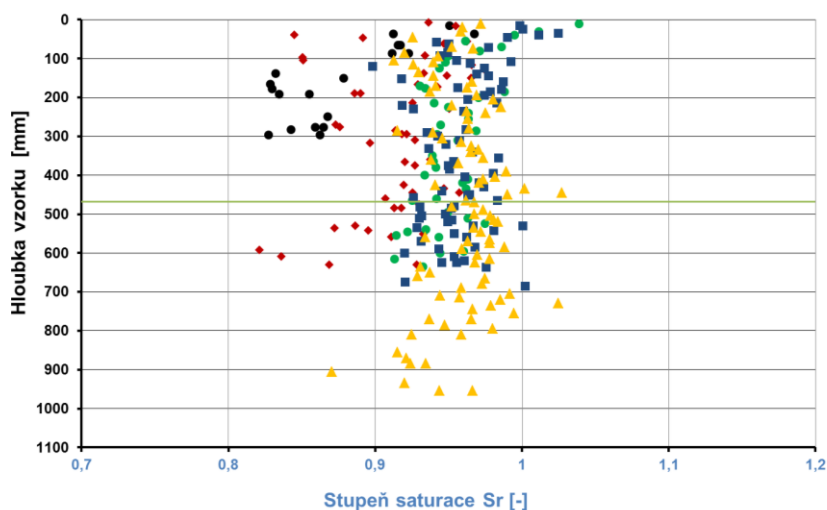
- Pod víkem modelu je bentonitová bariéra nejvíce nasycena a stupeň saturace mírně klesá s rostoucí hloubkou směrem od víka (Obr. 72).
- Podle hodnot stupně saturace odběrů č. 2. a č. 3. se za rok zvýšil stupeň saturace zhruba o 0,04. V úrovni topného tělesa a ve středu bentonitové bariéry lze předpokládat stupeň saturace okolo 0,95. Pod víkem experimentu se stupeň saturace pohybuje kolem 1.
- Podle stupně saturace ( $S_r$ ) lze říci, že došlo k ustálení saturace. Průměrné hodnoty stupně saturace pro jednotlivé odběry jsou: první odběr po 11 měsících –  $S_r = 91 \%$  (pouze pro 32 cm pod víkem experimentu), druhý odběr po 17 měsících –  $S_r = 87 \%$ , třetí odběr po 30 měsících –  $S_r = 95 \%$ , čtvrtý odběr po 43 měsících –  $S_r = 96 \%$ , pátý odběr po 47 měsících –  $S_r = 96 \%$ . Dle normy ASTM D5084-10 [17] lze označit stupeň saturace  $100 \% \pm 5 \%$  stanovený výpočtem jako plné nasycení zeminy. Autor práce předpokládá, že bentonit není v experimentu plně nasycen, protože na bentonit působí z jedné strany teplo a některé z výsledků stupně nasycení jsou nižší než  $95 \%$ .



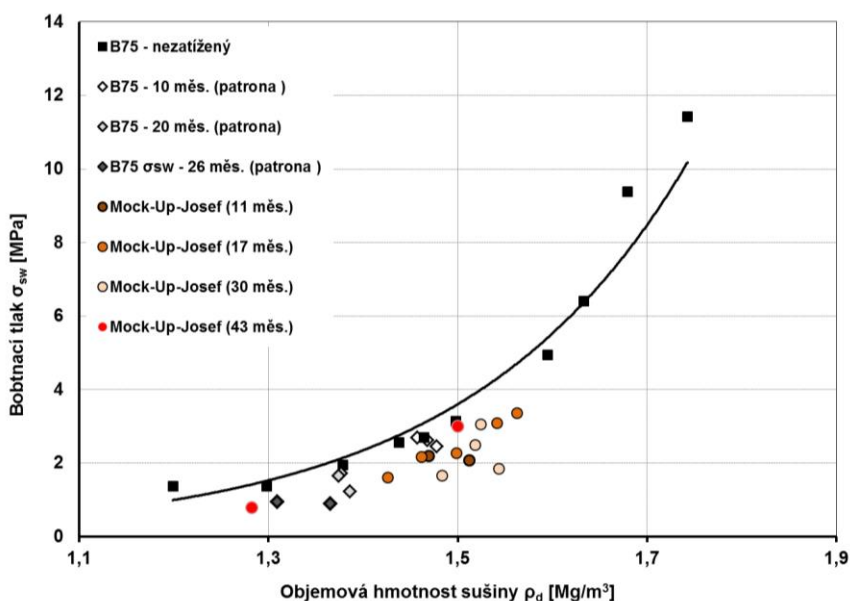
Obr. 70 – Vykreslení hodnot objemové hmotnosti sušiny v závislosti na hloubce vzorku v modelu. Černá barva značí hodnoty a spojnice z prvního odvrtu, červená barva značí hodnoty a spojnice ze druhého odvrtu, zelená barva označuje hodnoty a spojnice ze třetího odvrtu, modrá značí hodnoty a spojnice ze čtvrtého odvrtu a žlutá značí hodnoty a spojnice z pátého odvrtu.



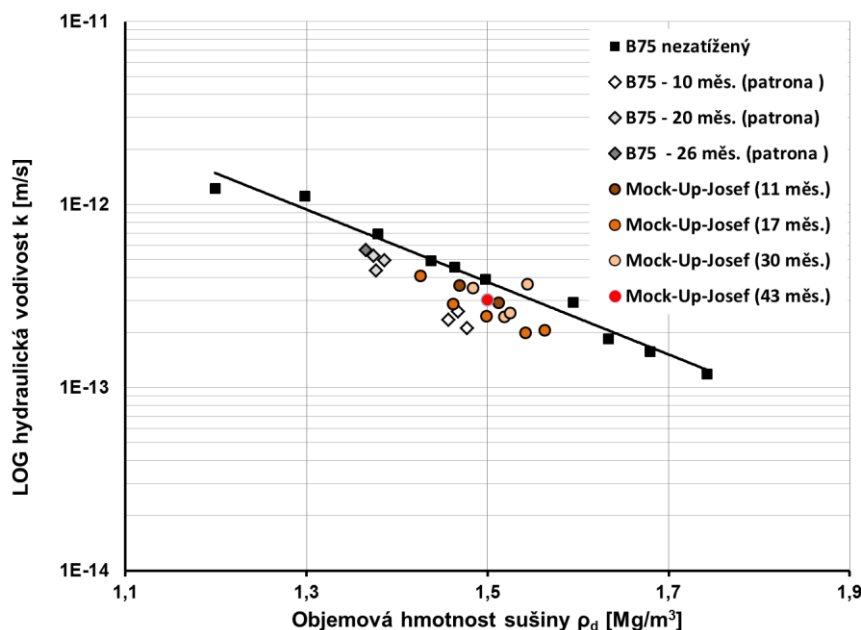
Obr. 71 – Vykreslení hodnot vlhkosti v závislosti na hloubce vzorku v modelu. Černé barva značí hodnoty a spojnice z prvního odvrtu, červená barva značí hodnoty a spojnice ze druhého odvrtu zelená barva označuje hodnoty a spojnice ze třetího odvrtu, modrá značí hodnoty a spojnice ze čtvrtého odvrtu a žlutá značí hodnoty a spojnice z pátého odvrtu.



Obr. 72 – Vykreslení hodnot vypočteného stupně saturace v závislosti na hloubce vzorku v modelu. Černá barva značí hodnoty z prvního odvrtu, červená barva značí hodnoty z druhého odvrtu, zelená barva označuje hodnoty ze třetího odvrtu, modrá barva označuje hodnoty ze čtvrtého odběru a žlutá barva označuje hodnoty z pátého odběru.



Obr. 73 - Porovnání hodnot bobtnacího tlaku materiálu B75: nezatíženého (plně černé čtverečky), zatíženého 10, 20 a 26 měsíců v “patronách” v in-situ podmínkách (kosočtverce v šedých odstínech) a z odvrtů z experimentu MCJ, zatížení teplem a přirozenou saturací (interní materiály Centra experimentální geotechniky – vyhodnocení autor práce a Ing. Lucie Hausmannová v roce 2016)



Obr. 74 - Porovnání hodnot hydraulické vodivosti materiálu B75: nezatíženého (plné černé čtverečky), zatíženého 10, 20 a 26 měsíců v “patronách” v in-situ podmínkách (kosočtverce v šedých odstínech) a z odvrtů z experimentu MCJ- zatížení teplem a přirozenou saturací (interní materiály Centra experimentální geotechniky – vyhodnocení autor práce a Ing. Lucie Hausmannová v roce 2016)

### 5.6.3 Hornina

Pro výpočet tepelné vodivosti v MCJ bylo nutné naměřit tepelnou vodivost horniny (tonalitu). Součinitele tepelné vodivosti byly měřené přístrojem ISOMET 2114. Mechanicko-fyzikální parametry tonalitu jsou uvedeny v Tabulka 8 v kapitole 12.3 (data z projektu Bentonity 95), viz [67] [68]. Kapitola 12.3 také shrnuje výsledky měření termo-fyzikálních vlastností tonalitu z Podzemní laboratoři Josef (průměrná hodnota ze všech měření  $\lambda = 2,76$  W/m/K) a pro změřenou tepelnou vodivost tonalitu byla hledána reference, např. v knize Rock Mechanics - Thermal properties and thermal modelling of the rock in a repository of spent nuclear fuel at Forsmark [69] je pro tonalit uvedena hodnota  $\lambda = 2,73$  W/m/K. V práci provedené měření tedy odpovídá hodnotám, které lze očekávat pro daný typ hornin. Naměřené hodnoty součinitele tepelné vodivosti tonalitu jsou využity při tepelném výpočtu. Z uvedené reference lze také odečíst, že tepelná vodivost tonalitu (2,73) je nižší než žuly (3,47) [69].





Obr. 75 – Obrázek z měření tepelné vodivosti tonalitu pro výpočty provedené v této práci

#### 5.6.4 Závěry analýzy fyzikálního modelu MCJ

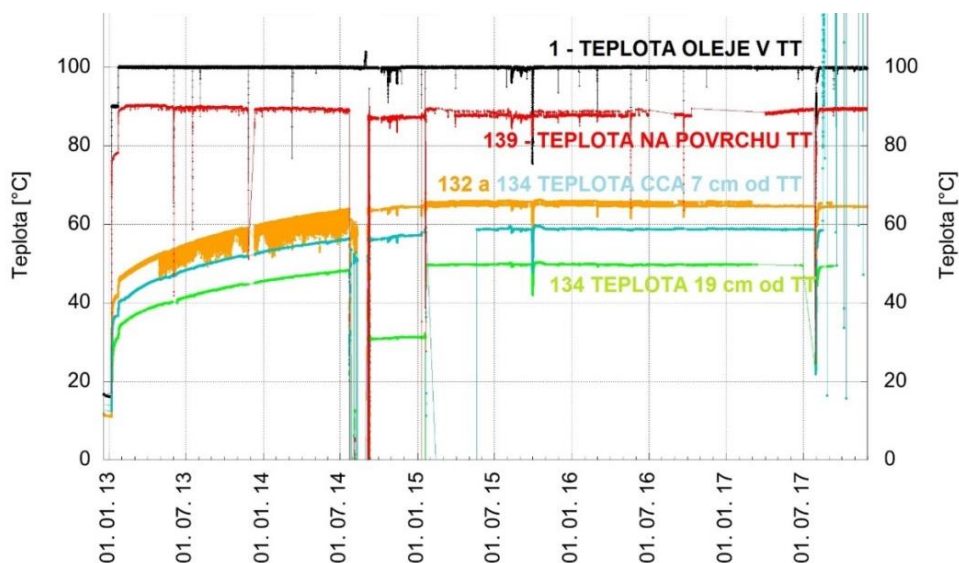
Provedená analýza prokázala:

1. Vliv technologických spár na vlastnosti bentonitové vrstvy – podle výsledků z odběrů bentonitu je zřejmé, že došlo ke snížení objemové hmotnosti sušiny bentonitu oproti vstupní objemové hmotnosti lisovaných bentonitových cihel ( $1,75 \text{ g/cm}^3$ ), a to zřejmě z důvodů bobtnání bentonitu do volných spár v experimentu.
2. Veškeré data z teploměrů jsou velice cenná, protože lze například nasimulovat průběh teploty během saturace, po saturaci bentonitu a podle dat je patrný průběh teploty v různých částech bentonitové vrstvy. Např. z grafu na Obr. 76 je zřejmé rozdělení teplot v horizontálním směru v čase v různých vzdálenostech od topného tělesa.
3. Z průběhů naměřených tlaků a teplot je zřejmé, že dochází k postupnému ustálení měřených dat. (po 48 měsících provozování experimentu) Souhrnně lze říci, že měřený tlak nepřesahuje hodnotu 1 MPa. Na základě výsledků

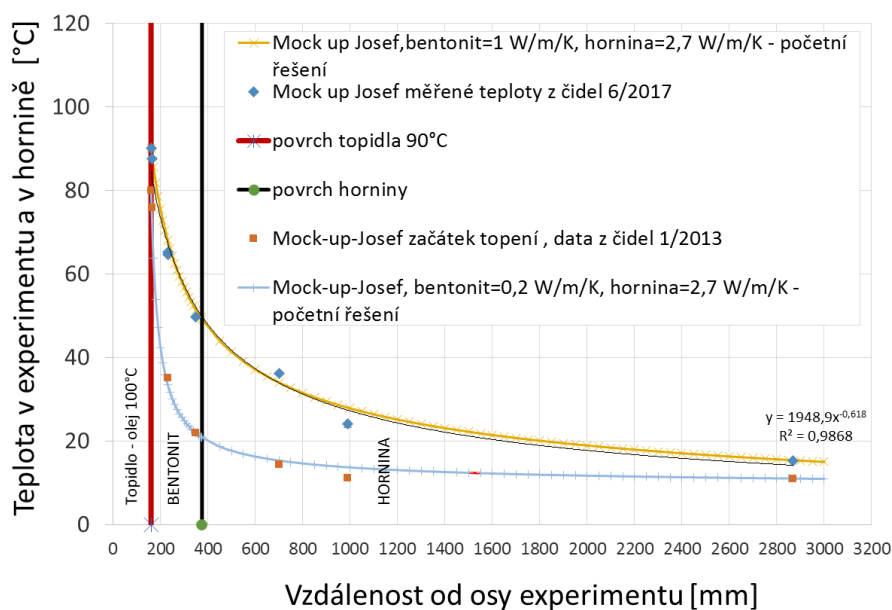


laboratorních zkoušek by se měřený tlak měl pohybovat spíše okolo 2 MPa při průměrné objemové hmotnosti sušiny z odběrů  $1,5 \text{ g/cm}^3$ . Tlak v experimentu oproti tlaku naměřenému v laboratoři ovlivňuje několik faktorů. Jedná se o zatížení teplotou, rozložení vlhkosti v bentonitu, nerovnoměrné rozložení objemové hmotnosti sušiny, nehomogenity v bentonitové bariéře (spáry) a nerovnoměrnost nasycení okolo čidel. Čidla mohou být překážkou pro šíření vlhkosti či homogenizaci bentonitové vrstvy.

4. Byla provedena početní simulace, viz Obr. 77. Po dosažení průměrné tepelné vodivosti  $1 \text{ W/m/K}$  (součinitel tepelné vodivosti), lze přibližně nasimulovat průběh teploty v experimentu. Hodnota součinitele tepelné vodivosti  $1 \text{ W/m/K}$  byla použita na základě zkušeností autora z provedených experimentálních měření a podle předpokládaného nerovnoměrného rozložení vlhkosti a objemových hmotností. Stejná hodnota pro součinitel tepelné vodivosti je používána i v zahraničním výzkumu pro modelování průběhů teplot v hlubinném úložišti, např. [70]. Provedená zjednodušená simulace téměř kopíruje skutečný průběh teploty v experimentu. Pro tonalit (hornina obklopující experiment) byl do výpočtu dosazen součinitel tepelné vodivosti  $\lambda = 2,7 \text{ W/m/K}$  (experimentálně změřeno podle norem [56]; [57], viz kapitola 5.6.3).



Obr. 76 – Grafické znázornění teploty v čase z různých čidel umístěných zhruba v polovině výšky experimentu po 56 měsících (TT – topné těleso). Z teplotních dat je zřejmé, že k ustálení hodnot teploty došlo začátkem roku 2015. Data z různě umístěných teploměrů byla podkladem i pro početní simulaci.



Obr. 77 – Vykreslení teploty při začátku tepelného zatěžování bentonitu, po 54 měsících zatěžování a ukázka jednoduchého početního řešení s průměrným součinitelem tepelné vodivosti bentonitu  $\lambda = 1$  (W/m/K) a součinitelem tepelné vodivosti pro granitické horniny (tonalit  $\lambda = 2,7$  (W/m/K).

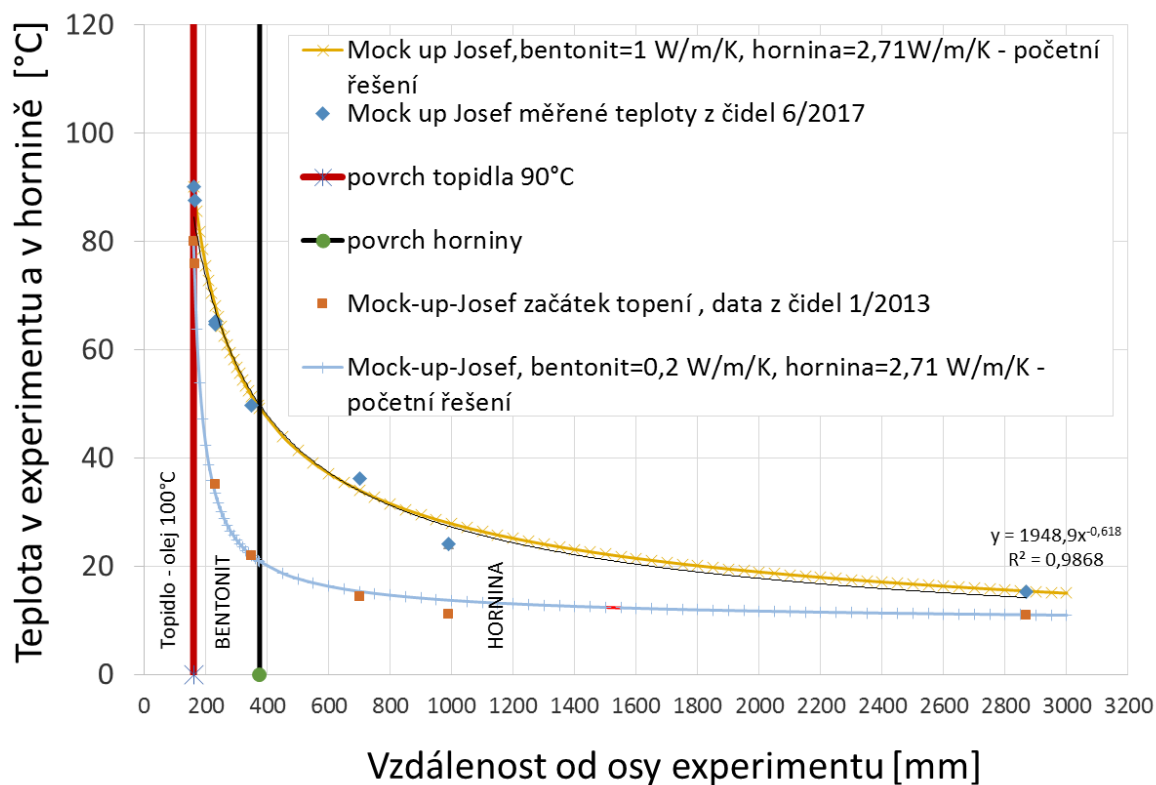


### 5.6.5 Porovnání výsledků z MCJ a s finským fyzikálním modelováním

Na základě výsledků z projektu Prototype repository project byl dle provedených analýz stanoven efektivní součinitel teplené vodivosti  $\lambda = 1$  (W/m/K). Stejný součinitel teplené vodivosti odpovídá součiniteli dosaženého do teplotního výpočtu k experimentu MCJ. MCJ je podle výsledků z posledních odběrů přibližně uprostřed bentonitové bariéry téměř saturován ( $S_r=95\%$ , změna saturace v čase je poměrně nízká). Směrem od topidla k hornině bude již bentonit také saturován, ale směrem k topným tělesu se bude zřejmě saturace bentonitu snižovat.

I když nejsou přesně známy výsledky stupně saturace a objemové hmotnosti bentonitu v experimentu MCJ (může potvrdit pouze rozebrání experimentu), lze výsledky z finského výzkumu potvrdit, tj. pro částečně saturovanou bentonitovou bariéru je možné předpokládat efektivní (průměrný) součinitel tepelné vodivosti okolo  $\lambda = 1$  (W/m/K).

V experimentu MCJ bylo provedeno pouze částečné zaplnění spáry mezi horninou a bentonitem - křemičitým pískem, protože experiment je uložen v ukládací studni decentralizovaně (mimo osu studny) a ne zcela svisle. Decentralizované uložení způsobilo pouze částečné zaplnění (pouze v některých místech), dle kvalifikovaného odhadu byla spára zaplněná z 10 %. Nezaplnění spáry zřejmě způsobilo poměrně nízký přenos tepla. Z dat z experimentu (měsíc po zapnutí experimentu) lze dopočítat efektivní součinitel tepelné vodivosti. Na Obr. 78 je graficky znázorněna početní simulace pro součinitel tepelné vodivosti 0,2 W/m/K, tzn. pětikrát menší součinitel, než lze předpokládat po částečné saturaci bentonitové vrstvy. Tento poznatek by mohl být významný pro návrhy úložiště, pro jehož dimenzování (vzdálenosti ÚOS) je odvod tepla velice důležitý.



Obr. 78 – V grafu jsou znázorněné data z teplotních čidel umístěných v experimentu a početní simulace pro začátek experimentu (1/2013, výpočet proveden podle hodnot z čidel) a po částečné saturaci bentonitové vrstvy (6/2017), do výpočtu dosazen průměrný součinitel tepelné vodivosti  $\lambda = 1$  (W/m/K).

Předchozí simulace vyjádřené graficky v grafech Obr. 77 a Obr. 78 byly odvozeny na základě Fourierova zákona:

$$q = -\lambda \Delta T \quad \text{Rovnice 38}$$

Protože MCJ je válcový experiment, budeme uvažovat o působení tepla na válcovou stěnu. Válcová stěna je vystavena tepelnému působení danému okrajovými podmínkami. Vyšší teplota je na vnitřním povrchu. Tepelný tok válcovou stěnou je podle Fourierova zákona

$$q = -\lambda \frac{dt}{dr} 2\pi r \quad \text{Rovnice 39}$$

kde:  $r$  poloměr [m]



Řešení zjednodušíme o předpoklad, že  $\lambda = konst.$  Po separaci proměnných a uvedením rozmezí pro integraci upravíme rovnici do tvaru:

$$\int_{t_1}^{t_2} dt = -\frac{q}{2\pi r} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} \quad \text{Rovnice 40}$$

Po integraci:

$$q = \frac{\pi (t_1 - t_2)}{\frac{1}{2\lambda} \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad \text{Rovnice 41}$$

Tepelné toky můžeme vztáhnout na 1 m<sup>2</sup> stěny, tedy pomocí hustoty tepelného toku. Při rovnoměrném tepelném působení můžeme Rovnici 40 upravit na tvar:

$$Q = qS = \frac{\pi (t_1 - t_2)}{\frac{1}{2\lambda} \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad \text{Rovnice 42}$$

A protože platí zachování hustoty tepelného toku, tak také platí:

$$Q = qS = \frac{\pi (t_1 - t_2)}{\frac{1}{2\lambda} \ln \frac{r_2}{r_1}} = \frac{\pi (t_2 - t_3)}{\frac{1}{2\lambda} \ln \frac{r_3}{r_2}} \quad \text{Rovnice 43}$$

Po úpravě lze vyjádřit jako rovnici pro  $t_2$ :

$$t_2 = \frac{t_3 \lambda_2 \ln \frac{r_2}{r_1} + t_1 \lambda_1 \ln \frac{r_3}{r_2}}{\lambda_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \lambda_2 \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad \text{Rovnice 44}$$

kde ve výpočtech v grafech na Obr. 78 a Obr. 77. jsou dosazeny tyto hodnoty:

$t_2$  – hledaná teplota pro početní simulaci

$t_3$  – teplota v hornině zhruba 3 m od středu experimentu, po spuštění experimentu  $t_3 = 11^\circ\text{C}$ ; 6/2017  $t_3 = 15^\circ\text{C}$

$t_1$  – teplota na povrchu topného tělesa; po spuštění experimentu  $t_1 = 80^\circ\text{C}$ ; 6/2017  $t_1 = 90^\circ\text{C}$

$\lambda_1$  – součinitel tepelné vodivosti pro celou bentonitovou vrstvu, před částečným nasycením 0,2 W/m/K a po nasycení 1 W/m/K

$\lambda_3$  – součinitel tepelné vodivosti pro horninu tonalit, tj. 2,7 W/m/K

$r_1$  – poloměr vzdálenosti od osy topného tělesa k začátku bentonitových bloků, 17 cm

$r_2$  – poloměr vzdálenosti od osy topného tělesa k hornině (hrana ukládací studny), 37,5 cm



$r_3$  – poloměr vzdálenosti od osy topného tělesa k poslednímu měřicímu čidlu teploty (3 m), které měří tedy  $t_3$

### 5.6.6 Ověření výsledků a předpokladů z experimentu

Ve finském výzkumu byl také uveden vzorec pro výpočet efektivní tepelné vodivosti:

$$\lambda_{b(\text{eff})} = \frac{\lambda_{\text{pelety}} \cdot \lambda_{\text{bloky}} \cdot \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}{\lambda_{\text{pelety}} \cdot \ln\left(\frac{R_{bp}}{R_1}\right) + \lambda_{\text{bloky}} \cdot \ln\left(\frac{R_2}{R_{bp}}\right)} \quad \text{Rovnice 45}$$

kde:

$\lambda_{b(\text{eff})}$  – efektivní součinitel tepelné vodivosti pro bentonitové bloky s peletami, W/m/K

$\lambda_{\text{pelety}}$  – součinitel tepelné vodivosti pro pelety, W/m/K

$\lambda_{\text{bloky}}$  – součinitel tepelné vodivosti pro bloky, W/m/K

$R_1$  – poloměr vzdálenosti od osy uložení ÚOS k začátku bentonitových bloků, m

$R_2$  – poloměr vzdálenosti od osy uložení ÚOS k hornině (hrana ukládací studny), m

$R_{bp}$  – je poloměr vzdálenosti od středu ÚOS na rozhraní bentonitových bloků a pelet, m

Pokud dosadíme do Rovnice 45 hodnoty z finského výzkumu a hodnoty z experimentu MCJ, pak pro experiment MCJ vychází dopočítané hodnoty součinitele tepelné vodivosti stejné jako dosazené do provedených početních simulací v grafech Obr. 77 a Obr. 78. Pro početní simulace v experimentu byly postupně dosazovány součinitele  $\lambda$  tak, aby výpočet teploty odpovídal výsledkům měření teploty z čidel. Pro začátek provozování experimentu MCJ byla za součinitel tepelné vodivosti spáry dosazena hodnota 0,026, což je součinitel tepelné vodivosti pro vzduch.



Tabulka 6 – Shrnutí výpočtů průměrného součinitele tepelné vodivosti pro finské řešení a pro experiment MCJ.

	Finský výzkum (spára pelety)	Finský výzkum (spára vzduch)	MCJ (začátek experimentu, vzduchová spára)
$\lambda_{\text{spáry}}$	0,4	0,026	0,026
$\lambda_{\text{bloky}}$	1,29	1,29	0,5
$R_1$	0,535	0,535	0,17
$R_2$	0,875	0,875	0,375
$R_{\text{bp}}$	0,83	0,83	0,35
$\lambda_{\text{b(eff)}}$ (výsledek výpočtu)	<b>1,02</b>	<b>0,19</b>	<b>0,19</b>

## 5.7 Definování parametrů bentonitové vrstvy z pelet na základě získaných poznatků a stanovení vlivu technologické spáry

Finský referenční projekt svislého uložení ÚOS uvažuje rozměry technologické spáry mezi bloky a horninou 50 mm s nepřesností  $\pm 25$  mm při decentralizovaném uložení ÚOS. Při výpočtech je uvažován efektivní součinitel tepelné vodivosti pelet 0,4 W/m/K. V této práci bylo prokázáno, že i v českých podmínkách a s českým materiálem lze najít řešení, které je srovnatelné s aktuálními výsledky ze zahraničního vývoje a výzkumu.

Pro závěrečné práce byly vybrány bentonitové pelety (drť) REC MIX I. Tento materiál má zrnitost blízkou k ideální zrnitosti podle Fullera podobně jako vyvinutá směs pro švýcarské HÚ (Granulated bentonite mixture). Tato švýcarská směs byla zvolena pro výzkum jako referenční, a to hlavně proto, že se jedná o materiál vyrobený v průmyslovém měřítku a o materiál s výbornými aplikačními vlastnostmi. Obě





porovnávané směsi mají i podobné termofyzikální vlastnosti. To bylo prokázáno v této práci, viz kapitola 5.5.5.

V práci byly stanoveny parametry vrstvy z pelet (REC MIX I), které lze využít pro zpřesnění návrhů HÚ. Podle dostupných informací dosud nebylo v ČR počítáno s tím, že by bylo potřebné řešit spáru mezi bentonitovými bloky a horninou. V Tabulka 7 jsou uvedeny vlastnosti vybraného materiálu. Tyto vlastnosti jsou využitelné pro matematické simulování procesů v HÚ, např. pro tepelné dimenzování, které určuje vzdálenosti mezi ÚOS.

Tabulka 7 – Vlastnosti bentonitové spáry z pelet při použití materiálu REC MIX I.

Vlastnosti zaplnění bentonitové spáry	Při technologii volného sypání	Při technologii volného sypání a částečného setřesení
Objemová hmotnost; g/cm <sup>3</sup>	1,43	1,5
Objemová hmotnost sušiny; g/cm <sup>3</sup>	1,31	1,38
Vlhkost %	9	9
Stupeň saturace	0,21	0,48
<b>Součinitel tepelné vodivosti; W/m/K</b>	<b>0,27</b>	<b>0,4</b>
<b>Objemová tepelná kapacita; J/m<sup>3</sup>/K.10<sup>6</sup></b>	<b>1,47</b>	<b>1,52</b>
Efektivní objemová hmotnost montmorillonitu; g/cm <sup>3</sup>	1,11	1,18

Výpočet provedený v kapitole 5.6.6 poukázal na to, že vliv nezaplňené spáry může být zásadní pro odvod tepla, protože v případě nezaplňení spáry je efektivní součinitel tepelné vodivosti pro celou bentonitovou vrstvu mnohem nižší.



## 6 SHRUTÍ, DISKUSE A DOPORUČENÍ PRO DALŠÍ PRÁCE

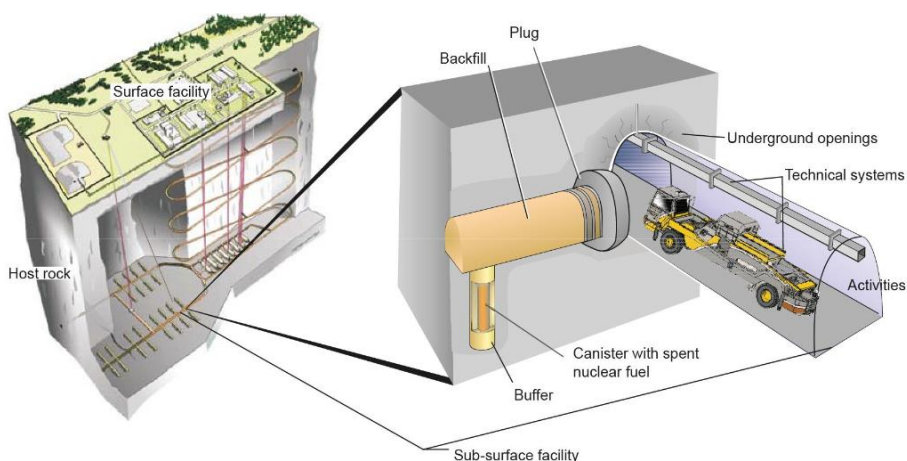
Cílem této kapitoly je zhodnotit důležité poznatky, navrhnout pokračování výzkumu a upozornit na případné nedostatky.

### 6.1 Výběr materiálu, výroba a využití pelet

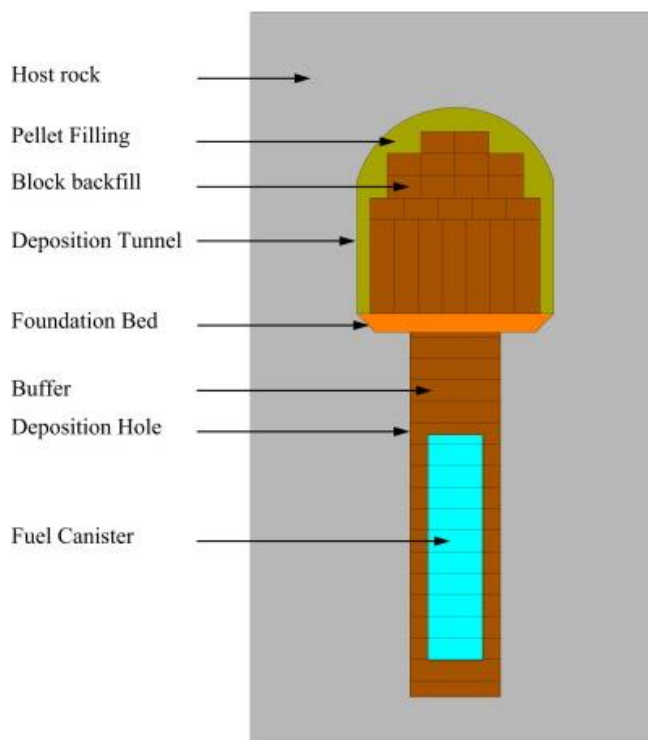
Pro výzkum byl vybrán jako základní materiál Bentonit 75. Tento bentonit je do jednoho hmotnostního procenta aktivován uhličitanem sodným. Pro HÚ bude nejspíše zvolený neaktivovaný bentonit. Další výzkum by se mohl týkat použití neaktivovaného bentonitu. Autor předpokládá, že neaktivovaný bentonit bude mít stejné termofyzikální vlastnosti a bude možné se přiblížit zrnitostí peletizovaného materiálu k Fullerově křivce.

Všechny zkoušené peletizované materiály (REC, B75 PEL 12, REC MIX) by mohly být využitelné konstrukci HÚ. V této práci odzkoušené pelety B 75 PEL 12 byly využity pro výstavbu těsnící vrstvy v projektu EPSP (DOPAS, FP7 323273) realizovaném v Podzemní laboratoři Josef [60]). V rámci projektu DOPAS, byly vystavěny další tři experimentální zátky – ve Francii, Švédsku a Finsku. U francouzského experimentu FSS [34] byly také použity bentonitové pelety, které byly vyrobené z amerického sodného bentonitu z Wyomingu. Ve švédském experimentu DOMPLU (Dome Plug) byly použity pro těsnící část bentonitové bloky a pelety, které byly vyrobeny také z amerického sodného bentonitu z Wyomingu [71]. Ve finském experimentu POPLU (Posiva plug) [71] nebyly pelety použity. U finského experimentu byl použit pouze bentonitový pásek na utěsnění konstrukční spáry mezi betonovou zátkou a horninou.

Na Obr. 79 je vyobrazeno využití těsnící zátky (Plug) ve švédském systému KBS pro ukládání ÚOS. Pelety také mohou být použité pro backfill, např. ve Finsku se předpokládá využití bentonitových bloků a pelet. Pelety se využijí pro zaplnění spáry mezi stěnou tunelu a bentonitovými bloky, viz Obr. 80.



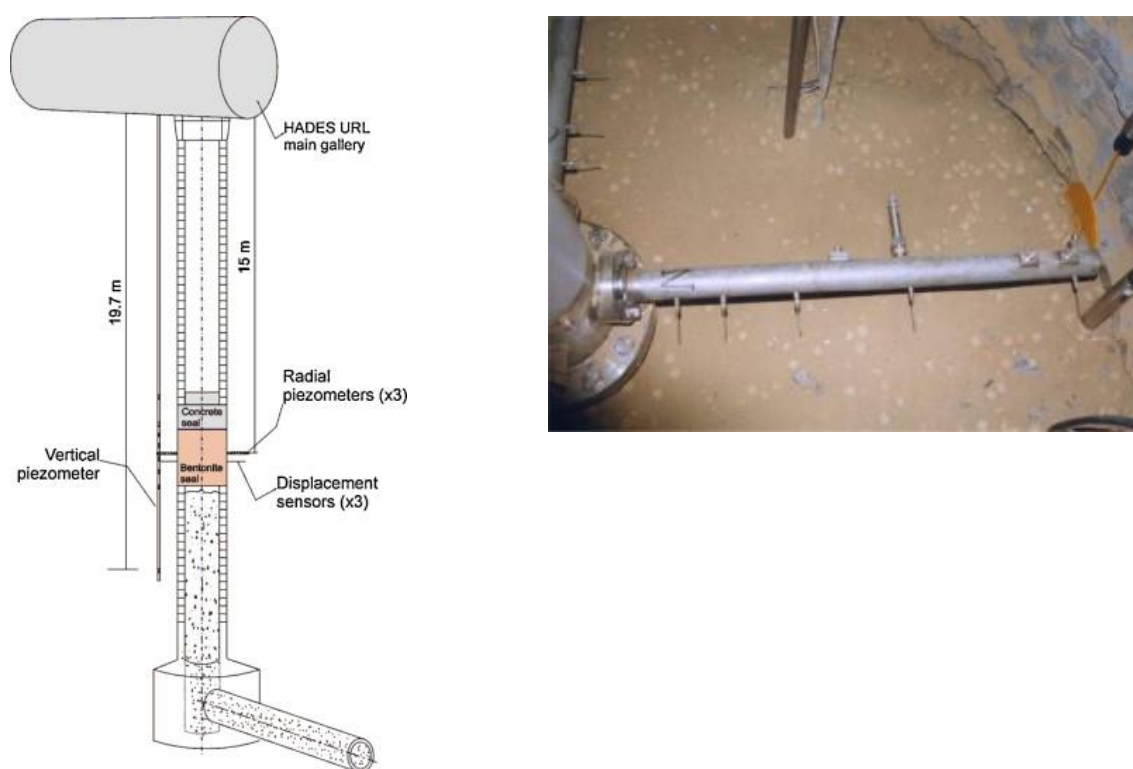
Obr. 79 – Schématické zobrazení místa umístění těsnicí zátky (plug) pro uzavření zaplněných prostor s uloženými ÚOS (švédský vertikální systém uložení ÚOS (Canister with spent nuclear fuel); backfill a buffer je označení bentonitové vrstvy) [71] pro zátky i backfill je možné použít pelety zkoušené v této zprávě.



Obr. 80 – Schématický svislý řez ukládacím vrtem (deposition hole) s vyznačením bentonitových bloků pro backfill (Block backfill) a možným využitím bentonitových pelet pro zaplnění spáry mezi bloky a stěnou ukládacího tunelu (Pellet filling) [72].

Bentonitové pelety, drtě a směsi mohou být velice důležité pro zaplnění technologické spáry mezi bentonitovými bloky a horninou při svislém uložení ÚOS, což bylo prokázáno v této práci. Ale může být také výhodné pro české horninové podmínky modifikovat švýcarský systém zaplnění úložného tunelu bentonitovými peletami, který může výrazně zjednodušit výstavbu bufferu. Švýcarský systém je popsán v kapitole 2.5.4.

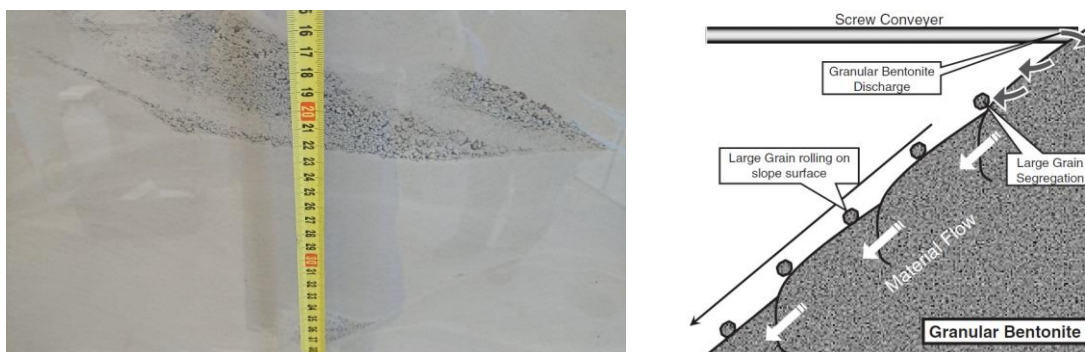
Dalším využitím pelet může být zaplnění šachet či komínů, jak např. bylo zkoušeno v belgickém experimentu (Shaft Sealing Test). V tomto experimentu byla použita bentonitová směs složená z 50 % pelet a z 50 % práškového bentonitu. Schéma experimentu Shaft Sealing Test je na Obr. 81 [73]. Využití pelet pro těsnění svislých zátek může být technologicky ještě výhodnější, než u zátek orientovaných vodorovně.



Obr. 81 – Schéma experimentu zaplnění šachty v podzemní laboratoři HADES v MOL (Belgie) a vpravo obrázek zkoušené bentonitové směsi (50 % pelet a 50 % prášku) [73].

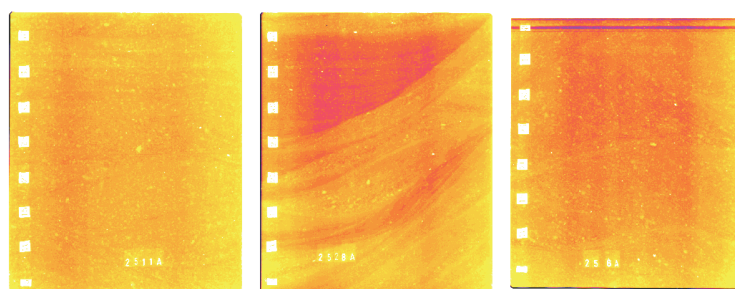
## 6.2 Zkoušky spár

V práci byly provedeny závěrečné testy zaplnění spáry v měřítku blízcím se velikosti reálné spáry. Při závěrečném testování byly realizovány tři velké testy zaplnění spáry o tloušťce 50 mm. Dva testy byly provedeny s REC MIX I a jeden s referenčním materiálem GBM. Při dalším případném výzkumu bude nutné provést více podobných zkoušek a bude vhodné se zaměřit i např. na segregaci bentonitových zrn a jejich rozložení v bentonitové vrstvě. Při plnění modelu spáry bylo odzkoušeno, že pokud se materiál sype do jednoho místa, tak dochází k mnohem větší segregaci (viz Obr. 82), než když je s nádobou pohybováno do stran. Tímto způsobem bylo segregaci zabráněno. V dalších výzkumných pracích je přesto nutné odzkoušet rentgenový přístroj pro určení rozložení zrnitosti a určení případných oblastí nehomogenit. Stejným způsobem byla sledována bentonitová zrna i ve finském výzkumu, viz Obr. 83 .



Obr. 82 – Vlevo je foto po zaplnění modelu spáry 50 mm zkoušené v této práci. Na fotce je zřejmá segregace větších bentonitových zrn vlivem sypání materiálu na jedno místo. Vpravo je obrázek z japonského výzkumu. Obrázek znázorňuje segregaci větších bentonitových zrn (Large grain segregation), které se spíše gravitačně přemísťují než menší zrna.

Důležité může být také sledování interakcí mezi bentonitovými bloky a materiálem spáry.

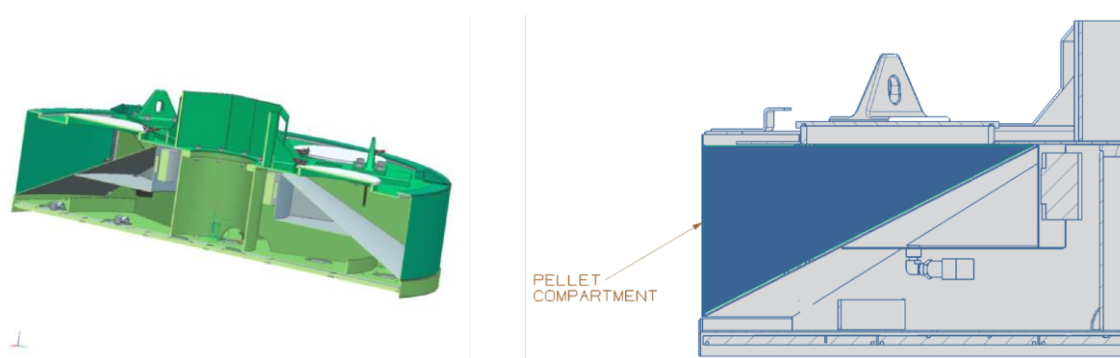


Obr. 83 – Rentgenový snímek zaplnění spáry z finského výzkumu [8] pro různé způsoby zaplnění spáry (vlevo zaplnění volným sypáním se zhutněním, vprostřed je obrázek zaplnění metodou stříkaného jílu a vpravo pouze metodou volného sypání).

### 6.3 Plnění technologických spár v HÚ

Ze získaných zkušeností lze říci, že s největší pravděpodobností lze vyvinout pro HÚ strojové vybavení, které by umožnilo bezproblémovou aplikaci materiálu REC MIX I do technologické spáry, a to nejen volným sypáním, ale také s dodatečným dohutněním bentonitu.

Ve Finsku již byly provedené první návrhy techniky pro umístění pelet do spáry. Navržené technické řešení by mělo být využitelné pro umístění bentonitových bloků i pro následné zaplnění technologické spáry mezi blokem a horninou, viz Obr. 84. Finské řešení neumožňuje vibrování, které by umožnilo dohutnění pelet ve spáře.



Obr. 84 – 3D model přenašeče pro umístění bentonitových bloků v úložném vrtu vlevo a vpravo řez přenašečem s vyznačením místa (Pellet compartment) pro bentonitové pelety, které budou volně vsypány do spáry mezi bentonitovým blokem a horninou [3].



## 6.4 Stanovení termofyzikálních vlastností zkoušených materiálů

V rámci zkoušek navržených druhů pelet byla získána data o termofyzikálních vlastnostech. Bylo provedeno několik stovek měření přístrojem ISOMET nejen pro různé materiály, ale také pro různé zhutnění a u některých materiálů i pro různé vlhkosti. V práci byl jako vyhovující materiál vybrán REC MIX I, který má vlhkost po výrobě 6,5% a po skladování měl vlhkost 9%. S materiálem s 9% vlhkostí byly provedeny závěrečné testy spáry. Na začátku práce byly nalezeny početní vztahy, které určují tepelnou vodivost početně např. podle objemových hmotností, obsahu křemene v bentonitu, vlhkosti atd. Podobným naměřeným experimentálním datům je řešení součinitele tepelné vodivosti podle Tang a Cui (viz kapitola 2.4.2.2.4), viz graf na Obr. 60. Práce těchto autorů, i když z jiného roku, je zmíněná i v referenci zaslané z NAGRY. Finská práce [19] ale nejvhodnější výpočet pro bentonitové pelety označila početní řešení Beziatovu metodu (viz kapitola 2.4.2.2.7). Tato metoda byla zvolena pro porovnání naměřených dat i v této práci a výsledky podle Beziatovi metody se blíží práci Tang a Cui, ale spíše při nižších objemových hmotnostech pro zvolenou srovnávací vlhkost (6,5%), viz graf na Obr. 60.

V průběhu životního cyklu HÚ bude docházet ke změnám vlhkosti bentonitu. V případě bufferu lze říci, i na základě výsledků z fyzikálních modelů, že nejdříve dojde k redistribuci vlhkosti směrem od ÚOS a pak postupné resaturaci s tím, jak bude klesat tepelný výkon ÚOS. Tzn., že je nutné mít více informací o termofyzikálních vlastnostech bentonitu, a to hlavně vzhledem k měnícímu se stupni saturace. V dalších pracích je nutné doplnit termofyzikální měření o další měření, které bude zaměřené na různé stupně saturace, tzn. různé vlhkosti a různé objemové hmotnosti sušiny.



## 6.5 Výsledky z fyzikálních modelů a zaplnění technologické spáry

Zaplnění spáry výrazně zlepšuje důležité parametry bentonitové vrstvy. Analýza experimentu MCJ a výsledků z finského výzkumu prokázala, že nezaplnění spáry má nezanedbatelný vliv na odvod tepla. Zaplnění a nezaplnění spáry může mít vliv pro odvod tepla v řádech desítek procent. Také se zlepšují i další vlastnosti bentonitové vrstvy, např. bobtnací tlak, který je velice důležitý pro eliminaci mikrobiologické aktivity. Tyto závěry sice potvrzují výsledky z fyzikálních modelů a ze zahraničních prací, ale bylo by vhodné realizovat fyzikální model přesně podle poznatků získaných v této práci a podle parametrů předpokládaných referenčním projektem HÚ či podle aktualizovaných informací, např. výkon uložených ÚOS, rozměry ukládacích vrtů pro ÚOS atd. Tyto modely by mohly poskytnout velice cenná data pro souhrnné THMC matematické modely, které jsou jediným nástrojem jak nasimulovat podmínky v HÚ v potřebném časovém horizontu (statisíce let).

První tepelné výpočty, které nyní probíhají, ale mohou využít výsledky získané v této práci a ze zahraničních zkušeností, tzn., že při zaplnění spáry a po částečném nasycení bentonitu bude efektivní tepelná vodivost rovna  $1 \text{ W/m/K}$ . Tato hodnota je dostačující pro první výpočty, ale měla by být postupně aktualizována např. podle toho, jak se budou upřesňovat požadavky na buffer a jeho rozměry, bobtnací schopnost, hydraulickou vodivost a apod.

V práci byly také stanoveny mechanicko-fyzikální parametry zaplnění spáry z vybraných pelet (REC MIX I). V Tabulka 7 na straně 112 jsou tyto vlastnosti shrnuté. Autor práce se domnívá, že výsledky výzkumu jsou využitelné pro matematické simulování procesů v HÚ. Výsledky této práce jsou srovnatelné s finským výzkumem, který je v problematice zaplnění spár nejdále.





## 7 ZÁVĚRY

Hlavní cílem práce byl návrh a experimentální testování zaplnění technologických spár a to mezi horninou a bentonitovou vrstvou při svislém ukládání vyhořelého jaderného paliva v hlubinném úložišti. Cíl byl zvolen na základě zkušeností z fyzikálního modelování a výsledky z fyzikálního modelování jsou v práci použity k ověření některých poznatků.

Prvním krokem byla provedená rešerše, která potvrdila vysokou aktuálnost zvolené problematiky. Nejvíce je řešena tato problematika ve Finsku, je vysoce aktuální a podle dostupných informací nebyla doposud odzkoušena pro české bentonity. Finské práce mj. uvádějí, že zvolené řešení zaplnění technologické spáry bentonitovými peletami vykazuje nejlepší výsledky oproti jiným možným způsobům (nezaplnění spáry, zaplavení spáry vodou či bentonitovou suspenzí, zaplnění spáry pískem anebo šterkem).

Jako základní materiál byl vybrán průmyslově dodávaný Bentonit 95, a to z toho důvodu, že jsou známy některé vlastnosti tohoto bentonitu a Bentonit 95 byl dříve odzkoušený a také byl použit i v experimentu Mock-up Josef, který je prvním českým in-situ projektem. Autor práce se podílel na návrhu, výstavbě, provozování a vyhodnocování experimentu Mock-up Josef. Částečné vyhodnocení experimentu Mock-up Josef bylo provedeno i v této práci - tepelné chování bentonitové vrstvy v experimentu a vliv technologické spáry na přenos tepla. Důležité bylo provedení unikátních odběrů ze zatížené bentonitové vrstvy v různých časových intervalech. Odběry prokázaly vliv technologických spár na fyzikální vlastnosti (např. na snížení objemové hmotnosti).

Po výběru základního materiálu Bentonitu 95 byly ve spolupráci s průmyslovými partnery vybrány dvě technologie pro výrobu pelet. Obě technologie byly postupně optimalizovány a z obou technologií byly získány bentonitové pelety, o kterých se dá říci, že je možné je vyrobit v průmyslovém měřítku. Právě průmyslové měřítko pro výrobu a i pro technologie je jedním z dílčích cílů této práce.



Jako referenční materiál byl zvolen švýcarský materiál Granulated bentonite mixture a hlavně vzhledem k tomu, že má výborné zhutnění po volném sypání a jedná se o průmyslově připravený materiál.

Dalším dílčím cílem bylo ověření vlastností vyrobených pelet. Provedené materiálové testování se zaměřilo na popis vlastností souvisejících s tématem této práce, a to hlavně na termofyzikální vlastnosti a zhutnění po aplikaci pelet. Získané hodnoty termofyzikálních vlastností (hlavně tepelná vodivost) byly porovnávány nejenom s vlastnostmi referenčního materiálu, ale také s výsledky existujících početních modelů pro bentonity. V práci byl vybrán početní model, který nejvíce odpovídal naměřeným datům pro vybraný a referenční materiál. Termofyzikální měření provedená pro vyšší stupně saturace odpovídá referenci zaslané pro Granulated bentonite mixture ze švýcarské NAGRY. Zvolený způsob měření termofyzikálních vlastností přístrojem ISOMET 2114 lze tedy označit s největší pravděpodobností za správný, ale, jak autor upozorňuje v diskusi, na výsledky práce je nutné navázat rozsáhlejšími termofyzikálními měřeními např. pro různé stupně saturace. Další měření by také potvrdila či vyvrátila závěry ohledně vybraného početního řešení (Tang a Cui z roku 2006).

Po materiálových testech pelet byl, na základě jejich výsledků a na základě aplikačních testů do menšího modelu spáry, vybrán materiál pro závěrečné testování v modelu odpovídajícímu rozměrům předpokládané technologické spáry mezi bloky a horninou při svislém umístění úložného obalového souboru. Z technologických zkoušek byla pro závěrečné testování vybrána technologie volného sypání a výsledky testů prokázaly, že v práci definované řešení je srovnatelné s aktuálně probíhajícím finským výzkumem.

Vybraný materiál REC MIX I má stejně dobré vlastnosti po aplikaci jako zahraniční referenční materiál, a to vzhledem k tomu, že i REC MIX I má zrnitost blízkou tzv. optimální zrnitosti, kterou např. definuje Fullerův výpočet.

Fyzikální modelování provedené v rámci experimentu Mock-up-Josef přineslo nejenom zkušenosti vedoucí ke zvolení tématu práce, ale také byly na základě dat z fyzikálního modelu určeny efektivní součinitele tepelné vodivosti, které je možné použít pro tepelné dimenzování hlubinného úložiště. Výsledky z fyzikálního modelování experimentu



Mock-up-Josef také byly porovnány s obdobným zahraničním projektem Prototype Repository Project.

Závěrem práce lze tedy konstatovat, že hlavní cíl práce byl splněn a pro český bentonit byl nalezený způsob průmyslové peletizace a způsob aplikace pelet do spáry. Dosažené výsledky jsou srovnatelné s obdobným zahraničním výzkumem. Řešení a výsledky práce přinesly důležité poznatky např. pro tepelné výpočty hlubinného úložiště. Výsledky práce by mohly být také využity i v dalších oborech, např. pro těsnění vrtů pro čerpání geotermální energie. Výsledky práce již byly využity při výstavbě funkčního modelu zátky (EPSP experiment) pro uzavírání ukládacích tunelů v hlubinném úložišti. Dalším předpokládaným využitím výstupů práce je dynamicky hutněná bentonitová vrstva, která by mohla nahradit bentonitové bloky při výstavbě bufferu.

.



## 8 SYMBOLY

$\lambda$  - Součinitel tepelné vodivosti [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ ;  $\text{W}/\text{m}/\text{K}$ ]

$\rho$  - objemová hmotnost [ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ]

$\rho_d$  - objemová hmotnost sušiny [ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ]

$\rho_s$  - specifická objemová hmotnost [ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ]

$\rho_w$  - objemová hmotnost vody [ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ]

$\sigma_{sw}$  - bobtnací tlak [MPa]

$a$  - tepelná difusivita [ $\text{m}^2\text{ s}^{-1}$ ]

$c$  - tepelná kapacita [ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ]

$c_p$  - měrná objemová tepelná kapacita [ $\text{J}\cdot\text{m}^{-3}\text{K}^{-1}$ ]

$m$  - hmotnost vzorku [kg]

$m_d$  - hmotnost suchého vzorku [kg]

$m_w$  - hmotnost vody ve vzorku [kg]

$n$  - pórovitost [ $\text{m}^3\text{ m}^{-3}$ ]

$S_r$  - stupeň nasycení [ $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ ]

$T$  - teplota [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$V$  - objem vzorku [ $\text{m}^3$ ]

$V_s$  - objem pevné fáze vzorku [ $\text{m}^3$ ]

$w$  - vlhkost [%]

$w_{sat}$  - vlhkost při plné saturaci [%]

EMDD - Efektivní objemová hmotnost montmorillonitu [ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ]



## 9 ZKRATKY A VYMEZENÍ NĚKTERÝCH POJMŮ

B75 – Bentonit 75 – průmyslově dodávaný bentonit firmou Keramost a.s.

B75 PEL 12 – Bentonitové pelety z ČLUZ a.s. zhutněné protlačováním skrz matrici

HÚ - Hlubinné úložiště

GBM - Granulated Bentonite Mixture švýcarská směs pelet připravená německou soukromou společností pro NAGRU

MCJ – První český in-situ model úložného místa s ÚOS (Mock-up-Josef experiment) realizovaný v Podzemní laboratoři Josef

NAGRA – švýcarská státní organizace odpovědná za ukládání VJP

VJP - Vyhořelé jaderné palivo

REC – Drť z bentonitových pelet z Keramostu a.s., lisované metodou mezi válci

Buffer - materiál, který je použitý jako bariéra umístěná okolo ÚOS s odpadem, pro omezení průniku podzemní vody k ÚOS a pro omezení potenciální migrace radionuklidů z ÚOS sorpcí materiálu bufferu [74]

Backfill – materiál použitý pro vyplnění tunelů v úložišti po uložení odpadů [74]

Fullerův výpočet – početní vztah, kterým lze najít tzv. plynulou zrnitost sypkých materiálů, tzn., že se jedná o ideální čáru zrnitosti, která řeší zaplnění mezizrných prostorů menšími zrny



## 10 SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr. 1 – Obrázek z prvního úložiště pro vyhořelé jaderné palivo a další vysoceaktivní radioaktivní odpady ve Finsku – Olkiluoto; pohled do rozrážky pro testování technologií pro ukládání; foto autor 2017. .... 10
- Obr. 2 – Švédské systémy KBS - 3V a KBS - 3H pro bezpečné uložení radioaktivních odpadů do horniny v hloubce zhruba 500 m pod zemským povrchem [1]. .... 10
- Obr. 3 – Svislý řez návrhem konstrukčního řešení úložného místa pro ÚOS ve finském konceptu [6] s vyznačením technologických spár včetně rozměrů (10 mm spára mezi bentonitovými bloky a ÚOS (BUFFER CONTAINER GAP); 50 mm spára mezi bentonitovými bloky a horninou (ROCK BUFFER GAP). .... 15
- Obr. 4 – Vlevo obrázek finských testů zaplnění technologické spáry (zkoušky nerovnoměrně široké spáry) a vpravo model testovací komory [16]. .... 17
- Obr. 5 – Předpokládané rozměry a vlastnosti bentonitové vrstvy ve Finsku podle referenčního návrhu pro systém ukládání KBS 3V [6] [16] (disk blocks – plné bloky pod a nad ÚOS, ring blocks bloky okolo ÚOS). .... 18
- Obr. 6 – Tabulka shrnující dosažené výsledky ve Finském výzkumu spáry o šířce 35 mm; důležitá je Average dry density – průměrná objemová hmotnost sušiny [7] (Pellet je označení pro zkušební materiály a za názvem např. Cebogel je uvedené stříkání (spraying); volné sypání (Free fall pouring) anebo volné sypání a strojové setřesení (free fall pouring +vibrator anebo + Proctor hammer)). .... 19
- Obr. 7  $\lambda_{\text{sat}}$  ( $K_{\text{sat}}$ ) a  $\alpha$  parameter pro MX80 [18]. .... 25
- Obr. 8 – Foto bentonitových pelet (briketek) vyrobených lisováním mezi válci s perforací (foto autor). .... 28
- Obr. 9 – Možnosti výroby pelet [23] – uvedená reference popisuje 3 hlavní skupiny pro lisování pelet: a) Compaction Type – pelety lisované 1) Tablet Compression – lisované pomocí forem na jednotlivé pelety 2) Cold Isostatic – lisované stlačeným vzduchem v membráně (gumě) b) Chunk Type – pelety (drtě) vzniklé 1) Roll Press Type - lisováním mezi hladkými válci; 2) Briguette Type - lisováním mezi perforovanými válci; 3) Chunk Type – drcením bentonitových bloků; 4) Disk Die Type – protlačováním bentonitu skrz ocelovou matici s kruhovými otvory a poslední skupinou c) jsou pelety vyrobené sušením bentonitové suspenze (Dehydration -



Sintered Pellet Type) a pelety vzniklé shlukováním menších zrn bentonitu do větších (Agglutination – Rolling Granulator Type).....	30
Obr. 10 – Zjednodušený náčrt řešení vyplnění mezi mezizrnných prostor menšími zrny [25], podobné řešení nabízí Fullerův početní vztah. ....	31
Obr. 11 – Zkoušené bentonitové pelety ve finském výzkumu zaplnění technologické spáry; vlevo bentonitové pelety z technologie protlačování skrz matici; vpravo bentonitové pelety zhotovené technologií lisováním mezi válci s připravenými otvory, do kterých je bentonit zatlačován [8]. ....	32
Obr. 12 – Finské pelety (nahore) a drtě (dole) zkoušené v práci [16]. ....	33
Obr. 13 – Vlastnosti zkoušených pelet a drtí v [16] a vlastnosti zkoušených pelet a drtí v [3]. V tabulce jsou uvedeny vlastnosti zkoušených pelet, např. jejich rozměry (dimensions), vlhkosti (water content), způsoby výroby - pro Cebogel protlačováním a pro pelety Hosokawa lisováním mezi válci s perforací. V tabulce jsou také vypsány objemové hmotnosti po sypaní (Bulk density).....	34
Obr. 14 – Řešení horizontálního způsobu ukládání VJP ve Švýcarsku [29]. ....	35
Obr. 15 – Stroj se šnekovými dopravníky pro aplikaci GBM pro FE experiment [32], který nejenom GBM dopravuje, ale také jej dohutňuje. ....	35
Obr. 16 – Zobrazení francouzského způsobu ukládání [33]. ....	36
Obr. 17 – Obrázek z testování aplikace bentonitových pelet dvěma šnekovými dopravníky [34]. ....	37
Obr. 18 – Obrázky z výstavby bentonitové vrstvy z pelet v FSS experimentu [34]. ....	37
Obr. 19 – Chemické a mineralogické složení bentonitu Bentonitu 75 z roku 2013 [40]. ....	39
Obr. 20 – Tabulka s mezí tekutosti $w_L$ , s mezí plasticity $w_p$ a s $\rho_s$ měrnou hmotností B75 [41]. 39	
Obr. 21 - Bobtnací tlak B75 a jeho porovnání s jinými materiály (RMN – bentonit z ložiska Rokle, SAB 65 – průmyslově dodávaný aktivovaný bentonit, BI – zkoušený bentonit v rámci projektu Blízkých interakcí, Zelený jíl – přírodní velice kvalitní jíl zkoušený v CEG (některé vlastnosti srovnatelné s bentonitem) [41]. ....	40
Obr. 22 – Hydraulická vodivost nezatíženého materiálu a její porovnání s ostatními materiály (RMN – bentonit z ložiska Rokle, SAB 65 – průmyslově dodávaný aktivovaný bentonit, BI – zkoušený bentonit v rámci projektu Blízkých interakcí, Zelený jíl – přírodní velice kvalitní jíl zkoušený v CEG (některé vlastnosti srovnatelné s bentonitem) [41]. ....	41



- Obr. 23 – Řez experimentálním tunelem o průměru 3 m a naznačení řešení FE experimentu [30]. Z obrázku je zřejmé vodorovné uložení tří topných těles (heater) na bentonitových blocích (bentontonite blocks)..... 42
- Obr. 24 – Experiment MCJ před spuštěním do velkoprofilového vrtu v Podzemní laboratoři Josef. .... 44
- Obr. 25 – Konstrukční řešení experimentu MCJ; vlevo nárys experimentu se základními rozměry a s označením vodorovných monitorovacích profilů (I až VI); vpravo 3D vizualizace s vyřiznutou částí pro znázornění topného tělesa [44]. .... 45
- Obr. 26 – Vlevo půdorysné rozměry středových  $r = 60$  mm, malých  $r = 187,5$  mm a velkých bloků R350 mm použitých pro výstavbu fyzikálního modelu Mock-up Josef; vpravo znázorněné řezy bentonitovou vrstvou v experimentu [44]. .... 45
- Obr. 27 – Kaolínové pelety z ČLUZ a.s..... 58
- Obr. 28 – Výrobní linka pro lisování pelet. Na obrázku jsou zřejmé dva pásové dopravníky. Horní pásový dopravník sype zavlhčený materiál do stroje, ve kterém se zhutňují pelety protlačováním skrz matrici. Bentonitové pelety ze stroje samovolně vypadávají na spodní pásový dopravník, který dopravuje pelety k expedičnímu místu. .... 59
- Obr. 29 – Vlevo matrice pro zhutňování pelet a vpravo detail umístění matrice ve stroji. Na obrázku vpravo jsou zřejmé dva válce (ocelová kola s vroubky), které se horizontálně otáčejí po matrici (vertikální osa otáčení je ve středu matrice) a zároveň se otáčejí vertikálně (horizontální osa je ve středu válců zhruba 30 cm nad matricí). Válce (kola) svými otáčivými pohyby zatlačují bentonit do kruhových otvorů v matrici [8]. .... 59
- Obr. 30 – Vylisované bentonitové pelety o průměru 8 mm z ČLUZ a.s..... 60
- Obr. 31 – Fotografie vylisovaných bentonitových pelet o průměru 12 mm z ČLUZ a.s. .... 61
- Obr. 32 – Závislost objemové hmotnosti sušiny na vlhkosti lisovaného bentonitu v průběhu zkoušek v ČLUZ a.s. .... 62
- Obr. 33 – Bentonitové pelety o průměru 12 mm (B75 PEL 12) po plno provozní zkoušce lisování v ČLUZ a.s. .... 63
- Obr. 34 – Graf znázorňující závislost objemové hmotnosti sušiny na vlhkosti lisovaného bentonitu při plno provozní zkoušce v ČLUZ a.s.(B75 PEL 12). .... 64
- Obr. 35 – Graf znázorňující zrnitostní rozbor B75 PEL 12 po plno provozní zkoušce, v grafu je také znázorněná vypočítaná průměrná zrnitost B75 PEL 12 (silná oranžová čára) z křivek





zrnitosti pro různé vzorky odebrané v průběhu výroby B75 PEL 12 (tenké čáry) a Fullerova křivka pro B75 PEL 12 (silná modrá čára).....	64
Obr. 36 – Experimentální drcení B75 PEL 12 s cílem úpravy zrnitosti.....	65
Obr. 37 – Graf znázorňující křivky zrnitosti B 75 PEL 12; modrá čára je křivka podle Fullerového výpočtu; oranžová čára znázorňuje průměr B75 PEL 12 po plno provozní zkoušce a černá čára zobrazuje průměrnou křivku zrnitosti pro drcené pelety B 75 PEL 12 (podkladem pro průměrnou jsou tenké barevné čáry). .....	65
Obr. 38 – Tzv. recyklát REC z B75 – lisovaný bentonit mezi válci, na obrázku jsou zřejmé destičky o hraně v řádech cm. ....	66
Obr. 39 – Grafické znázornění dosažených objemových hmotností sušin (zhutnění) jednotlivých pelet; modře jsou znázorněny hodnoty pro B75 PEL 12 z ČLUZ a.s. a červeně hodnoty pro materiál z Keramostu a.s. označený jako REC.....	68
Obr. 40- Grafické zobrazení průměrné křivky zrnitosti (silná modrá), která byla stanovená z tenkých pro různé vzorky REC 0,8-2 mm a porovnání zrnitosti s křivkou podle Fullera, která je v grafu vynesena silně a červeně. ....	69
Obr. 41- Grafické zobrazení průměrné křivky zrnitosti (silná modrá), která byla stanovená z tenkých pro různé vzorky REC 0,8-5 mm a porovnání zrnitosti s křivkou podle Fullera.....	69
Obr. 42 – Foto REC MIX I při zkouškách v laboratoři.....	70
Obr. 43- Grafické zobrazení průměrné křivky zrnitosti (silná modrá) pro REC 0,8-2 mm a REC 2-5 mm smíchaný v poměru 7:3 a porovnání zrnitosti s křivkou podle Fullera (silná červená). 71	
Obr. 44- Grafické zobrazení průměrné křivky zrnitosti (modrá) pro REC 0,8-2 mm a REC 2-5 mm smíchaný v poměru 7:3 (REC MIX I) a porovnání zrnitosti s křivkami podle Fullera pro $D_{max}=8\text{mm}$ (červená) a $D_{max}=5\text{ mm}$ (oranžová). ....	72
Obr. 45- Grafické zobrazení průměrné křivky zrnitosti (silná modrá) pro REC 0,8-2 mm a REC 2-5 mm smíchaný v poměru 1:1 (REC MIX II) a porovnání zrnitosti s křivkou podle Fullera (silná červená). ....	72
Obr. 46 – GBM z NAGRY při zkouškách v laboratoři.....	73
Obr. 47- Grafické zobrazení průměrné křivky zrnitosti (silná modrá) pro BGM a porovnání zrnitosti s křivkou podle Fullera (červená).....	74
Obr. 48 – Válec $5\text{ dm}^3$ pro zkoušení možností zhutnění zkoušených materiálů a pro stanovení termofyzikálních vlastností; foto je z měření a vpravo na obrázku je přístroj Isomet 2114. ....	76



Obr. 49 – Obrázek malého ocelového modelu spáry. ....	76
Obr. 50 – Model velké spáry a testy volného sypání bentonitu do spáry; vlevo je foto modelu spáry před zkouškou s násypkou; vpravo nahoře je foto z plnění spáry a vpravo dole je model spáry po vyplnění zkoušeným materiálem. ....	80
Obr. 51 – Graf závislosti mezi součinitelem tepelné vodivosti a objemové hmotnosti sušiny pro lisované bentonitové bloky a pro dvě hodnoty vlhkosti bloků.....	82
Obr. 52 – Graf závislosti mezi měrnou objemovou tepelnou kapacitou a objemovou hmotností sušiny pro lisované bentonitové bloky a pro dvě hodnoty vlhkosti bloků. ....	83
Obr. 53 – Graf vyjadřující závislost mezi součinitelem tepelné vodivosti a objemové hmotnosti sušiny pro bentonitové pelety B75 PEL 12 drcené (w=16%). ....	84
Obr. 54 – Graf závislosti mezi měrnou objemovou tepelnou kapacitou a objemovou hmotností sušiny pro B75 PEL 12 (w=16%) před drcením a po drcení. ....	84
Obr. 55 – Graf závislosti mezi součinitelem tepelné vodivosti a objemové hmotnosti sušiny pro REC MIX I a II 12 (w=6,5%). ....	85
Obr. 56 – Graf závislosti mezi měrnou objemovou tepelnou kapacitou a objemovou hmotností sušiny pro REC MIX I a II (w=6,5 %). ....	86
Obr. 57 – Graf závislosti mezi součinitelem tepelné vodivosti a objemové hmotnosti sušiny pro GBM NAGRA (w=8 % a w=11 %). ....	87
Obr. 58 – Graf závislosti mezi měrnou objemovou tepelnou kapacitou a objemovou hmotností sušiny pro GBM Nagra (w=8 % a 11 %). ....	88
Obr. 59 – V grafu jsou zobrazena naměřená data pro REC MIX I a GBM. Data jsou v grafu porovnána s výsledkem THM_C modelování zasláného od NAGRY (Garitte 2013a – THM_C). ....	89
Obr. 60 – Graf zobrazující různé početní řešení pro stanovení součinitele tepelné vodivosti, v grafu jsou také vykreslená data z experimentálního měření pro některé ze zkoušených materiálů (GBM, REC MIX I a bentonitové bloky). ....	90
Obr. 61 – Jádra ze čtvrtého odvrtnu bentonitu, celkem bylo pro potřeby této práce analyzováno pět odběrů (výsledky a popis z jednotlivých odběrů včetně fotek jsou v příloze této zprávy). ..	92
Obr. 62 – Znázornění hodnot z hydraulických tlakových buněk umístěných v profilu 3 (uprostřed experimentu) a vykreslení teploty z teploměru 131.....	94



Obr. 63- Výsledky měření tlaku čidlem 231 ukazují nárůst tlaků během několika hodin od uložení modelu. ....	94
Obr. 64 - Výsledky z měření tlaku čidlem 235 ukazují na nárůst tlaků po zapnutí topného systému. ....	95
Obr. 65 - Teploměr s čidlem LM35DZ před montáží do modelu. ....	96
Obr. 66 - Svislé řetězové teploměry (v ochranných plastových trubičkách jsou patrná jednotlivá čidla). ....	96
Obr. 67 - Svislé řetězové teploměry a vodorovný teploměr 128 v průběhu výstavby modelu (v ochranných plastových trubičkách jsou patrná jednotlivá čidla). ....	96
Obr. 68 - Průběh teploty uvnitř topného systému a na povrchu topidla (čidlo 139). ....	97
Obr. 69 – Nahoře vlevo je schéma monitoringu okolí studny (půdorys) včetně orientačního umístění a označení čidel – modré značky označují místa s měřicími svorníky a červené značky vyjadřují umístění teplotních čidel okolo vrtu pro experiment; vlevo dole je obrázek z instalace experimentu MCJ do vrtu a vpravo je obrázek z rozrážky, na počvě (dno) jsou vidět odvrtné velkoprofilové vrty. ....	98
Obr. 70 – Vykreslení hodnot objemové hmotnosti sušiny v závislosti na hloubce vzorku v modelu. Černá barva značí hodnoty a spojnice z prvního odvrtu, červená barva značí hodnoty a spojnice ze druhého odvrtu, zelená barva označuje hodnoty a spojnice ze třetího odvrtu, modrá značí hodnoty a spojnice ze čtvrtého odvrtu a žlutá značí hodnoty a spojnice z pátého odvrtu. ....	101
Obr. 71 – Vykreslení hodnot vlhkosti v závislosti na hloubce vzorku v modelu. Černá barva značí hodnoty a spojnice z prvního odvrtu, červená barva značí hodnoty a spojnice ze druhého odvrtu, zelená barva označuje hodnoty a spojnice ze třetího odvrtu, modrá značí hodnoty a spojnice ze čtvrtého odvrtu a žlutá značí hodnoty a spojnice z pátého odvrtu. ....	101
Obr. 72 – Vykreslení hodnot vypočteného stupně saturace v závislosti na hloubce vzorku v modelu. Černá barva značí hodnoty z prvního odvrtu, červená barva značí hodnoty z druhého odvrtu, zelená barva označuje hodnoty ze třetího odvrtu, modrá barva označuje hodnoty ze čtvrtého odběru a žlutá barva označuje hodnoty z pátého odběru. ....	102
Obr. 73 - Porovnání hodnot bobtnacího tlaku materiálu B75: nezátíženého (plné černé čtverečky), zatíženého 10, 20 a 26 měsíců v “patronách” v in-situ podmínkách (kosočtverce v šedých odstínech) a z odvrtů z experimentu MCJ, zatížení teplem a přirozenou saturací (interní materiály Centra experimentální geotechniky – vyhodnocení autor práce a Ing. Lucie Hausmannová v roce 2016). ....	102



Obr. 74 - Porovnání hodnot hydraulické vodivosti materiálu B75: nezatíženého (plné černé čtverečky), zatíženého 10, 20 a 26 měsíců v “patronách” v in-situ podmínkách (kosočtverce v šedých odstínech) a z odvrtů z experimentu MCJ- zatížení teplem a přirozenou saturací (interní materiály Centra experimentální geotechniky – vyhodnocení autor práce a Ing. Lucie Hausmannová v roce 2016).....	103
Obr. 75 – Obrázek z měření tepelné vodivosti tonalitu pro výpočty provedené v této práci .....	104
Obr. 76 – Grafické znázornění teploty v čase z různých čidel umístěných zhruba v polovině výšky experimentu po 56 měsících (TT – topné těleso). Z teplotních dat je zřejmé, že k ustálení hodnot teploty došlo začátkem roku 2015. Data z různě umístěných teploměrů byla podkladem i pro početní simulaci. ....	106
Obr. 77 – Vykreslení teploty při začátku tepelného zatěžování bentonitu, po 54 měsících zatěžování a ukázka jednoduchého početního řešení s průměrným součinitelem tepelné vodivosti bentonitu $\lambda = 1$ (W/m/K) a součinitelem tepelné vodivosti pro granitické horniny (tonalit $\lambda = 2,7$ (W/m/K). ....	106
Obr. 78 – V grafu jsou znázorněná data z teplotních čidel umístěných v experimentu a početní simulace pro začátek experimentu (1/2013, výpočet proveden podle hodnot z čidel) a po částečné saturaci bentonitové vrstvy (6/2017), do výpočtu dosazen průměrný součinitel tepelné vodivosti $\lambda = 1$ (W/m/K).....	108
Obr. 79 – Schématické zobrazení místa umístění těsnicí zátky (plug) pro uzavření zaplněných prostor s uloženými ÚOS (švédský vertikální systém uložení ÚOS (Canister with spent nuclear fuel); backfill a buffer je označení bentonitové vrstvy) [71] pro zátky i backfill je možné použít pelety zkoušené v této zprávě. ....	114
Obr. 80 – Schématický svislý řez ukládacím vrtem (deposition hole) s vyznačením bentonitových bloků pro backfill (Block backfill) a možným využitím bentonitových pelet pro zaplnění spáry mezi bloky a stěnou ukládacího tunelu (Pellet filling) [72]. ....	114
Obr. 81 – Schéma experimentu zaplnění šachty v podzemní laboratoři HADES v MOL (Belgie) a vpravo obrázek zkoušené bentonitové směsi (50 % pelet a 50 % prášku) [73]. ....	115
Obr. 82 – Vlevo je foto po zaplnění modelu spáry 50 mm zkoušené v této práci. Na fotce je zřejmá segregace větších bentonitových zrn vlivem sypání materiálu na jedno místo. Vpravo je obrázek z japonského výzkumu. Obrázek znázorňuje segregaci větších bentonitových zrn (Large grain segregation), které se spíše gravitačně přemísťují než menší zrna.....	116



Obr. 83 – Rentgenový snímek zaplnění spáry z finského výzkumu [8] pro různé způsoby zaplnění spáry (vlevo zaplnění volným sypáním se zhutněním, vprostřed je obrázek zaplnění metodou stříkaného jílu a vpravo pouze metodou volného sypání). .....	117
Obr. 84 – 3D model přenašeče pro umístování bentonitových bloků v úložném vrtu vlevo a vpravo řez přenašečem s vyznačením místa (Pellet compartment) pro bentonitové pelety, které budou volně vsypány do spáry mezi bentonitovým blokem a horninou [3]. .....	117
Obr. 85 – <i>Jádra z prvního odvrtu</i> .....	154
Obr. 86 – Grafy s výsledky z prvního odběru (hnědě naznačeny spáry mezi bentonitovými segmenty) .....	155
Obr. 87 – <i>Jádra z druhého odvrtu</i> .....	155
Obr. 88 – Výsledky z 2. odběru (hnědě naznačeny spáry mezi bentonitovými segmenty) .....	156
Obr. 89 – <i>Jádra ze třetího odvrtu</i> .....	157
Obr. 90 – Výsledky ze 3. odběru (hnědě naznačeny spáry mezi bentonitovými segmenty) .....	157
Obr. 91 – <i>Jádra ze čtvrtého odvrtu</i> .....	158
Obr. 92 – Výsledky ze 4. odběru (hnědě naznačeny spáry mezi bentonitovými segmenty) .....	158
Obr. 93 – <i>Jádra ze čtvrtého odvrtu (odvrt byl z důvodu fotodokumentace rozdělen na dvě části)</i> .....	159
Obr. 94 – Výsledky z 5. odběru (hnědě naznačeny spáry mezi bentonitovými segmenty) .....	160



## 11 LITERATURA

- [1] SKB, a POSIVA. *Basics of the final disposal - Posiva* [online]. In: . Posiva OY, 2016 [cit. 2017-04-06]. Dostupné z:  
[http://www.posiva.fi/en/final\\_disposal/basics\\_of\\_the\\_final\\_disposal#.WVTkxFFLfcs](http://www.posiva.fi/en/final_disposal/basics_of_the_final_disposal#.WVTkxFFLfcs)
- [2] ALLARD, T a G CALAS. Radiation effects on clay mineral properties. *Applied Clay Science* [online]. 2009, **43**(2), 143-149 [cit. 2015-01-09]. DOI: 10.1016/j.clay.2008.07.032. ISSN 01691317. Dostupné z:  
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169131708001671>
- [3] HAAPALA, Keijo. *WP5: KBS - 3V Emplacement tests in ONKALO (EMP: LUCOEX ( GRANT AGREEMENT : 269905 ); DELIVERABLE ( D5:03 ) Memo on designing the gap filling tool* [online]. POSIVA, 2012 [cit. 2016-12-30]. Dostupné z: <http://www.lucoex.eu/files/D5.03.pdf>
- [4] BENNETT, David. *The Joint EC/NEA Engineered Barrier System Project: Synthesis Report (EBSSYN) : final report* [online]. Bruxelles: European commision, 2010 [cit. 2017-05-17]. ISBN 978-92-79-14863-7. Dostupné z:  
<http://bookshop.europa.eu/en/the-joint-ec-nea-engineered-barrier-system-project-pbKINA24232/;pgid=GSPefJMEtXBSR0dT6jbGakZD0000N1VQKBEq;sid=V532AOHcM5L2BbjHrZVop4P5Gv7ocuYPUU4=?CatalogCategoryID=DjYKABstgekAAAEjwpEY4e5L>
- [5] VAŠÍČEK, Radek. *Research on the Thermophysical Behaviour of Engineered Barrier Material under Extreme Conditions*. Praha, 2008. PhD thesis. CTU in Prague.
- [6] JUVANKOSKI, Markku, Kari IKONEN a Tiina JALONEN. VTT AND POSIVA OY. *Buffer Production Line 2012: Design, Production and Initial*



- State of the Buffer* [online]. POSIVA Oy, 2012 [cit. 2013-08-21]. ISBN 978-951-652-198-8. Dostupné z: [http://www.posiva.fi/files/3071/POSIVA\\_2012-17.pdf](http://www.posiva.fi/files/3071/POSIVA_2012-17.pdf)
- [7] MARJAVAARA, Harri a KIVIKOSKI. *Filling the Gap Between Buffer and Rock in the Deposition Hole: Working Report 2011-33* [online]. In: . 2011. Posiva OY, 2011 [cit. 2013-06-10]. Dostupné z: [http://www.posiva.fi/files/1923/WR\\_2011-33web.pdf](http://www.posiva.fi/files/1923/WR_2011-33web.pdf)
- [8] MARJAVAARA, Pieti, Erika HOLT a Ville SJOBLUM. *Customized Bentonite Pellets: Manufacturing, Performance and Gap Filling Properties: Working Report 2012-62* [online]. Finland: Posiva, 2013 [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: [http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/46/094/46094986.pdf](http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/46/094/46094986.pdf)
- [9] SUGITA, Yutaka, Hideaki SUZUKI a Masakazu CHIJIMATSU. *Thermal, hydraulic and swelling properties of bentonite pellet: Examine on calculating Parameter assessment on PRP (research dokument)* [online]. In: . Japan Nuclear Cycle Development Institute, 2003, s. 28 [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://jolissrch-inter.tokai-sc.jaea.go.jp/pdfdata/JNC-TN8400-2002-023.pdf>
- [10] NAKASHIMA, Hitoshi, Akira SAITO a Takashi ISHII. Method for producing high-density bentonite pellets using dry shrinkage. *Journal of Nuclear Fuel Cycle and Environment*. 2014, **21**(2), 83-94. DOI: 10.3327/jnuce.21.83. ISSN 1884-7579. Dostupné také z: [https://www.jstage.jst.go.jp/article/jnuce/21/2/21\\_83/\\_article/-char/ja/](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jnuce/21/2/21_83/_article/-char/ja/)
- [11] JIA, Ling-yan, Wei-min YE, Yu-jun CUI, Bao CHEN a Ju WANG. Advances in hydro-mechanical behaviors of buffer materials under effect of technological gaps. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*. 2017, **2017**, 138-147. DOI: 10.11779/CJGE201701012.
- [12] ŠŤÁSTKA, Jiří. Bentonite Gap Filling for High-Level Waste Disposal. In: *Hydrogeology, Engineering Geology and Geotechnics*. II. Albena, Bulgaria: SGEM, 2014, 7 (139-146). DOI: 10.5593/sgem2014B12. ISBN 978-619-7105-



08-7. ISSN 1314-2704.

- [13] PINTADO, X. a J. AUTIO. Heat Flows in Gaps. Radiation and Conduction. In: *Http://www.etcg.upc.edu/recerca/webs/code\_bright/3w/abstracts/pintado-autio.pdf* [online]. 2012 [cit. 2013-06-23]. Dostupné z: [http://www.etcg.upc.edu/recerca/webs/code\\_bright/3w/abstracts/pintado-autio.pdf](http://www.etcg.upc.edu/recerca/webs/code_bright/3w/abstracts/pintado-autio.pdf)
- [14] SUZUKI, K., H. ASANO, R. YAHAGI, I. KOBAYASHI, P. SELLIN, C. SVEMAR a M. HOLMQVIST. Experimental investigations of piping phenomena in bentonite-based buffer materials for an HLW repository. *Clay Minerals* [online]. 2013, **48**(2), 363-382 [cit. 2014-04-04]. DOI: 10.1180/claymin.2013.048.2.15. ISSN 00098558. Dostupné z: <http://openurl.ingenta.com/content/xref?genre=article>
- [15] PACOVSKY, Jaroslav, Jiri STASTKA, Lucie HAUSMANNOVA, Zbynek KAISR a Zbynek VENKRBEC. CTU IN PRAGUE, FACULTY OF CIVIL ENGINEERING. *Výstavba, provozování a vyhodnocení demonstračního experimentu Mock-up-Josef: Dílčí zpráva č.1*. Praha, 2011.
- [16] HOLT, Erika, Mia LOIJA, Stefania FORTINO a Pieti MARJAVAARA. *Experimental studies of buffer gap filling with artificial wetting: Working Report 2013-52* [online]. Finland: Posiva, 2014 [cit. 2015-05-22]. Dostupné z: [http://www.posiva.fi/files/3771/WR\\_2013-52.pdf](http://www.posiva.fi/files/3771/WR_2013-52.pdf)
- [17] SELLIN, Patrik a Olivier LEUPIN. The Use of Clay as an Engineered Barrier in Radioactive-Waste Management – A Review. *Clays and Clay Minerals*. 2013, **61**(6), 477-498. DOI: 10.1346/CCMN.2013.0610601. ISSN 00098604. Dostupné také z: <http://openurl.ingenta.com/content/xref?genre=article>
- [18] TANG, Anh-Minh, Yu-Jun CUI a Trung-Tinh LE. *A study on the thermal conductivity of compacted bentonites*. b.r., **2008**, 16. DOI: 10.1016/j.clay.2007.11.001. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169131707001780>





- [19] KIVIKOSKI, Harri, Ismo HEIMONEN a Hannu HYTTINEN. *Bentonite Pellet Thermal Conductivity Techniques and Measurements: Working Report 2015-09* [online]. Olkiluoto: POSIVA OY, 2015 [cit. 2016-12-28]. Dostupné z: [http://www.posiva.fi/files/4011/WR\\_2015-09.pdf](http://www.posiva.fi/files/4011/WR_2015-09.pdf)
- [20] OULD-LAHOUCINE, C, H SAKASHITA a T KUMADA. Measurement of thermal conductivity of buffer materials and evaluation of existing correlations predicting it. In: *Nuclear Engineering and Design* [online]. 2002, **216**(1-3), s. 1-11 [cit. 2014-06-07]. DOI: 10.1016/S0029-5493(02)00033-X. ISSN 00295493. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S002954930200033X>
- [21] *Ge-tra těsnící látky* [online]. Ge-Tra, 2015 [cit. 2014-04-05]. Dostupné z: <https://www.ge-tra.cz/katalog/tesnici-vyplachove-latky/tesnici-latky>
- [22] *ADASI Morava* [online]. 2015 [cit. 2015-06-10].
- [23] MASUDA, Ryoichi, Hidekazu ASANO, Satohito TOGURI, Takuo MORI, Tomoyuki SHIMURA, Takeshi MATSUDA, Masao UYAMA a Masaru NODA. Buffer Construction Technique Using Granular Bentonite. *Journal of Nuclear Science and Technology*. 2007, **44**(3), 448-455. DOI: 10.1080/18811248.2007.9711307. ISSN 0022-3131. Dostupné také z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/18811248.2007.9711307>
- [24] KIVIRANTA, Leena a Sirpa KUMPULAINEN. *Quality Control and Characterization of Bentonite Materials: Working Report 2011-84* [online]. 1. Olkiluoto: POSIVA OY, 2011 [cit. 2015-06-28]. Dostupné z: [http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/43/108/43108887.pdf](http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/43/108/43108887.pdf)
- [25] SVOBODA, Luboš. O mísení frakcí kameniva. *Skladba kameniva* [online]. Beton TKS 4(1), 2004, s. 24-28. ISSN 1213-3116., 2004 [cit. 2015-06-28]. Dostupné z: <http://people.fsv.cvut.cz/~svobodal/gransy/aggweb.htm>
- [26] TEODORI, S.P., H.P. WEBER, S. KOHLER, M. PLOTZE, M. HOLL a H.R. MULLER. Granular bentonite production as buffer material for a Full-scale



- Emplacement ("FE") experiment. In: *5th international conference on clays in natural & engineered barriers for radioactive waste confinement* [online]. 2012 [cit. 2015-07-11].
- [27] Manufacturing of Buffer Blocks, Backfill Blocks and Pellets for Posiva's KBS - 3V concept. In: PEURA, Jutta, Ville SJOBOLOM, Jouko RITOLA, Erika HOLT a Keijo HAAPALA. *LUCOEX Conference & Workshop* [online]. Posiva, 2015, s. 22 [cit. 2016-06-07].
- [28] FRIES, Thomas, Anne CLAUDEL, Hanspeter WEBER, Lawrence JOHNSON a Olivier LEUPIN. The Swiss Concept for the Disposal of Spent Fuel and Vitrified HLW. In: FRIES, Thomas, Anne CLAUDEL, Hanspeter WEBER, Lawrence JOHNSON a Olivier LEUPIN. *International Conference Underground Disposal Unit Design and Emplacement Processes for a Deep Geological Repository* [online]. Prague, 2008, s. 9 [cit. 2013-05-10].
- [29] DELAGE, Pierre. *The behaviour of bentonite based materials: insight into nano and micro-structure: THEBES: KYT project investigating bentonite* [online]. In: . 2015 [cit. 2016-07-05]. Dostupné z: <http://civileng.aalto.fi/en/midcom-serveattachmentguid-1e6a37a30e3accaa37a11e6ad31751fb8fb40f940f9/helsinkiv3pdf.pdf>
- [30] MÜLLER, Herwig, Benoit GARITTE, Tobias VOGT et al. Implementation of the full-scale emplacement (FE) experiment at the Mont Terri rock laboratory. *Swiss Journal of Geosciences*. 2017. DOI: 10.1007/s00015-016-0251-2. ISSN 1661-8734. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1007/s00015-016-0251-2>
- [31] SAKAKI, Toshihiro, Sven KOHLER, Matian HERTRICH a Herwig R. MULLER. FE Experiment: Density measurement of granulated bentonite mixture in a 3D 1:1 scale mockup test using dielectric tools. In: *6th international conference on clays in natural and engineered barriers for radioactive waste confinement*. Brussels, 2015, s. 1. DOI: 10.13140/RG.2.1.2701.8324.



- [32] KOHER, Sven, Benoit GARRITE, Hanspeter WEBER a Herwig MULLER. *LUCOEX - DELIVERABLE (D - N°:D 2.5 ) Emplacement Report LUCOEX – WP2*. NAGRA, 2015.
- [33] ANDRA, . The French geological disposal project Cigéo: A converging approach. In: *Waste Management Symposia 2013* [online]. 2013, s. 23 [cit. 2015-10-06].
- [34] BOSGIRAUD, Jean-Michel a Régis FOIN. *DOPAS Work Package 3 - Deliverable 3.1 WP3 FSS Construction Summary Report*. Andra, 2016, 43 s. Dostupné také z:  
[http://www.posiva.fi/files/4491/DOPAS\\_D3\\_1\\_WP3\\_FSS\\_Construction\\_Summary\\_Report\\_final\\_2016.pdf](http://www.posiva.fi/files/4491/DOPAS_D3_1_WP3_FSS_Construction_Summary_Report_final_2016.pdf)
- [35] *Chapter 5 Properties and Uses of Bentonite*. b.r., , 217. DOI: 10.1016/S0070-4571(08)70615-0. Dostupné také z:  
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0070457108706150>
- [36] AL-TAIE, Laith, Roland PUSCH a Sven KNUTSSON. *Hydraulic properties of smectite rich clay controlled by hydraulic gradients and filter types*. b.r. DOI: 10.1016/j.clay.2013.11.027. Dostupné také z:  
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169131713003967>
- [37] MATYÁŠEK, Jiří a miloš SUK. *Jílové minerály* [online]. In: . b.r., s. 1 [cit. 2017-04-04].
- [38] KAUFHOLD, S., W. BAILLE, T. SCHANZ a R. DOHRMANN. *About differences of swelling pressure — dry density relations of compacted bentonites*. b.r. DOI: 10.1016/j.clay.2015.02.002. Dostupné také z:  
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169131715000526>
- [39] Keramost a.s. - Products - Bentonites - Bentonites for building industry. *Keramost a.s.* [online]. b.r. [cit. 2014-05-20]. Dostupné z:  
<http://www.keramost.cz/en/products/bentonites/bentonites-for-building-industry>
- [40] TRPKOŠOVÁ, Dagmar, Petr VEČERNÍK, Jenny GONDOLLI, Václava



- HAVLOVÁ, Irena HANUSOVÁ a Jiří SVOBODA. Laboratory experiments on bentonite pellet saturation. TRKOŠOVÁ, Dagmar, Petr VEČERNÍK, Jenny GONDOLLI, Václava HAVLOVÁ, Jiří SVOBODA a Irena HANUSOVÁ. *Radioactive Waste Confinement: Clays in Natural and Engineered Barriers* [online]. 2016: The Geological Society, 2016, s. 10 [cit. 2016-05-23]. ISBN 978-1-78620-273-4.
- [41] ČVUT V PRAZE, . *Interní dokumenty Centra experimentální geotechniky*. Praha, b.r.
- [42] *Mont Terri project* [online]. NAGRA, b.r. [cit. 2016-07-04]. Dostupné z: (<https://www.mont-terri.ch>
- [43] ŠTÁŠTKA, Jiří a Jaroslav PACOVSKÝ. Research , Development and Demonstration Projects at the Josef Underground Laboratory. In: *International Conference on the Safety of Radioactive Waste Management*. <https://gnssn.iaea.org/meetings/wasteconference2016/Shared%20Documents/Session%203d%20-%20HLW/Poster>. IAEA, 2016, s. 4.
- [44] ŠTÁŠTKA, Jiří. Mock-up Josef Demonstration experiment. *Tunel* [online]. 2014, **2014**(1), 8 [cit. 2017-05-26]. ISSN 1211-0728.
- [45] SVOBODA, J. a R. VASICEK. Preliminary geotechnical results from the Mock-Up-CZ experiment. *Applied Clay Science*. 2010, **47**(1-2), 139-146. DOI: 10.1016/j.clay.2008.12.012. ISSN 01691317. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169131708002949>
- [46] KARNLAND, Ola, Siv OLSSON, Ann DUECK, Martin BIRGENSSON, Ulf NILSSON a Tania HERMAN-HÅKANSSON. *Long term test of buffer material at the Äspö Hard Rock Laboratory, LOT project: Final report on the A2 test parcel* [online]. ISSN 1404-0344 CM Gruppen AB, Bromma, 2009 Svensk Kärnbränslehantering AB Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co, 2009, s. 279 [cit. 2017-08-29].
- [47] ÅKESSON, Mattias, Siv OLSSON, Ann DUECK et al. *Temperature buffer test:*



- Hydro-mechanical and chemical/ mineralogical characterizations* [online]. Svensk Kärnbränslehantering AB Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co, 2012 [cit. 2017-10-02]. Dostupné z: [http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/44/023/44023223.pdf](http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/44/023/44023223.pdf)
- [48] LLORET, A. a M.V. VILLAR. Advances on the knowledge of the thermo-hydro-mechanical behaviour of heavily compacted “FEBEX” bentonite. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*. 2007, **32**(8-14), 701-715. DOI: 10.1016/j.pce.2006.03.002. ISSN 14747065. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1474706506001835>
- [49] SVOBODA, J. a R. VASICEK. Preliminary geotechnical results from the Mock-Up-CZ experiment. *Applied Clay Science*. 2010, **47**(1-2), 139-146. DOI: 10.1016/j.clay.2008.12.012. ISSN 01691317. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169131708002949>
- [50] ČSN EN ISO 17892-2: *Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemín – Část 2: Stanovení objemové hmotnosti*. ARCADIS Geotechnika, a. s., 2014.
- [51] ČSN EN ISO 17892-1: *Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemín – Část 1: Stanovení vlhkosti*. ARCADIS Geotechnika, a. s., 2014.
- [52] PACOVSKÝ, Jaroslav, Jiří SVOBODA, Radek VAŠÍČEK, Jiří ŠTÁŠTKA, Markéta LEVOROVÁ a Lucie HAUSMANNOVÁ. *FR-T14/497 Výzkum stability bentonitu v in-situ podmínkách při teplotách do 95°C (Bentonity95): Dílčí zpráva za II. Etapu II - Temperace a monitoring fyzikálního modelu*. Praha - ČVUT – Centrum experimentální geotechniky, 2013.
- [53] PACOVSKÝ, Jaroslav, Jiří ŠTÁŠTKA, Radek VAŠÍČEK, Jiří SVOBODA, Lucie HAUSMANNOVÁ a Markéta LEVOROVÁ. *Výzkum stability bentonitu v in-situ podmínkách při teplotách do 95°C (Bentonity95): Zpráva ČVUT 2012 Analýza bentonitů - Laboratorní geotechnické zkoušky bentonitu*. 1. Centrum experimentální geotechniky, Fakulta stavební, České vysoké učení technické v



Praze, 2012.

- [54] KARNLAND, Ola. *Chemical and mineralogical characterization of the bentonite buffer for the acceptance control procedure in a KBS-3 repository* [online]. Clay Technology AB, 2010 [cit. 2015-10-20]. Dostupné z: <https://www.citacepro.com/dokument/GZmwsQ4zDwiBv22i>
- [55] LOW, J.E., F.A. LOVERIDGE a W. POWRIE. *Measuring soil thermal properties for use in energy foundation design* [online]. In: . Southampton: Faculty of Engineering and the Environment, University of Southampton, 2016 [cit. 2016-07-11].
- [56] *ASTM D 5334-08: Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Soft Rock by Thermal Needle Probe Procedure*. West Conshohocken, PA: ASTM International, b.r.
- [57] *ASTM D5930 - 16: Standard Test Method for Thermal Conductivity of Plastics by Means of a Transient Line-Source Technique*. West Conshohocken, PA,: ASTM International, 2016.
- [58] ČSN CEN ISO/TS 17892- 4. *ČSN CEN ISO/TS 17892- 4: Geotechnický průzkum a zkoušení - Laboratorní zkoušky zemin - Část 4: Stanovení zrnitosti zemin*. Český normalizační institut, 2005.
- [59] SVOBODA, Jiri, Lucie HAUSMANNOVA, Radek VAŠÍČEK et al. *Deliverable no. D4.7 - EPSP summary report: DOPAS (Contract Number: FP7 - 323273)* [online]. ČVUT v Praze, SURAO, UJV Řež, 2016, 102 s. [cit. 2016-10-24]. Dostupné z: [http://www.posiva.fi/files/4394/DOPAS\\_D4\\_7\\_EPSP\\_Summary\\_Report\\_v19c.pdf](http://www.posiva.fi/files/4394/DOPAS_D4_7_EPSP_Summary_Report_v19c.pdf)
- [60] SVOBODA, Jiří, Jaroslav PACOVSKÝ, Markéta DVOŘÁKOVÁ, Irena HANUSOVÁ, Petr VEČERNÍK a Dagmar TRPKOŠOVÁ. DOPAS EPSP experiment. *Geological Society, London, Special Publications*. 2017, **443**(1), 59-72. DOI: 10.1144/SP443.17. ISSN 0305-8719. Dostupné také z:



<http://sp.lyellcollection.org/lookup/doi/10.1144/SP443.17>

- [61] GARITT, Benoit. *Base Model Parameterisation*. NAGRA, 2016.
- [62] ŠTÁŠTKA, Jiří, Jaroslav PACOVSKÝ, Jiří SVOBODA, Lucie HAUSMANNOVÁ a Radek VAŠÍČEK. *Výstavba, provozování a vyhodnocení demonstračního experimentu Mock-Up-Josef (prodloužení 2016): XI. Dílčí zpráva*. Praha - ČVUT, 2016b.
- [63] KUMPULAINEN, Sirpa, Leena KIVIRANTA a Petri KORKEAKOSKI. Long-term effects of an iron heater and Äspö groundwater on smectite clays: Chemical and hydromechanical results from the <I>in situ</I> alternative buffer material (ABM) test package 2. *Clay Minerals*. 2016, **51**(2), 129-144. DOI: 10.1180/claymin.2016.051.2.02. ISSN 00098558. Dostupné také z: <http://openurl.ingenta.com/content/xref?genre=article>
- [64] DUECK, Ann, Lars-Erik JOHANNESSON, Ola KRISTENSSON a Siv OLSSON. *Report on hydro-mechanical and chemical-mineralgical analyses of the bentonite buffer in Canister Retrieval Test: SKB TR-11-07* [online]. Finland: Clay Technology, 2011, , 46 [cit. 2017-8-23]. ISSN 1404- 0344. Dostupné z: <http://www.skb.se/publication/2365903/TR-11-07.pdf>
- [65] ÅKESSON, Mattias, Ann DUECK, Ulf NILSSON a Ola KARNLAND. *Temperature buffer test Hydro-mechanical and chemical/ mineralogical characterizations: SKB P-12-06* [online]. In: . Stockholm: Clay Technology AB/ Svensk Kärnbränslehantering AB, 2012, **2012**, s. 84 [cit. 2017-8-23]. ISSN 1651- 4416.
- [66] KARNLAND, Ola, Siv OLSSON, Ann DUECK, Martin BIRGERSSON, Ulf NILSSON a Tania HERMAN-HÅKANSSON. *Long term test of buffer material at the Äspö Hard Rock Laboratory, LOT project: SKB TR-09-29* [online]. Stockholm: Svensk Kärnbränslehantering AB, 2009, , 279 [cit. 2017-8-23].
- [67] ZÁRUBA, Jiří, Jan FRANĚK, Karel SOSNA a Lukáš VONDROVIC. *Research on Thermally Loaded Rock - Perspectives of Underground Thermal Energy*



- Storage. In: *ISRM International Symposium - 8th Asian Rock Mechanics Symposium, 14-16 October, Sapporo, Japan*. 2014, s. 9. ISBN 978-4-907430-03-0. ISRM-ARMS8-2014-278.
- [68] SOSNA, Karel, Jan NAJSER, Zdeňka METELKOVÁ et al. *III – 5 Geologické popisné charakteristiky změn hostitelské horniny Dílčí zpráva za 3. etapu – Temperature a monitoring;: FR-T14/497 Výzkum stability bentonitu v in-situ podmínkách při teplotách do 95°C (Bentonit95)*. 1. Praha, 2014.
- [69] STEPHANSSON, Ove a Peter GIPPER. SWEDISH RADIATION SAFETY AUTHORITY. *Rock Mechanics - Thermal properties and thermal modelling of the rock in a repository of spent nuclear fuel at Forsmark*. 2015, 59 s. ISSN: 2000-0456. Dostupné také z:  
<https://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/Global/Publikationer/Rapport/Technical%20Note/2015/SSM-Rapport-2015-01.pdf>
- [70] IKONEN, Kari a Heikki RAIKO. *Thermal Dimensioning of Olkiluoto Repository for Spent Fuel: Working Report 2012-56* [online]. 2012. POSIVA, 2012 [cit. 2014-03-13]. Dostupné z: [http://www.posiva.fi/files/3143/WR\\_2012-56.pdf](http://www.posiva.fi/files/3143/WR_2012-56.pdf)
- [71] HANSEN, Johanna, Slimane DUODOU, Marjatta PALMU a Matt WHITE. *DOPAS Work Package 6 Deliverable D6.4: DOPAS Project Final Summary Report* [online]. b.r. [cit. 2017-10-14]. Dostupné z:  
[http://www.posiva.fi/files/4494/DOPAS\\_D6\\_4\\_31102016\\_final\\_ver8.pdf](http://www.posiva.fi/files/4494/DOPAS_D6_4_31102016_final_ver8.pdf)
- [72] SINNATHAMBY, Gowthaman, Leena KORKIALA-TANTTU a Juan GALLARDO FORÉS. Interface shear behaviour of tunnel backfill materials in a deep-rock nuclear waste repository in Finland. *Soils and Foundations*. 2014, **54**(4), 777-788. DOI: 10.1016/j.sandf.2014.06.027. ISSN 00380806. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038080614000894>
- [73] GENS, A., B. VALLEJÁN, M.T. ZANDARÍN a M. SÁNCHEZ. Homogenization in clay barriers and seals: Two case studies. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* [online]. 2013, **5**(3), 191-199 [cit.





- 2017-11-21]. DOI: 10.1016/j.jrmge.2013.04.003. ISSN 16747755. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1674775513000358>
- [74] IAEA, . *IAEA Safety Glossary, 2016 Revision*, [online]. Vienna, 2016 [cit. 2017-10-30]. Dostupné z: <https://www-ns.iaea.org/downloads/standards/glossary/iaea-safety-glossary-rev2016.pdf>
- [75] ŠTÁŠTKA, Jiří, Lucie HAUSMANNOVÁ a Radek VAŠÍČEK. Technologie stříkaných jíílů. In: *Zakládání staveb Brno 2010: sborník příspěvků ze 38. konference*. Brno: Sekurkon, 2010, s. 6.
- [76] CHO, Win-Jin, Jea-Owan LEE a Chul-Hyung KANG. Hydraulic Conductivity of Bentonite-Sand Mixture for A Potential Backfill Material for a High-level Radioactive Waste Repository. *Journal of the Korean Nuclear Society* [online]. b.r., **2000**(325), 9 [cit. 2015-01-09]. Dostupné z: <https://www.kns.org/jknsfile/v32/A04803285861.pdf>



## 12 PŘÍLOHY

### 12.1 Technologie stříkaných jíílů

Technologie stříkaných jíílů byla dobře popsána v článku [75], jehož je autor práce hlavní autorem.

#### TECHNOLOGIE STŘÍKANÝCH JÍLŮ

(příspěvek na konferenci Zakládání staveb Brno 2010)

**Ing. Jiří Štáštka, Bc. Lucie Hausmannová, Ing. Radek Vašíček, Ph.D.**

České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Centrum experimentální geotechniky

#### 1. Využití technologie

Technologie stříkaných jíílů je v ČR nová a vychází z techniky a postupů používaných pro suchý způsob pneumatické aplikace betonové směsi. Technologie stříkaných jíílů může být použita ve speciálních podzemních stavbách (např. v hlubinném úložišti radioaktivních odpadů) anebo při hydroizolacích pozemních a podzemních staveb apod. Pro použití v hlubinném úložišti probíhá výzkum pneumaticky aplikovaných jíílů od roku 2007. Pro řešené úkoly v rámci probíhajícího výzkumu je důležité odzkoušení dalšího možného strojního vybavení (tlakového torketovacího stroje) a odzkoušení nově navržených nástřikových směsí (např. bentonit s kamenivem, bentonit s cementem a kamenivem). Informace z výzkumu pomohou rozšíření metody pro řešení dalších geotechnických (geoenvironmentálních) problémů.



## 2. Vývoj technologie

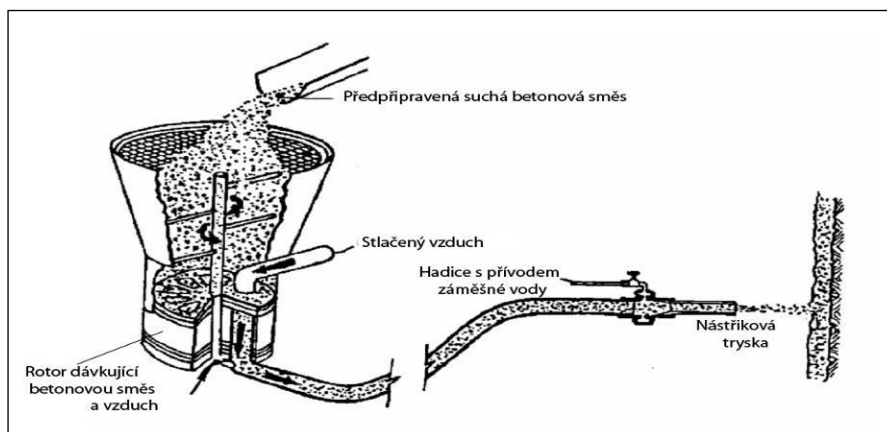
### a. Použitá technika

Technologie stříkaných jíílů vychází z technologie stříkaných betonů. Pro aplikaci stříkaného betonu se používají dva technologické postupy - „suchá a mokrá cesta“ [2]. Při „suché cestě“ se dopravuje od stroje nástřikový materiál pneumaticky hadicemi do nástřikové trysky, kde je v okamžiku výstupu z trysky zvlhčen. Hlavní předností této technologie je vyšší zhutnění nástřikovaného materiálu. Mezi přednostmi také patří možnost dopravovat suchou směs na dlouhé vzdálenosti, přerušování dopravního cyklu a „suchá cesta“ nevyžaduje čištění hadic. Mezi hlavní nevýhody patří zvýšená prašnost, která ovlivňuje pracovní prostředí a složení materiálu po aplikaci.

Technologie stříkání „mokrou cestou“ spočívá v dopravě mokré (provlhčené) nástřikové směsi od stroje hadicemi až do stříkací trysky. Mezi hlavní přednostmi patří minimální prašnost. Mezi hlavní nevýhody menší zhutnění nástřikované hmoty a hlavně u bentonitu velice obtížné provlhčení požadovaného objemu směsi v nástřikovém stroji.

Z uvedených důvodů byl veškerý výzkum stříkaných jíílů v Centru experimentální geotechniky prováděn pro suchou technologii stříkání. Strojní sestava použitá pro nástřik (nástřiková sestava) je složená z pěti částí. Prvním z částí je kompresor, u kterého je důležité množství dodávaného vzduchu do dopravního potrubí (výkon). Výkonem udělená výtoková rychlost také ovlivňuje hutnost materiálu po nástřiku. Další částí tzv. nástřikové sestavy je dávkovací stroj (nástřikový stroj- SSB 14 DUO o výkonu, výrobce Filamos s.r.o.). Pro stříkané jíily se používá stroj s jednostranným dávkovacím rotorem. Nástřiková směs se sype do násypky, která ústí do rotoru a ten poté směs přesně dávkuje do proudu stlačeného vzduchu. Množství nástřikovaného materiálu lze ovlivnit velikostí a rychlostí otáčení rotoru. Další částí je dopravní potrubí. Pro aplikaci materiálu se používají dva typy potrubí. První typ slouží pro transport stlačeného vzduchu od kompresoru do dávkovacího stroje. Druhý typ se používá pro transport směsi stlačeného vzduchu a aplikovaného materiálu od stroje do nástřikové trysky. Volbou průměru druhého typu potrubí lze regulovat výslednou kinetickou energii nástřiku a dostatečná délka umožňuje rovnoměrné promísení nástřikového materiálu s proudem stlačeného vzduchu. Tryska je poslední částí dopravy směsi k nástřikové ploše. V trysce dochází k promísení vody se směsí vzduchu a nástřikového

materiálu. Promísení musí být co možná nejvíce homogenní a má na něj vliv tvar a velikost trysky. Vzhledem k počátečním problémům se zacpáváním přívodních kanálků v trysce byla v CEG navržena nová SC tryska, která odstranila problémy mísení vody a nástřikového materiálu. Záměsová voda je dopravována k trysce hadicí s průtokoměrem, kterým lze i průtok regulovat.



Obrázek 1 - Schéma jednoho ze strojů pro stříkání betonové směsi „suchým způsobem“ (MAHAR, 1975)

Vzhledem k úspěchu dosaženému při průběhu realizovaných nástřiků se došlo k závěru, že odzkoušenou strojní sestavu již není nutné dále měnit, tzn. že je pro dosažený stupeň technologie stříkaných jíelů vyhovující.

Dalším logickým krokem bylo odzkoušet vyvinutou technologii i v reálném podzemním prostředí. Proto se CEG rozhodlo vystavět v provozované štole Josef ([www.uef-josef.eu](http://www.uef-josef.eu)) fyzikální model zaplnění přístupové štoly hlubinného úložiště s použitím jak klasické technologie hutnění backfillu klasickými hutnicími prostředky, tak s nově vyvinutou technologií stříkaného backfillu (Obrázek 2).



Obrázek 2 – Návrh zaplnění jedné z rozrážek štoly Josef a foto po realizaci modelu

Model umožnil odzkoušet vyvinutou technologii v „in situ“ prostředí, což je jednou z hlavních podmínek pro realizovaný výzkum. Model je technologicky rozdělen na dvě části. První část výplňového materiálu (směs bentonitu a horninové drtě) byla hutněná klasickým způsobem (vibrační deskou) a druhá část, tj. oblast přístropí neumožňující zhutnění materiálu vibrační deskou byla zaplněna vyvinutou technologií stříkaného backfillu (Obrázek 2).

Množství pneumatically aplikovaného materiálu při zaplňování modelu bylo velice nízké (cca okolo  $1 \text{ m}^3/\text{hod}$ ). Pro použití technologie při hlubinném ukládání je množství aplikovaného materiálu za časovou jednotku (výkon technologie) důležité. V současné době je v CEG zkoušena nová technika, která by měla zvýšit rychlost zaplňování štol. První testy ukázaly, že metoda může zvýšit rychlost, ale zatím nebylo dosaženo požadované hutnosti materiálu po nástřiku (okolo  $1400 \text{ Kg/m}^3$ ).

#### b. Vývoj nástřikových směsí

Materiálová směs pro stříkané jíly byla vyvinuta s ohledem na plánované použití při zaplňování přístupových štol v hlubinném úložišti radioaktivních odpadů. V hlubinném úložišti bude bránit úniku nebezpečných radionuklidů do biosféry takzvaný multibariérový systém (inženýrská a přírodní bariéra). Částí inženýrské bariéry je bariéra geotechnická (GB). Ta bude vystavěna z velmi nepropustných jílových materiálů (bentonitů). Použití jíly v GB je navrženo na základě tzv. přírodních analogů, ve kterých jíly zamezují migraci radionuklidů do biosféry už několik stovek tisíc let. GB lze rozdělit podle požadavků kladených na materiál a místa jeho použití. Buffer je



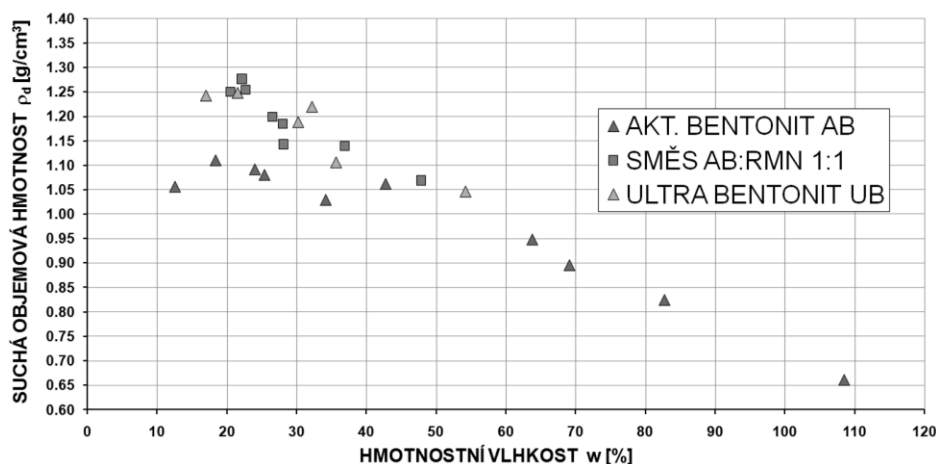
část GB s tlumicí a těsnicí funkcí, nachází se v těsné blízkosti ÚOS, jako nejvhodnější materiál se ukázal lisováním zhutněný bentonit. Backfill je druhou částí GB s funkcí výplňovou a bude vyplňovat přístupové štoly k úložným vrtům s UOS. V hlubinném úložišti, dle použité technologie, lze rozdělit backfill na část hutněnou a část zaplněnou nástřikem. Nástřikem se budou zaplňovat místa, které nelze zaplnit s použitím klasických hutnicích prostředků (vibrační desky a válce). To se týká především prostorů pod klenbou přístupových štol k úložným místům s UOS. Technologie stříkaných jíílů je tedy určena pro část zaplňovanou nástřikem tzv. Stříkaný Backfill.

Na bentonit, který bude základním materiálem při výstavbě GB, jsou kladeny tyto požadavky:

- a) velká bobtnací schopnost
- b) minimální propustnost
- c) velká plasticita
- d) schopnost samohojení

Bobtnací schopnost bentonitu je podmíněna mineralogickým složením (především obsahem montmorilonitu). Bobtnací schopnost se ověřuje měřením bobtnacího tlaku. Bobtnací tlak roste zvýšením suché objemové hmotnosti (jeho zhutněním). Také propustnost bentonitu závisí na suché objemové hmotnosti. Čím vyšší je suchá objemová hmotnost, tím menší je propustnost. Součinitel propustnosti (filtrace) bentonitu Rokle slisovaného na objemovou hmotnost  $1750 \text{ kg/m}^3$  je  $k=10^{-12}-10^{-13} \text{ m/s}$ . Nepropustnost bentonitu zabraňuje (minimalizuje) migraci nebezpečných radionuklidů kapalným médiem (vodou). Plasticita bentonitu je vlastnost, která se popisuje pomocí konzistencečních mezí - mez smrštění ( $w_s$ ), mez plasticity ( $w_p$ ) a mez tekutosti ( $w_L$ ). Všechny 3 meze jsou definovány vlhkostí, při které je dosaženo stanoveného limitního chování materiálu. Rozdíl meze tekutosti  $w_L$  a meze plasticity  $w_p$  vyjadřuje index plasticity  $I_p = w_L - w_p$ . V rozsahu vlhkosti mezi mezí  $w_L$  a  $w_p$  se materiál chová plasticky. Čím je tedy  $I_p$  větší, tím je materiál plastičtější. Materiál s vysokým indexem plasticity snadněji zaplňuje diskontinuity i při velkých změnách jeho vlhkosti (v rozsahu  $I_p$ ). Materiál Rokle má  $I_p$  okolo 70%. Schopnost samohojení je způsobena hlavně bobtnací schopností a vysokou plasticitou bentonitu [4].

Vzhledem k tomu, že se technologie sprayed backfill bude využívat v podzemních, uměle větraných prostorech, je nezbytné, aby byla vyvinuta technologie s minimální prašností. Při vývoji stříkaných jíílů byla vodítkem zkouška Proctor Standart, která u zemin stanovuje optimální vlhkost, při které je dosaženo maximálního zhutnění. Výsledky vlhkostí nástřikových materiálů vyhodnocených nástřiků korespondují s hodnotami optimální vlhkosti získaných ze zkoušky Proctor Standart pro jednotlivé nástřikové směsi.

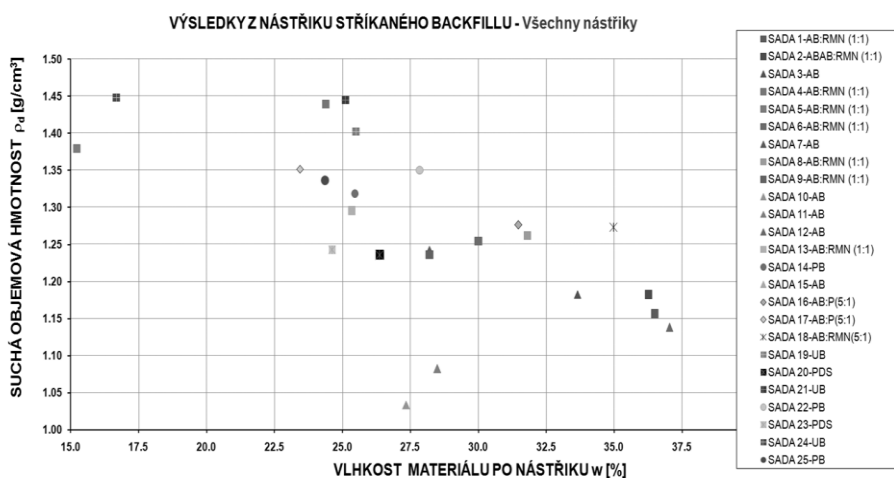


Obrázek 3- Zkouška Proctor Standart pro stanovení optimální vlhkosti (tři druhy nástřikových materiálů).

Optimalizace materiálu probíhala v několika etapách. Jednou z nejdůležitějších bylo ověření realizovatelnosti nástřiku při použití zvoleného materiálu (bentonit anebo směsi jej obsahující) a zvolené nástřikové sestavy. Optimální parametry nástřiku (minimalizovaná prašnost, vysoká objemová hmotnost nastříkaného materiálu ve vysušeném stavu) byly dosaženy při použití směsi aktivovaného bentonitu a mletého neaktivovaného bentonitu (použité značení AB:RMN 1:1). Tato směs byla označena jako I. optimální směs pro technologii stříkaných jíílů. Stala se výchozím materiálem pro druhou optimalizaci, která byla zahájena konzultacemi v úpravě bentonitů. Pro další fázi optimalizace byly vybrány tři druhy nástřikových materiálů. S ohledem na výsledky druhé optimalizace byla navržena finální směs (viz dále) pro technologii stříkaných jíílů.

### c. Výsledky výzkumu

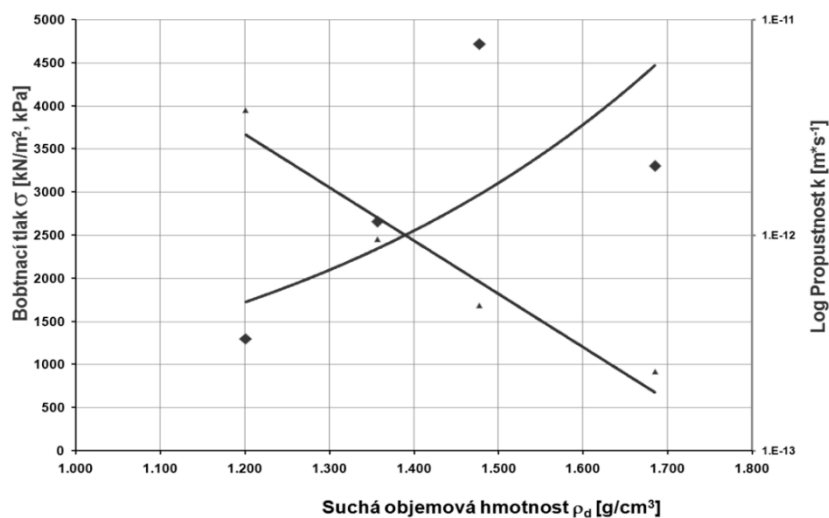
Během výzkumu byla definována základní metodika stříkaných jílu. Postupnou optimalizací materiálu, techniky a vodního součinitele byly dosaženy výsledky, které splňují požadovanou suchou objemovou hmotnost okolo 1400kg/m<sup>3</sup> při dodržení minimální prašnosti nástřiku. Také byla provedena modifikace nástřikové sestavy a v rámci výzkumu vzniká nový patent - SC Tryska, se kterou lze aplikovat i jemnozrnné materiály. Celkem se odebralo okolo sta vzorků a na základě vyhodnocení byla stanovena optimální směs (Obrázek 4). Jako nejvhodnější materiál pro Stříkané jíly byla stanovena průmyslově dodávaná směs tzv. Ultra bentonit – UB.



Obrázek 4 – Výsledky suché objemové hmotnosti v závislosti na vlhkosti

Požadované vlastnosti materiálu byly ověřeny zkouškami bobtnacího talku a propustnosti. Ze zkoušek vyplývá, že navržená optimální směs splňuje požadavky na použití při zaplnění přístupových štol plánovaného hlubinného úložiště. Propustnost Ultra bentonitu je  $k=10^{-12}$  m/s při nástřikem dosažené suché objemové hmotnosti okolo 1400 kg/m<sup>3</sup>(Obrázek 5). V dalším vývoji jsou zkoušeny směsi bentonitu a kameniva a to hlavně z důvodu možného využití kameniva z ražby štol hlubinného úložiště.





Obrázek 5 – Zkoušky propustnosti a bobtnacího tlaku pro optimální směs – Ultra bentonit UB

### 3. ZÁVĚR

Optimalizací techniky a materiálu byla v Centru experimentální geotechniky vyvinuta technologie výplňových směsí, která splňuje požadavky pro použití při podzemním ukládání radioaktivních odpadů. Technologie Stríkaných jíílů se odzkoušela při aplikaci v in-situ modelu zaplnění přístupových štol hlubinného úložiště radioaktivních odpadů. Tedy v podobných podmínkách a měřítku jako tomu bude při zaplňování štol v hlubinném úložišti. Vývoj je dále směřován k odzkoušení nové techniky a nových nástřikových směsí. Nová technika pro nástřik by měla výrazně zvýšit množství aplikovaného materiálu za časovou jednotku, ale zvýšení množství nesmí mít za následek výrazné snížení suché objemové hmotnosti aplikovaného materiálu po nástřiku (bentonitu), protože by došlo k negativnímu ovlivnění dalších vlastností a to např. k nepřijatelnému zvýšení propustnosti materiálu po aplikaci. Úprava složení nástřikových směsí (např. přidáním drceného kameniva) může snížit cenu směsi, ale opět musí být dosaženo požadované propustnosti.

#### Poděkování:

Tento výzkum byl realizován za podpory ČVUT projekt SGS10/242/OHK1/3T/11.



### **Použitá literatura pro článek**

- [1]MAHAR, J.W., (1975):Shotcrete practice in underground construction. US Dept. Transportation Report FRA-OR&D 75-90.Springfield,
- [2] POLÁK, P. a kol. (2003): Zásady pro používání stříkaného betonu. Český tunelářský komitét ITA/AITES, Praha,
- [3]PACOVSKÝ, J., ŠTÁŠKA, J., (2009): Development of sprayed backfill technology - ECOSUD 2009
- [4] PACOVSKÝ, J., (2006): The use of the Mock-up-Cz physical model in the design of engineered barriers. In: First International Conference on the Management of Natural Resources, Sustainable Development and Ecological Hazards., Bariloche, Argentina.

## 12.2 Odběry bentonitu z fyzikálního modelu

V této příloze jsou vypsány výsledky z odběrů z experimentu MCJ. Výsledky z odběrů byly použité pro analýzu chování bentonitové vrstvy a pro některé závěry této práce.

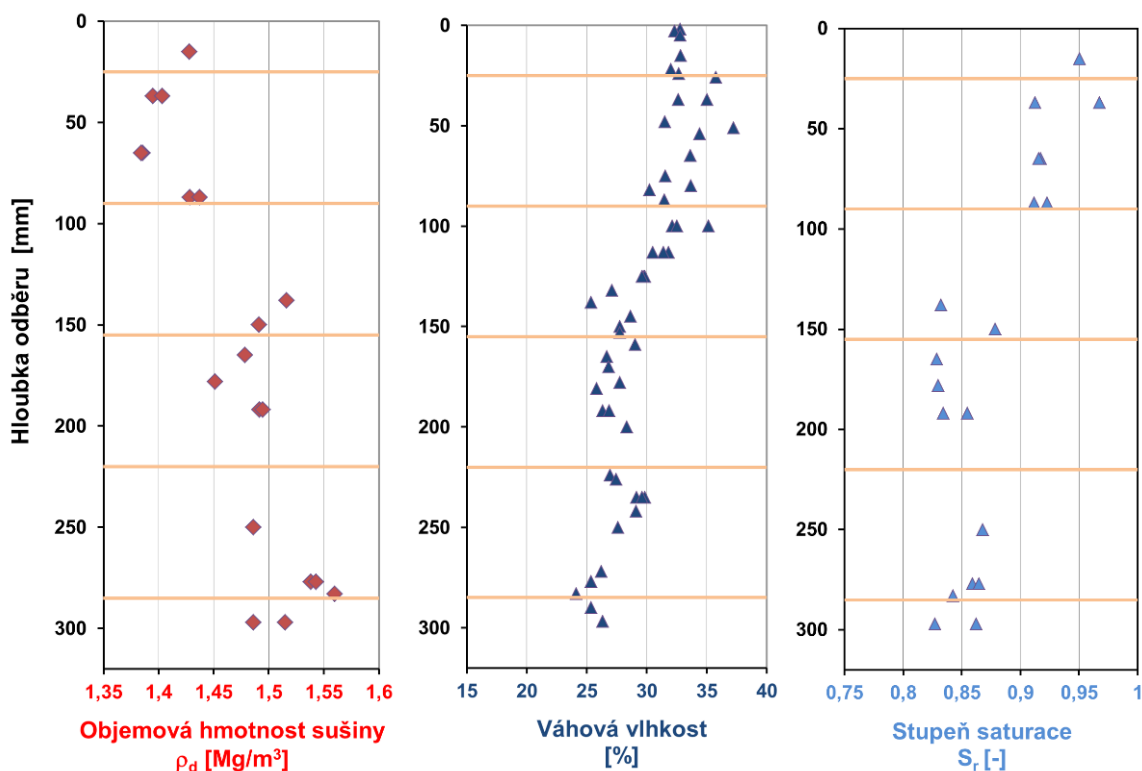
### 12.2.1 Odběr č. 1.

Provedení prvního odběru (26. 11. 2013) bylo bez výraznějších problémů. Pouze ve dvou případech bylo nutné bentonitové jádro rozlámat tak, aby mohlo být vyjmuté z vrtáku. Rozbitá jádra byla použita pouze pro stanovení hmotnostní vlhkosti bentonitu. Odběry byly provedeny z hloubky 0-32 cm (Obr. 85).



Obr. 85 – Jádra z prvního odvrtu

Pro vyhodnocení prvního odběru bylo analyzováno více než 50 vzorků. Nejvíce bylo provedeno zkoušek pro vyhodnocení vlhkosti. Dále byly určeny objemové hmotnosti ( $\rho$ ,  $\rho_d$ ) a výpočtem byl stanoven stupeň saturace ( $S_r$ ). (Obr. 86) znázorňuje výsledné hodnoty v závislosti na poloze odběru (hloubce od víka). Naznačeno je původní rozhraní vrstev bentonitových tvárnic.



Obr. 86 – Grafy s výsledky z prvního odběru (hnědě naznačeny spáry mezi bentonitovými segmenty)

### 12.2.2 Odběr č. 2.

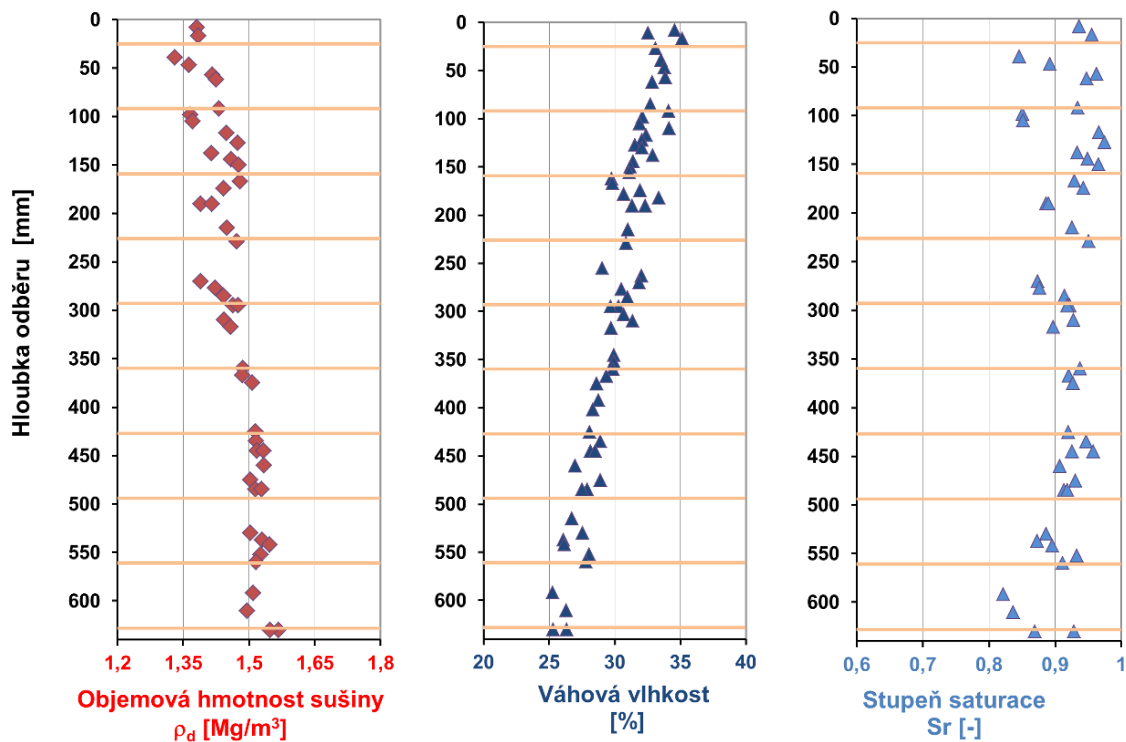
Pro druhý odběr byl jádrový vrták doplněn přípravkem pro snadnější vytlačování jádra. Druhý odběr (Obr. 87) byl proveden do dvojnásobné hloubky oproti prvnímu odběru (Obr. 29). Odběry byly tedy provedeny z hloubky 0-64 cm dne 28. 5. 2014.



Obr. 87 – Jádra z druhého odvrtu

Druhý odběr byl vyhodnocený stejným způsobem jako první. Byly odebrány vzorky pro stanovení objemové hmotnosti, vlhkosti a pro stanovení hydraulické vodivosti a bobtnacího tlaku. Celkem bylo analyzováno 120 vzorků na vlhkost a objemovou

hmotnost a výpočtem byl stanovený stupeň saturace bentonitové vrstvy (Obr. 88). Z druhého odběru byly odebrány i vzorky pro stanovení bobtnacího tlaku a hydraulické vodivosti.



Obr. 88 – Výsledky z 2. odběru (hnědě naznačeny spáry mezi bentonitovými segmenty)

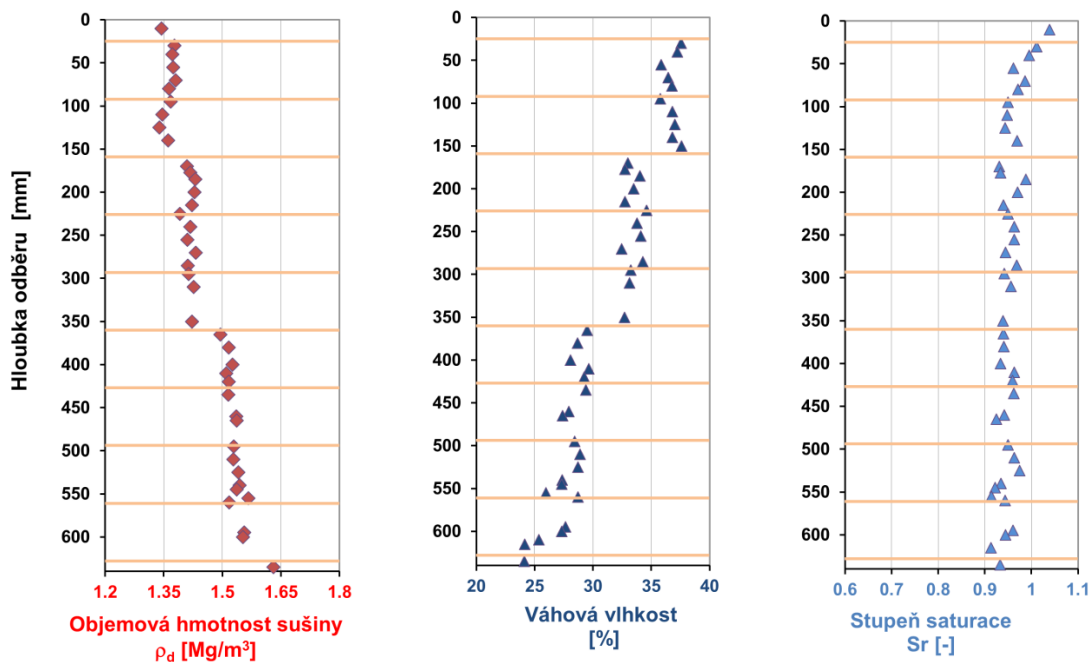
### 12.2.3 Odběr č. 3.

Odběr č. 3. byl (Obr. 89) realizován 30. 6. 2015 v místě odběru č. 1., ale do větší hloubky - 64 cm.



Obr. 89 – Jádra ze třetího odvrtu

Třetí odběr byl vyhodnocený stejným způsobem jako předchozí odběry. Byly odebrány vzorky pro stanovení objemové hmotnosti, vlhkosti a pro stanovení hydraulické vodivosti a bobtnacího tlaku. Zadavateli byly předány čtyři vzorky pro stanovení mineralogie. Celkem bylo analyzováno 110 vzorků na vlhkost (46 vzorků) a objemovou hmotnost (44 vzorků) a výpočtem byl stanovený stupeň saturace bentonitové vrstvy (Obr. 90). Z druhého odběru byly odebrány i vzorky pro stanovení bobtnacího tlaku a hydraulické vodivosti.



Obr. 90 – Výsledky ze 3. odběru (hnědě naznačeny spáry mezi bentonitovými segmenty)

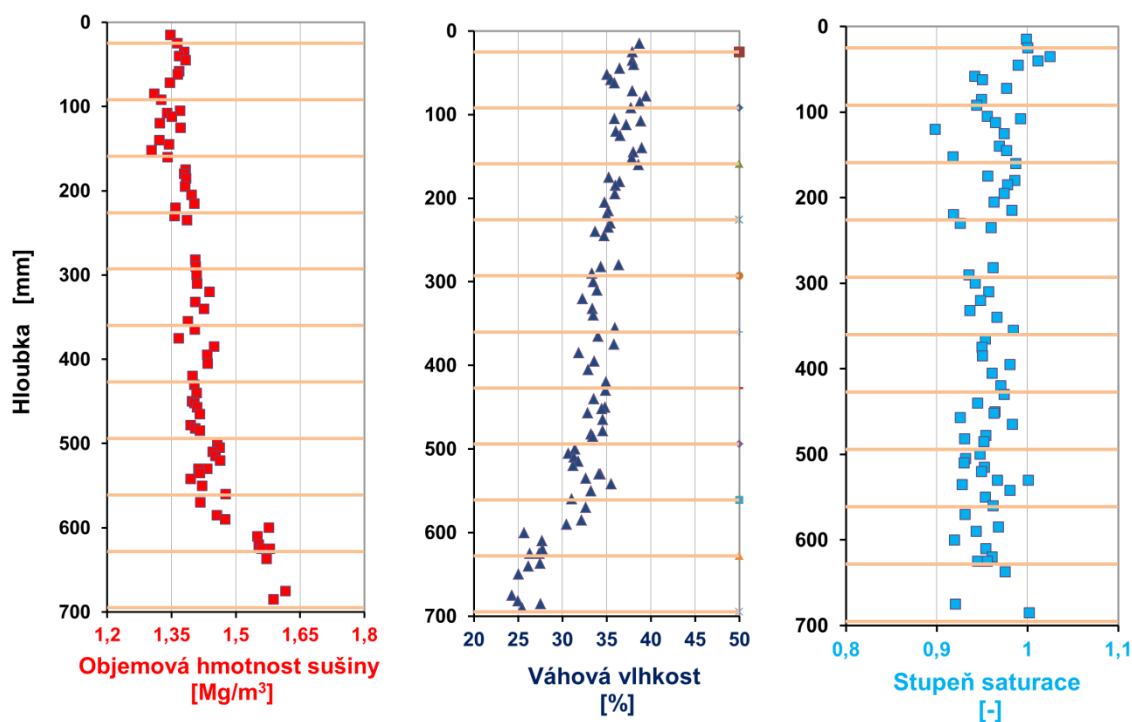
#### 12.2.4 Odběr č. 4.

Odběr č. 4. (Obr. 91) byl realizován 21. 7. 2016 v místě odběru č. 2. do hloubky – 68 cm.



Obr. 91 – Jádra ze čtvrtého odvrtu

I ze čtvrtého odběru byly odebrány vzorky pro stanovení objemové hmotnosti, vlhkosti a pro stanovení hydraulické vodivosti a bobtnacího tlaku. Zadavateli byly předány vzorky pro stanovení mineralogie. Celkem bylo analyzováno 168 vzorků na vlhkost (83 vzorků) a objemovou hmotnost (85 vzorků) a výpočtem byl stanovený stupeň saturace bentonitové vrstvy (Obr. 92).



Obr. 92 – Výsledky ze 4. odběru (hnědě naznačeny spáry mezi bentonitovými segmenty)

### 12.2.5 Odběr č. 5.

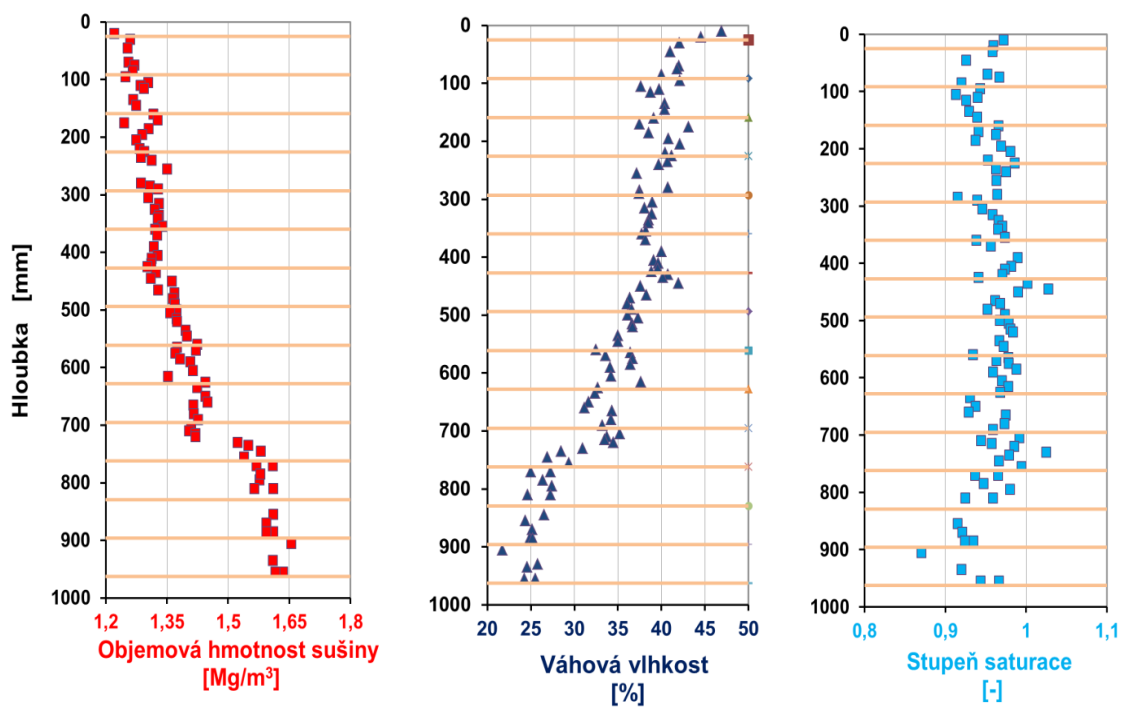
Odběr č. 5. byl (Obr. 93) realizován 7. 11. 2016 v místě odběru č. 2. do hloubky - 96 cm.



Obr. 93 – Jádra ze čtvrtého odvrtu (odvrt byl z důvodu fotodokumentace rozdělen na dvě části)

Třetí odběr byl vyhodnocený stejným způsobem jako předchozí odběry. Byly odebrány vzorky pro stanovení objemové hmotnosti, vlhkosti a pro stanovení hydraulické vodivosti a bobtnacího tlaku. Zadavateli byly předány čtyři vzorky pro stanovení mineralogie. Celkem bylo analyzováno 110 vzorků na vlhkost (46 vzorků) a objemovou hmotnost (44 vzorků) a výpočtem byl stanovený stupeň saturace bentonitové vrstvy (Obr. 93). Ze druhého odběru byly odebrány i vzorky pro stanovení bobtnacího tlaku a hydraulické vodivosti.





Obr. 94 – Výsledky z 5. odběru (hnědě naznačeny spáry mezi bentonitovými segmenty)



## 12.3 Vlastnosti tonalitu z místa experimentu MCJ

Tabulka 8 – Mechanicko fyzikální parametry tonalitu [68]

Blok	Orientace	Modul pružnosti [Gpa]	Modul přetvárnosti [Gpa]	Poissonovo číslo [-]	Pevnost v prostém tlaku [Mpa]	Objemová hmotnost vysušená [kg.m <sup>-3</sup> ]	Vlhkost vzdušná [%]	Pórovitost [%]
3	320/6	71,24	65,04	0,48	106,33	2682	0,1	1,67
		38,81	33,39	0,18	96,73	2614	0,39	3,85
		66,82	54,77	0,26	67,64	2679	0,08	1,59
		58,74	52,8	0,33	56,2	2648	0,11	2,31
		68,79	64,71	0,23	107,91	2680	0,11	1,53
	47/65	56,25	45,68	0,14	107,3	2701	0,1	0,94
		Tenzometry umístěny na puklině, nelze vyhodnotit.			45,19	2652	0,2	2,38
		70,22	69,7	0,19	94,48	2691	0,13	1,45
		Tenzometry umístěny na puklině, nelze vyhodnotit.			114,73	2706	0,07	1,11
		67,81	60,98	0,18	57,31	2647	0,1	2,02
4	320/6	79,98	79,09	0,26	79,02	2648	0,18	1,96
		58,91	52	0,2	101,75	2659	0,16	2,02
		49,44	46,05	0,18	58,38	2608	0,29	3,93
	47/65	79,03	79,33	0,22	25,98	2703	0,08	1,09
		38,6	23,63	0,17	109,7	2656	0,19	1,88
		44,75	38,25	0,22	130,28	2630	0,23	3,09



Blok	Orientace	Modul pružnosti [Gpa]	Modul přetvárnosti [Gpa]	Poissonovo číslo [-]	Pevnost v prostém tlaku [Mpa]	Objemová hmotnost vysušená [kg.m <sup>-3</sup> ]	Vlhkost vzdušná [%]	Pórovitost [%]
5	320/6	73,61	72,09	0,26	36,67	2720	0,09	1,09
		56,48	51,97	0,15	45,85	2658	0,23	2,15
	47/65	77,92	76,98	0,25	163,66	2721	0,16	0,43
		79,26	79,74	0,25	138,98	2753	0,14	0,56
medián		67,32	57,88	0,22	95,61	2669	0,14	1,77



Tabulka 9 – Termofyzikální vlastnosti tonalitu z Podzemní laboratoře Josef (měření provedené pro potřeby této práce, průměrný součinitel tepelné vodivosti 2,7 W/m/K)

Vzorek	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	Vlhkost [-]	Tepelná vodivost (λ) [W/m./K]	Objemová tepelná kapacita (c <sub>p</sub> ) [J/m <sup>3</sup> ./K*10 <sup>6</sup> ]	Tepelná kapacita výpočet (c=(c <sub>p</sub> /ρ) [J/kg./K]	Tepelná difuzivita (a) [m <sup>2</sup> /s*10 <sup>-6</sup> ]	Tmean [°C]	delta T [K]
TONALIT SP 51 (217) velký vzorek	2673	0,0014	2,6684	2,2189	830	1,2026	27,8410	9,6893
			2,5993	2,2116	827	1,1753	26,7980	9,6932
			2,7289	2,2636	847	1,2055	27,3520	9,7001
			2,6699	2,2402	838	1,1918	26,9940	9,7107
			2,7171	2,2603	846	1,2023	26,4510	9,6915
			2,7144	2,233	835	1,2154	24,1380	9,9988
	Aritmetický průměr pro 1. měření			2,6830	2,2379	837	1,1988	26,5957
TONALIT SP 51 (217) vzorek 14*14*4	2673	0,0014	2,8096	2,2554	844	1,2457	28,2160	9,7307
			2,8287	2,2664	848	1,2648	23,2460	9,6951
			2,7781	2,2499	842	1,2348	25,9490	9,7052
	Aritmetický průměr pro 2. měření			2,8055	2,2572	845	1,2484	25,8037
TONALIT SP 51 (217) trojúhelník kvádr vzorek 15*15*4	2673	0,0014	2,6369	2,1931	821	1,2024	26,9880	9,7055
			2,5975	2,1838	817	1,1895	27,4860	9,6859
			2,6427	2,2045	825	1,1988	26,4100	9,7008
	Aritmetický průměr pro 3. měření			2,6257	2,1938	821	1,1969	26,9613
TONALIT SP 51 (217) kvádr vzorek 7*5*20	2673	1,0014	2,7410	2,1415	801	1,2800	27,0600	9,7033
			2,8167	2,1272	796	1,3241	27,5420	9,7102
			3,0603	2,2736	851	1,3461	27,8370	9,7217
			3,0518	2,2924	858	1,3313	27,9500	9,7478
			2,8828	2,2685	849	1,2709	25,1510	9,7015
	průměr pro 4.			2,9175	2,2087	826	1,3204	27,5973



# 13 VYBRANÉ VÝSLEDKY Z MĚŘENÍ TERMOFYZIKÁLNÍCH VLASTNOSTÍ

## 13.1 GBM – Granulated Bentonite Mixture

Materiál	Nádobka	Objem [m <sup>3</sup> ]	Hmotnost t [kg]	Vlhkost [-]	Hmotnost suchého t [kg]	Objemov a hmotnost t [kg/m <sup>3</sup> ]	Suchá objemov a hmotnost t [kg/m <sup>3</sup> ]	Teplotná vodivost (A) [W/m.K]	Měrná tepelná kapacita (c) [J/m <sup>3</sup> .K** 10 <sup>3</sup> ]	Tepelná difuzivita (a) [m <sup>2</sup> /s]	T <sub>mean</sub> [°C]	delta T [K]	Suchá objemov a hmotnost t [g/cm <sup>3</sup> ]
NAGRA GBM	5l válec	4,60E-03	6,787	0,117	6,076	1475	1321	0,3500	1,4500	0,2400	22,500	9,9000	1,320891
NAGRA GBM	setřepaný	4,20E-03	6,787	0,117	6,076	1616	1447	0,3680	1,4600	0,2519	27,700	9,9000	1,44669
NAGRA GBM	setřepaný	4,00E-03	6,787	0,117	6,076	1697	1519	0,3801	1,4938	0,2545	27,800	9,8000	1,519024
NAGRA GBM	setřepaný	3,95E-03	6,787	0,117	6,076	1718	1538	0,4369	1,5250	0,2860	28,035	10,0280	1,538252
NAGRA GBM	úderný hutnidlem	3,90E-03	6,787	0,117	6,076	1740	1558	0,5020	1,5916	0,3150	28,134	9,9000	1,557974
NAGRA GBM	volně sypaný	4,00E-03	5,8	0,117	5,192	1450	1298	0,3193	1,4366	0,2780	27,900	9,6600	1,29812
NAGRA GBM	setřepaný	3,80E-03	5,8	0,117	5,192	1526	1366	0,3156	1,4204	0,2222	28,229	9,9600	1,366442
NAGRA GBM	setřepaný	3,60E-03	5,8	0,117	5,192	1611	1442	0,3669	1,4979	0,2449	28,449	9,9400	1,442356
NAGRA GBM	úderný hutnidlem	3,50E-03	5,8	0,117	5,192	1657	1484	0,4500	1,5287	0,2943	28,700	10,0200	1,483566
NAGRA GBM	volně sypaný	4,80E-03	7,10685	0,111	6,397	1481	1333	0,3612	1,4679	0,2460	17,667	9,9949	1,332668
NAGRA GBM	volně sypaný	4,80E-03	7,10685	0,111	6,397	1481	1333	0,3539	1,4640	0,2417	24,463	9,9407	1,332668
NAGRA GBM	volně sypaný	4,80E-03	7,10685	0,111	6,397	1481	1333	0,3590	1,4734	0,2436	25,276	9,9823	1,332668
NAGRA GBM	setřepaný	4,50E-03	7,10685	0,111	6,397	1579	1422	0,3893	1,4819	0,2627	26,090	9,9395	1,421512
NAGRA GBM	setřepaný	4,50E-03	7,10685	0,111	6,397	1579	1422	0,3872	1,5071	0,2569	26,246	10,0110	1,421512
NAGRA GBM	setřepaný	4,50E-03	7,10685	0,111	6,397	1579	1422	0,3724	1,5025	0,2479	24,860	10,0610	1,421512
NAGRA GBM	setřepaný (třepačka max)	4,10E-03	7,10685	0,111	6,397	1733	1560	0,4617	1,5573	0,2965	25,200	10,0120	1,560196
NAGRA GBM	setřepaný (třepačka max)	4,10E-03	7,10685	0,111	6,397	1733	1560	0,4831	1,5858	0,3046	25,420	9,9819	1,560196
NAGRA GBM	setřepaný (třepačka max)	4,10E-03	7,10685	0,111	6,397	1733	1560	0,4601	1,5911	0,2892	25,883	9,9576	1,560196



## 13.2 B 75 PEL 15 drcené

Material	Nádob	Objem [m <sup>3</sup> ]	Hmotnost t [kg]	Vlhkost [-]	Hmotnost suchého t [kg]	Objemov a hmotnost t [kg/m <sup>3</sup> ]	Suchá objemov a hmotnost t [kg/m <sup>3</sup> ]	Tepelná vodivost (λ) [W/m.K]	Měrná tepelná kapacita (c) [J/m <sup>3</sup> .K* 10 <sup>6</sup> ]	Tepelná difuzivita (a) [m <sup>2</sup> /s]	Tmean [°C]	delta T [K]	Suchá objemov a hmotnost t [g/cm <sup>3</sup> ]
B75 PEL 12 drcené	5 l válec	5,00E-03	6,6154	0,18	5,606	1323	1121	0,287	1,4169	0,2025	21,865	10,0000	1,121254
B75 PEL 12 drcené	5 l válec	5,00E-03	6,6154	0,18	5,606	1323	1121	0,314	1,4253	0,2204	22,735	9,9120	1,121254
B75 PEL 12 drcené	5 l válec	5,00E-03	6,6154	0,18	5,606	1323	1121	0,271	1,4186	0,1909	24,052	9,9801	1,121254
B75 PEL 12 drcené	5 l válec	4,50E-03	6,6154	0,18	5,606	1470	1246	0,308	1,4447	0,2130	20,310	9,9950	1,245838
B75 PEL 12 drcené	5 l válec	4,50E-03	6,6154	0,18	5,606	1470	1246	0,314	1,4256	0,2201	19,915	9,9411	1,245838
B75 PEL 12 drcené	5 l válec	4,50E-03	6,6154	0,18	5,606	1470	1246	0,300	1,4308	0,2097	20,938	9,9915	1,245838
B75 PEL 12 drcené	5 l válec	4,10E-03	6,6154	0,18	5,606	1614	1367	0,398	1,5266	0,2604	20,455	10,0380	1,367383
B75 PEL 12 drcené	5 l válec	4,10E-03	6,6154	0,18	5,606	1614	1367	0,349	1,5236	0,2291	22,963	9,9957	1,367383
B75 PEL 12 drcené	5 l válec	4,10E-03	6,6154	0,18	5,606	1614	1367	0,394	1,5142	0,2604	25,240	9,9903	1,367383
B75 PEL 12 drcené	úderý hutnidlem	3,90E-03	6,6154	0,18	5,606	1696	1438	0,457	1,6169	0,2827	27,857	10,0060	1,437505
B75 PEL 12 drcené	úderý hutnidlem	3,90E-03	6,6154	0,18	5,606	1696	1438	0,456	1,5552	0,2934	27,886	9,9781	1,437505
B75 PEL 12 drcené	úderý hutnidlem	3,90E-03	6,6154	0,18	5,606	1696	1438	0,429	1,4946	0,2871	27,800	9,9684	1,437505



## 13.3 REC MIX I

Materiál	Nádoba	Objem [m <sup>3</sup> ]	Hmotnost t [kg]	Vlhkost [-]	Hmotnost suchého t [kg]	Objemov á hmotnos t [kg/m <sup>3</sup> ]	Suchá objemov á hmotnos t [kg/m <sup>3</sup> ]	Tepelná vodivost (λ) [W/m.K]	Měrná tepelná kapacita (c) [J/m <sup>3</sup> .K* 10 <sup>3</sup> ]	Tepelná difuzivita (a) [m <sup>2</sup> /s]	T <sub>mean</sub> [°C]	delta T [K]	Suchá objemov á hmotnos t [g/cm <sup>3</sup> ]
	5l válec	5,00E-03	7,0777	0,065	6,646	1416	1329	0,2727	1,4739	0,185	30,313	9,9327	1,329146
	5l válec	5,00E-03	7,0777	0,065	6,646	1416	1329	0,2623	1,4585	0,1798	30,643	9,9262	1,329146
	5l válec	5,00E-03	7,0777	0,065	6,646	1416	1329	0,2744	1,4741	0,1861	30,887	9,9482	1,329146
	5l válec	4,60E-03	7,0777	0,065	6,646	1539	1445	0,289	1,4751	0,1959	31,229	10,04	1,444723
	5l válec	4,60E-03	7,0777	0,065	6,646	1539	1445	0,2912	1,4771	0,1971	29,111	9,9629	1,444723
	5l válec	4,60E-03	7,0777	0,065	6,646	1539	1445	0,3013	1,4624	0,206	29,054	9,8914	1,444723
	5l válec	4,30E-03	7,0777	0,065	6,646	1646	1546	0,3133	1,4808	0,2116	29,493	9,9455	1,545518
	5l válec	4,30E-03	7,0777	0,065	6,646	1646	1546	0,3249	1,4951	0,2173	27,859	10,047	1,545518
	5l válec	4,30E-03	7,0777	0,065	6,646	1646	1546	0,3342	1,4964	0,2234	28,289	9,9321	1,545518
	5l válec	5,00E-03	6,88497	0,065	6,465	1377	1293	0,2672	1,4598	0,183	24,622	9,9195	1,292952
	5l válec	5,00E-03	6,88497	0,065	6,465	1377	1293	0,266	1,4618	0,192	25,503	9,9675	1,292952
	5l válec	5,00E-03	6,88497	0,065	6,465	1377	1293	0,2547	1,4443	0,1763	25,606	9,9175	1,292952
	5l válec	4,50E-03	6,88497	0,065	6,465	1530	1437	0,2792	1,4657	0,1905	25,876	9,9573	1,436613
	5l válec	4,50E-03	6,88497	0,065	6,465	1530	1437	0,2917	1,4745	0,1978	24,9	9,9535	1,436613
	5l válec	4,50E-03	6,88497	0,065	6,465	1530	1437	0,2763	1,4808	0,1866	25,181	9,9508	1,436613
	5l válec	4,10E-03	6,88497	0,065	6,465	1679	1577	0,3698	1,5515	0,2383	25,671	9,9931	1,576771
	5l válec	4,10E-03	6,88497	0,065	6,465	1679	1577	0,3748	1,5611	0,2401	25,852	9,9789	1,576771
	5l válec	4,10E-03	6,88497	0,065	6,465	1679	1577	0,3723	1,5686	0,2373	23,636	10,023	1,576771



## 13.4 REC MIX II

Materiál	Nádoba	Objem [m <sup>3</sup> ]	Hmotnost t [kg]	Vlhkost [-]	Hmotnost suchého t [kg]	Objemov á hmotnos t [kg/m <sup>3</sup> ]	Suchá objemov á hmotnos t [kg/m <sup>3</sup> ]	Tepelná vodivost (λ) [W/m.K]	Měrná tepelná kapacita (c) [J/m <sup>3</sup> .K.10 <sup>6</sup> ]	Tepelná difuzivita (a) [m <sup>2</sup> /s]	Tmean [°C]	delta T [K]	Suchá objemov á hmotnos t [g/cm <sup>3</sup> ]
REC MIX II (1/1)	5 l válec	5,00E-03	6,8604	0,065	6,442	1372	1288	0,248	1,4739	0,1850	30,313	9,9327	1,288338
REC MIX II (1/1)	5 l válec	5,00E-03	6,8604	0,065	6,442	1372	1288	0,241	1,4585	1,1798	30,643	9,9262	1,288338
REC MIX II (1/1)	5 l válec	5,00E-03	6,8604	0,065	6,442	1372	1288	0,263	1,4741	0,1861	30,887	9,9482	1,288338
REC MIX II (1/1)	5 l válec	4,70E-03	6,8604	0,065	6,442	1460	1371	0,279	1,4587	0,1910	27,754	10,0090	1,370572
REC MIX II (1/1)	5 l válec	4,70E-03	6,8604	0,065	6,442	1460	1371	0,264	1,6543	0,1814	28,171	9,9518	1,370572
REC MIX II (1/1)	5 l válec	4,70E-03	6,8604	0,065	6,442	1460	1371	0,247	1,4389	0,1700	28,443	9,9590	1,370572
REC MIX II (1/1)	5 l válec	4,50E-03	6,8604	0,065	6,442	1525	1431	0,283	1,4678	0,1929	28,546	9,9163	1,431487
REC MIX II (1/1)	5 l válec	4,50E-03	6,8604	0,065	6,442	1525	1431	0,279	1,4627	0,1912	26,439	9,9491	1,431487
REC MIX II (1/1)	5 l válec	4,50E-03	6,8604	0,065	6,442	1525	1431	0,282	1,4619	0,1933	26,625	9,9899	1,431487
REC MIX II (1/1)	5 l válec	4,40E-03	6,8604	0,065	6,442	1559	1464	0,325	1,5109	0,2157	27,472	9,9762	1,46402
REC MIX II (1/1)	5 l válec	4,40E-03	6,8604	0,065	6,442	1559	1464	0,320	1,4962	0,214	28,023	10,0290	1,46402
REC MIX II (1/1)	5 l válec	4,40E-03	6,8604	0,065	6,442	1559	1464	0,314	1,4843	0,2148	28,001	9,9723	1,46402
REC MIX II (1/1)	5 l válec	4,90E-03	6,84135	0,065	6,424	1396	1311	0,247	1,4423	0,1719	24,405	10,009	1,31098
REC MIX II (1/1)	5 l válec	4,90E-03	6,84135	0,065	6,424	1396	1311	0,241	1,4404	0,1675	27,315	9,9708	1,31098
REC MIX II (1/1)	5 l válec	4,90E-03	6,84135	0,065	6,424	1396	1311	0,263	1,4476	0,1817	27,473	9,9344	1,31098
REC MIX II (1/1)	5 l válec	4,70E-03	6,84135	0,065	6,424	1456	1367	0,278	1,4587	0,191	27,754	10,009	1,366767
REC MIX II (1/1)	5 l válec	4,70E-03	6,84135	0,065	6,424	1456	1367	0,264	1,4563	0,1814	28,171	9,9518	1,366767
REC MIX II (1/1)	5 l válec	4,70E-03	6,84135	0,065	6,424	1456	1367	0,244	1,4389	0,17	28,443	9,9592	1,366767
REC MIX II (1/1)	5 l válec	4,50E-03	6,84135	0,065	6,424	1520	1428	0,283	1,4678	0,1929	28,546	9,91363	1,427512
REC MIX II (1/1)	5 l válec	4,50E-03	6,84135	0,065	6,424	1520	1428	0,279	1,4627	0,1912	26,439	9,9491	1,427512
REC MIX II (1/1)	5 l válec	4,50E-03	6,84135	0,065	6,424	1520	1428	0,282	1,4619	0,1933	26,625	9,9899	1,427512
REC MIX II (1/1)	5 l válec	4,30E-03	6,84135	0,065	6,424	1591	1494	0,325	1,5109	0,2157	27,472	9,9762	1,493908
REC MIX II (1/1)	5 l válec	4,30E-03	6,84135	0,065	6,424	1591	1494	0,320	1,4962	0,214	28,023	10,029	1,493908
REC MIX II (1/1)	5 l válec	4,30E-03	6,84135	0,065	6,424	1591	1494	0,314	1,4843	0,2118	28,001	9,9723	1,493908
REC MIX II (1/1)	5 l válec	5,00E-03	6,84135	0,065	6,424	1368	1285	0,269	1,4787	1,82E-01	24,534	9,9777	1,284761
REC MIX II (1/1)	5 l válec	5,00E-03	6,84135	0,065	6,424	1368	1285	0,268	1,4652	1,84E-01	25,294	9,9798	1,284761
REC MIX II (1/1)	5 l válec	4,70E-03	6,84135	0,065	6,424	1456	1367	0,279	1,4612	1,91E-01	25,659	9,9459	1,366767
REC MIX II (1/1)	5 l válec	4,70E-03	6,84135	0,065	6,424	1456	1367	0,275	1,4634	1,88E-01	26,206	9,9094	1,366767
REC MIX II (1/1)	5 l válec	4,70E-03	6,84135	0,065	6,424	1456	1367	0,281	1,4824	1,90E-01	25,299	9,9221	1,366767
REC MIX II (1/1)	5 l válec	4,50E-03	6,84135	0,065	6,424	1520	1428	0,302	1,4733	2,05E-01	25,409	9,9916	1,427512
REC MIX II (1/1)	5 l válec	4,50E-03	6,84135	0,065	6,424	1520	1428	0,304	1,4826	2,05E-01	25,793	10,0010	1,427512
REC MIX II (1/1)	5 l válec	4,50E-03	6,84135	0,065	6,424	1520	1428	0,296	1,4765	2,01E-01	25,879	9,9441	1,427512
REC MIX II (1/1)	5 l válec	4,30E-03	6,84135	0,065	6,424	1591	1494	0,370	1,5134	2,23E-01	26,122	9,9668	1,493908
REC MIX II (1/1)	5 l válec	4,30E-03	6,84135	0,065	6,424	1591	1494	0,332	1,5208	2,19E-01	26,325	9,9870	1,493908
REC MIX II (1/1)	5 l válec	4,30E-03	6,84135	0,065	6,424	1591	1494	0,334	1,5185	2,20E-01	25,287	9,9879	1,493908