
**NÁVRH A VÝROBA SMĚSI
BENTONITOVÝCH PELET**

1. PRŮBĚŽNÁ ZPRÁVA

Autoři:

prof. Ing. Jaroslav Pacovský, CSc.; Ing. Jirí Šťástka
a kolektiv

Poskytovatel:

Společnost „ČVUT-SATRA-Mott MacDonald CZ“

Zastoupena:

České vysoké učení technické v Praze,
Veřejná vysoká škola

Sídlo:

Zikova 1903/4, 160 00 Praha 6

Praha, listopad 2017

Název projektu: Výzkumná podpora pro projektové řešení HÚ

Název dílčího projektu: Návrh a výroba směsi bentonitových pelet

Název dílčí zprávy: 1. Průběžná zpráva – Shrnutí stávajícího stavu řešené problematiky a návrh prací

Evidenční číslo: SURAO 2017-3842

Číslo smlouvy zadavatele: SO2016-017

č. zakázky: Z2013-0122/010

Poskytovatel:
Společnost „ČVUT-SATRA-Mott MacDonald CZ“

Zastoupena:

České vysoké učení technické v Praze,

Veřejná vysoká škola

Sídlo:

Zikova 1903/4, 160 00 Praha 6

| | Funkce | Jméno | Datum | Podpis |
|------------------|--|--|-------|--------|
| Za Objednatele | Osoba pověřená k jednání ve věcech smluvních a technických | Ing. Ilona Pospíšková Ing. Jaromír Augusta, Ph.D. | | |
| | Osoba odpovědná za technickou část | Ing. Lucie Hausmannová, PhD. | | |
| Za Poskytovatele | Osoba pověřená k jednání ve věcech smluvních | Prof. Ing. Petr Konvalinka, CSc. | | |
| | Osoba pověřená k jednání ve věcech technických | Ing. Alexandr Butovič, Ph.D. | | |
| | Vedoucí expertního týmu | prof. Ing. Jaroslav Pacovský, CSc. | | |

Obsah

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Úvod | 10 |
| 2 | Technologické možnosti výroby bentonitových pelet | 11 |
| 3 | Možnosti využití bentonitových pelet v konstrukci HÚ | 13 |
| 3.1 | Technologické spáry při konstrukci bufferu..... | 13 |
| 3.2 | Těsnicí vrstva okolo ÚOS | 15 |
| 3.3 | Těsnicí zátky oddělující uzavřené ukládací prostory..... | 16 |
| 3.4 | Vyplnění přístupových tunelů | 17 |
| 3.5 | Šachty a komíny..... | 18 |
| 3.6 | Zaplnění vrtů po geologickém průzkumu | 19 |
| 4 | Zkušenosti s výrobou pelet na území ČR | 20 |
| 4.1 | Výroba protlačováním maticí..... | 20 |
| 4.1.1 | Pelety o průměru 8 mm | 22 |
| 4.1.2 | Pelety o průměru 12 mm – B75 PEL 12 | 23 |
| 4.1.3 | Vyhodnocení zkoušek lisování a poloprovozní zkoušky | 24 |
| 4.1.4 | Plnoprovozní zkouška lisování bentonitových pelet B75 PEL 12 | 25 |
| 4.1.5 | Drcený materiál z B75 PEL 12 | 27 |
| 4.2 | Výroba pelet lisováním mezi válci..... | 28 |
| 4.3 | Porovnání výsledků pelet B75 PEL 12 a REC | 29 |
| 4.4 | Bentonitová vrstva v EPSP experimentu (DOPAS projekt) | 30 |
| 5 | Vybrané zkušenosti ze zahraničních projektů | 31 |
| 5.1 | Finsko | 31 |
| 5.2 | Švýcarsko | 33 |
| 5.3 | Francie..... | 34 |
| 5.4 | Japonsko..... | 36 |
| 6 | Diskuse a závěry z rešerše | 37 |
| 7 | Návrh prací | 38 |
| 7.1 | Technologie | 38 |
| 7.2 | Harmonogram projektu..... | 40 |
| 8 | Závěr | 42 |
| 9 | Bibliografie | 43 |

Seznam obrázků

- Obr. 1 – Možnosti výroby pelet [4] – uvedená reference popisuje 3 hlavní skupiny pro lisování pelet a to a) Compaction Type – pelety lisované 1) Tablet Compression – lisované pomocí forem na jednotlivé pelety 2) Cold Isostatic – lisované stlačením vzduchem v membráně (gumě) b) Chunk Type – pelety (drtě) vzniklé 1) Roll Press Type - lisováním mezi hladkými válci; 1) 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).....12
- Obr. 2 – Konstrukční řešení úložného místa pro ÚOS ve finském konceptu [9] 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) 14
- Obr. 3 – Různé způsoby výstavby bentonitové vrstvy v HÚ s vyznačením možného využití bentonitových pelet [10]..... 15
- Obr. 4 – Schématické zobrazení místa využití 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) [13]..... 16
- Obr. 5 – Na obrázku je znázorněno konstrukční řešení úložného místa pro ÚOS ve finském konceptu s vyznačením bentonitových pelet (Pellets filling) pro zaplnění spáry mezi bloky (Backfill blocks) a horninou (Rock) při zaplnění přístupových štol [14]..... 17
- Obr. 6 – Schéma experimentu zaplnění šachty v podzemní laboratoři HADES v MOL (Belgie) a vpravo obrázek zkoušené bentonitové směsi (50 % pelet a 50 % prášku) [15]..... 18
- Obr. 7 – Koncepty pro zaplnění průzkumných vrtů v [16] První možnost zleva předpokládá využití lisovaných bentonitových bloků v perforovaném měděném obalu, druhá možnost je „kontejner“ s bentonitovými bloky, třetí možnost je zaplnění vrtu bentonitovými peletami a čtvrtá možnost je zaplnění vrtu bentonitovými bloky umístěnými na tyči. 19
- Obr. 8 – Výrobní linka pro lisování pelet. Na obrázku jsou zřejmé dva pásové dopravníky. Horní pásový dopravník sype zvlhčený materiál do stroje, ve kterém se zhutňují pelety protlačováním skrz matici. Bentonitové pelety ze stroje samovolně vypadávají na spodní pásový dopravník, který dopravuje pelety k expedičnímu místu. (interní materiály poskytovatele). 21
- Obr. 9 – Obrázek matrice pro zhutňování pelet vlevo 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 [6]. 21
- Obr. 10 – Fotografie vylisovaných bentonitových pelet o průměru 8 mm (interní materiály poskytovatele). 22
- Obr. 11 – Fotografie vylisovaných bentonitových pelet o průměru 12 mm (interní materiály poskytovatele). 23
- Obr. 12 – Závislost objemové hmotnosti sušiny na vlhkosti lisovaného bentonitu v průběhu zkoušek v ČLUZ a.s. V grafu jsou bentonitové pelety nyní značené jako B75 PEL (průměr 12

| | |
|---|----|
| mm a 8 mm), popsány jako Ryn Pel. (interní materiály poskytovatele). Číslo (1 až 7) v popisu za Pel označuje pořadí zkoušky. | 24 |
| Obr. 13 – Bentonitové pelety o průměru 12 mm (B75 PEL 12) z plno provozní zkoušky lisování, rychlost lisování 1 tuna za 1 hodinu (interní materiály poskytovatele). | 25 |
| Obr. 14 – Výsledky objemové hmotnosti sušiny a vlhkosti lisovaného bentonitu při plno provozní zkoušce (interní materiály poskytovatele). | 26 |
| Obr. 15 – Zrnitostní křivky z rozborů B75 PEL 12 (slabé barevné čáry) po plno provozní zkoušce; vypočítaná průměrná zrnitost (oranžově silně), teoretická „ideální“ - Fullerova křivka pro B75 PEL 12 (světle modrá silně), (interní materiály poskytovatele). | 26 |
| Obr. 16 – Experimentální drcení B75 PEL 12 s cílem úpravy zrnitosti mj. byla zjištěna také možnost zhutnění v určitém objemu, ale tento výsledek není důležitý pro tuto práci (interní materiály poskytovatele). | 27 |
| Obr. 17 – Křivky zrnitosti B 75 PEL 12; modrá čára je vypočítaná křivka podle Fullerovy studie; oranžová čára znázorňuje průměr B75 PEL 12 po plno provozní zkoušce lisování ve výrobě (pytlovaný materiál, zrnitost z různých pytlů) a černá čára zobrazuje křivku zrnitosti pro drcené pelety B 75 PEL 12 (interní materiály poskytovatele) po zkouškách hutnění (drcení). | 27 |
| Obr. 18 – Grafické znázornění dosažených objemových hmotností sušin (zhutnění) pelet; modře jsou znázorněny hodnoty pro B75 PEL 12 a červeně hodnoty pro materiál označený jako REC (větší červená značka označuje průměrnou hodnotu pro REC zkoušeného v rámci projektu DOPAS). | 29 |
| Obr. 19 – Konstrukční řešení zátky EPSP – svislý řez osou rozřáčky [21]. | 30 |
| Obr. 20 – Bentonitové pelety ve finském výzkumu pro zaplnění technologické spáry; vlevo bentonitové pelety z technologie protlačování skrz matici; vpravo bentonitové pelety zhotovené lisováním mezi válci s otvory, do kterých je bentonit zatlačován [6]. | 31 |
| Obr. 21 – Finské pelety (nahore) a drtě (dole) zkoušené v práci [3]. | 32 |
| Obr. 22 – Řešení horizontálního způsobu ukládání VJP ve Švýcarsku [24]. | 33 |
| Obr. 23 – Stroj se šnekovými dopravníky pro aplikaci GBM v FE experimentu [26], který GBM nejenom dopravuje, ale také jej dohutňuje. | 34 |
| Obr. 24 – Zobrazení francouzského způsobu ukládání [27]. | 34 |
| Obr. 25 – Obrázek z testování aplikace bentonitových pelet dvěma šnekovými dopravníky; vlevo zkoušky v boxu a vpravo obrázek ze zkoušky ve větším měřítku [12]. | 35 |
| Obr. 26 – Obrázky z výstavby bentonitové vrstvy z pelet v FSS experimentu [12]. | 35 |
| Obr. 27 – Obrázky a schémata japonského experimentu pro odzkoušení využití pelet při horizontálním způsobu ukládání [4]. | 36 |
| Obr. 28 – Obrázky vybraných bentonitových pelet a jejich vlastnosti pro japonský experiment popsáný v [4]. V tabulce jsou uvedené objemové hmotnosti jednotlivých pelet (zrn) – Dry density (Grain); Objemové hmotnosti volně sypaných pelet- Dry density (Bulk); hydraulická vodivost – Hydraulic conductivity; Součinitel tepelné vodivosti – Thermal conductivity. | 37 |
| Obr. 29 – Obrázky prvních testovaných materiálů v laboratořích u dodavatele; vlevo je materiál, který je po lisování „mezi válci“ a částečně podrcený a vpravo je materiál, který byl vylisovaný v kolovém mlýnu. | 39 |

Seznam tabulek:

| | |
|--|----|
| Tabulka 1 – procentuální zastoupení zrn REC (interní materiály poskytovatele) | 28 |
| Tabulka 2 – Orientační výsledky objemových hmotností sušiny pro B 75 PEL 12, B75 PEL drcené a REC (dvě zrnitosti):..... | 29 |
| Tabulka 3 – Vlastnosti zkoušených pelet a drtí v [3]. V tabulce jsou uvedené 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 nasypání pelet (Poured Bulk density)a objemové hmotnosti sušiny těchto pelet (Dry Density)..... | 32 |
| Tabulka 4 – Vlastnosti zkoušených drtí v [3]. V tabulce jsou uvedené vlastnosti zkoušených drtí např. zrnitostní složení (particle size), vlhkosti (water content) a objemové hmotnosti po sypání (Bulk density) | 33 |

Seznam textových příloh:

Seznam elektronických příloh:

Seznam použitých zkratk:

B75 PEL 12 bentonitové pelety o průměru 12 mm lisované protlačováním skrz matrici z průmyslově dodávaného Bentonitu 75 (B75)

EBS Engineered Barrier Systems, systém inženýrských bariér

HÚ hlubinné úložiště

HMG harmonogram

RAO radioaktivní odpad

REC bentonitové pelety (destičky) lisované mezi válci

ÚOS úložný obalový soubor

VJP vyhořelé jaderné palivo


BCV 2017 bentonit z ložiska Černý vrch dodaný objednatelem

Vymezení pojmů:

Buffer - tlumící 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 [1]

Backfill – výplňový materiál použitý pro vyplnění tunelů v úložišti po uložení odpadů [1]

Fullerova studie – práce, jejímž výsledkem je 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

| | | |
|--|--|---------------------|
|  SÚRAO | Návrh a výroba směsi bentonitových pelet 1. Průběžná zpráva | Evidenční označení: |
| | | (doplň SÚRAO) |

Abstrakt

Cílem projektu je navržení a výroba vhodné směsi bentonitových pelet pro využití v hlubinném úložišti. Z hlediska transportu radionuklidů je důležitá nízká hydraulická vodivost bentonitu, která exponenciálně klesá se zvyšující se objemovou hmotností sušiny bentonitu. Hlavním cílem projektu je tedy navržení a výroba směsi pelet s co nejvyšší objemovou hmotností. Dalším významným požadavkem je možnost průmyslové výroby. Prvním dílčím cílem je tato rešerše, která shrnuje české a některé zahraniční zkušenosti s výrobou bentonitových pelet, drtí, jejich směsí apod. Ve zprávě jsou také uvedené možnosti využití bentonitových pelet v konstrukci hlubinného úložiště. Na závěr je uveden návrh prací pro další období řešení projektu.

Klíčová slova


Bentonit, pelety, lisování, český bentonit, hlubinné úložiště, vlhkost, objemová hmotnost, zhutnění

Abstract

The objective of the project is to design and manufacture a mixture of bentonite pellets for use in deep geological repositories. With respect to the potential transport of radionuclides, it is important that the bentonite material displays a very low value of hydraulic conductivity. Hydraulic conductivity decreases exponentially with the dry density of bentonite. The aim of the project is not only to design and produce a bentonite pellet mixture but also to attain the highest pellets/pellet mixture density. Moreover, the potential for future industrial production makes up an additional project requirement. The first part of the report will consist of an investigation of both Czech and foreign experience with the production of bentonite pellets (pellets, mixtures, etc.), which will be followed by a discussion on the potential for the use of bentonite pellets during the deep geological repository construction phase. The final part of the report will outline the proposed work schedule for the coming months.

Keywords

Bentonite, pellets, compaction, Czech bentonite, Deep Geological Repository, water content, density, compaction

| | | |
|--|--|---------------------|
|  SÚRAO | Návrh a výroba směsi bentonitových pelet 1. Průběžná zpráva | Evidenční označení: |
| | | (doplň SÚRAO) |


1 Úvod

Cílem výzkumu je navržení a výroba bentonitových pelet z průmyslově dodávaného materiálu – neaktivovaného Ca-Mg bentonitu z ložiska Černý vrch (BCV 2017). Prvním dílčím cílem projektu je shrnutí stávajícího stavu problematiky produkce bentonitových pelet a návrh dalších prací. Důležitým požadavkem je navržení a odzkoušení vhodného postupu průmyslové výroby.

V této zprávě jsou nejdříve shrnuty technologické možnosti výroby bentonitových pelet. Dále je popsána problematika použití pelet v konstrukci hlubinného úložiště (HÚ). V práci jsou také shrnuty výsledky vývoje bentonitových pelet pro využití v inženýrských bariérách HÚ, které byly realizovány na území České republiky i v zahraničí. Na závěr zprávy je uveden návrh dalších prací.

Použitými zdroji informací jsou zejména interní dokumenty poskytovatele (např. rozpracovaná disertace Ing. Jiřího Šťástky), výsledky z projektu DOPAS (EPSP experiment, např. [2]). Dále byly informace čerpány ze zahraničních výzkumných projektů, resp. jejich veřejně dostupných výstupů.

Z dřívějších výzkumných prací je obecně známo, že bentonit je velice vhodný jako tzv. buffer (těsnění okolo úložných obalových souborů (ÚOS)) a jako tzv. backfill (pro zaplnění přístupových štol a šachet). Kvalitativní požadavky na bentonitové vrstvy (buffer, backfill) nejsou v ČR stanovené, ale pro představu lze adaptovat požadavky ze zahraničních konceptů, např. z KBS 3 [3]. Důležitými vlastnostmi bentonitu jsou hydraulická vodivost, která je podstatná z hlediska případné migrace radionuklidů, a bobtnací tlak bentonitu, který je důležitý pro homogenizaci bentonitu, pro dotěsnění volných prostor (technologické spáry, pukliny, apod.) a také např. pro eliminaci mikrobiologické aktivity. Obě vlastnosti bentonitu se exponenciálně mění s objemovou hmotností sušiny bentonitu. Objemová hmotnost bentonitu je tedy velice důležitá a lze podle ní určit další parametry (bobtnací tlak, hydraulickou vodivost a další). V zadání projektu je požadováno, aby objemová hmotnost byla co nejvyšší, protože se s rostoucí objemovou hmotností zlepšují vlastnosti bentonitové vrstvy. Bobtnací tlak ale nesmí překročit určitou hodnotu, aby nedošlo k nadměrnému mechanickému zatížení ÚOS.

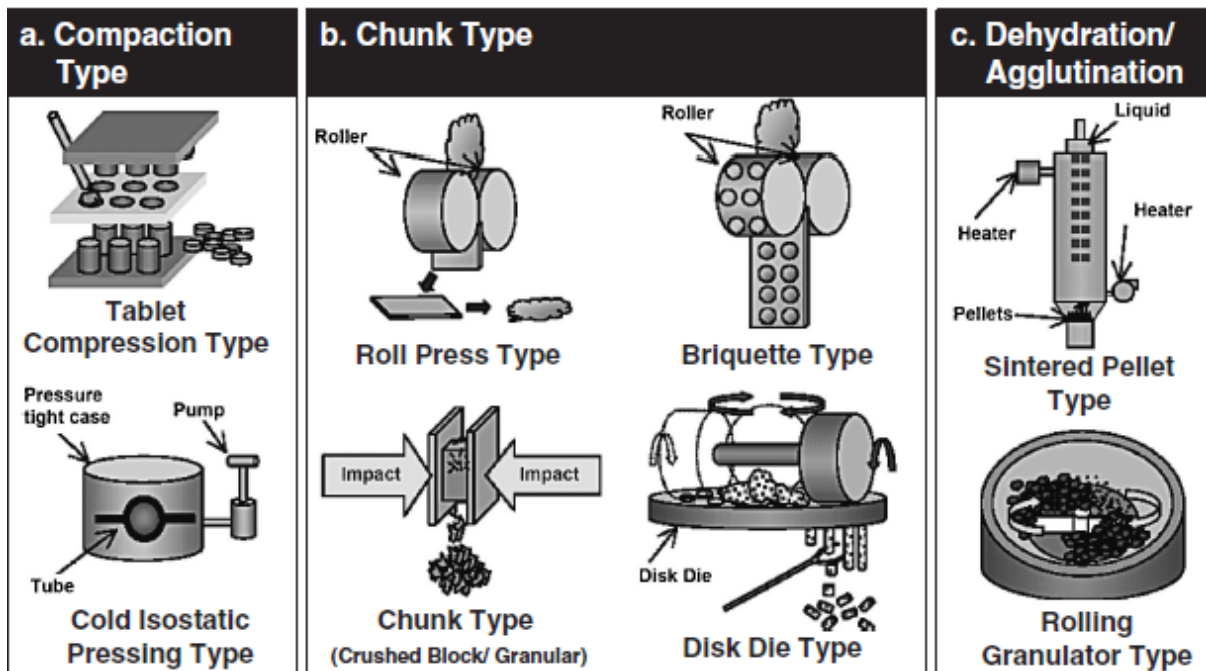
| | | |
|--|--|-----------------------|
|  SÚRAO | Návrh a výroba směsi bentonitových pelet 1. Průběžná zpráva | Evidenční označení: |
| | | (doplň <i>SÚRAO</i>) |

2 Technologické možnosti výroby bentonitových pelet


Jako bentonitové pelety mohou být označené různé formy lisovaného bentonitu, tzn. bentonit lisovaný do bloků (rozměry zhruba do 5 cm³), válečků, čoček a koulí. Pro některé bentonitové pelety je možné spíše využít označení bentonitové drtě či bentonitové směsi.

Pro výrobu bentonitových pelet se využívá několik způsobů, více v následujícím přehledu a také na Obr. 1:

1. Lisování tablet a čoček pomocí malých forem – jedná se o lisování bentonitu pomocí lisu a forem pro jednotlivé pelety, používá se pro menší objem výroby.
2. Lisování pelet stlačeným vzduchem (izostatické lisování) – lisování bentonitu tlakem vzduchu, kdy je bentonit stlačený v membráně o rozměrech odpovídajících velikosti pelety; tato technologie umožňuje lisování pouze jednotlivých pelet, vhodná je tedy pro malé objemy produkce.
3. Lisování mezi válci:
 - a. Lisování mezi válci s hladkou stěnou – kontinuální lisování, vhodné pro vyšší objemy výroby.
 - b. Lisování mezi válci s perforovanou stěnou – v lisovacích válcích jsou připravené otvory, které odpovídají rozměru pelet, také vhodné pro vyšší objemy lisování.
4. Drcení větších bloků bentonitu – vylisované bentonitové bloky o objemu několika desítek cm³ se rozdrtí na menší bloky, např. o objemu do 1 cm³, drcení je vhodné i pro vyšší objemy produkce, náročné může být získání dostatečného množství zdrojových bloků.
5. Zhutňování bentonitu protlačováním skrz matici s otvory o určitém průměru – vytvářejí se bentonitové válečky různých délek o stejném průměru, jako jsou otvory v matici.
6. Sušení bentonitové pasty - sušení husté suspenze bentonitu a vody, sušením dojde k rozdělení uschlé směsi na různě velké agregáty bentonitu, vhodné i pro vyšší objemy lisování, 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 naráží a tvoří větší celky (agregáty), vhodné i pro vyšší objemy lisování.



Obr. 1 – Možnosti výroby pelet [4] – uvedená reference popisuje 3 hlavní skupiny pro lisování pelet a to 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; 1) *Briguettes 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*)

| | | |
|--|--|---------------------|
|  SÚRAO | Návrh a výroba směsi bentonitových pelet 1. Průběžná zpráva | Evidenční označení: |
| | | (doplň SURAO) |

3 Možnosti využití bentonitových pelet v konstrukci HÚ

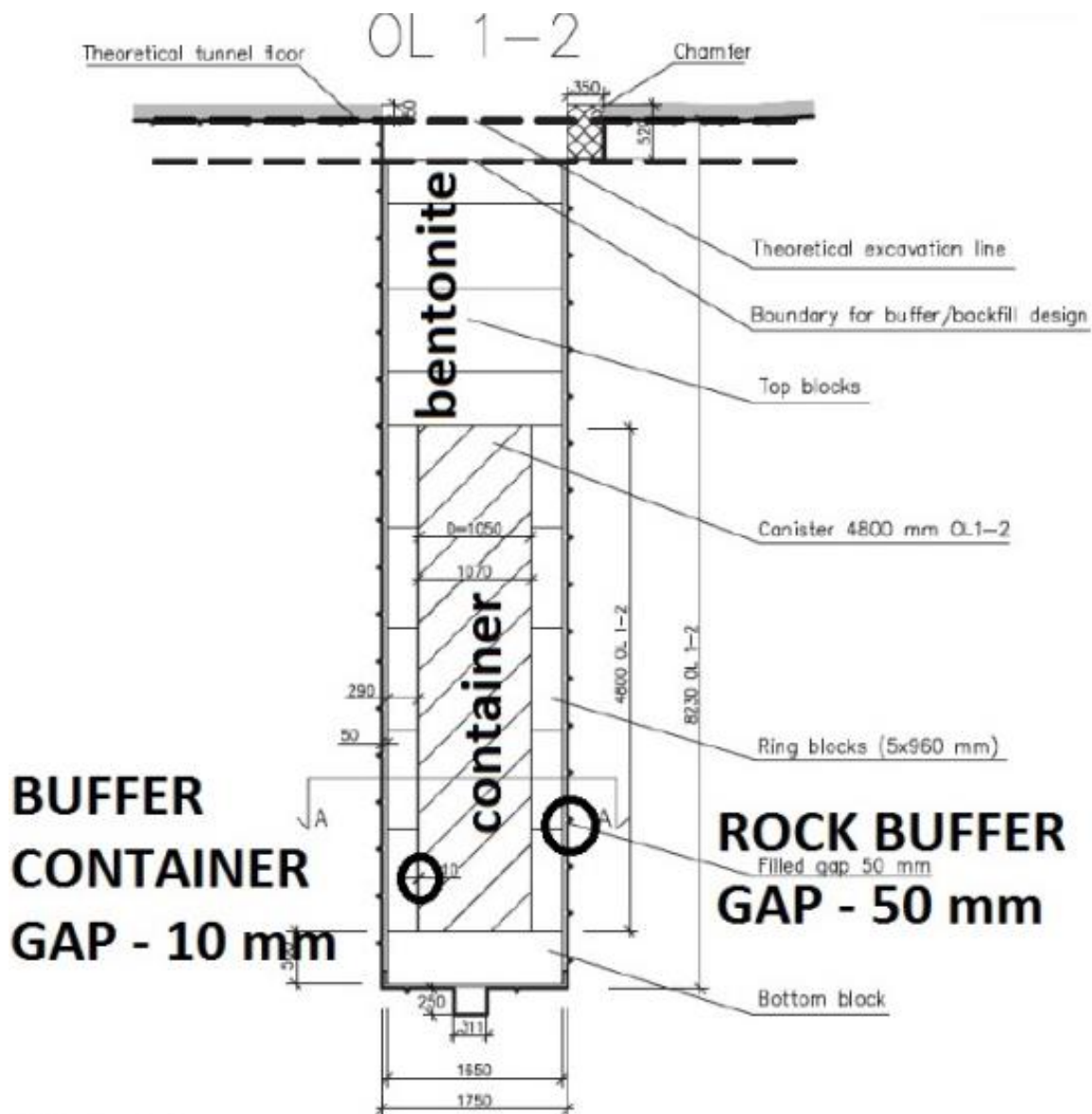
Jedním z cílů projektu je shrnutí možného využití bentonitových pelet v konstrukci hlubinného úložiště. Rešeršní práce v této kapitole byly tedy zaměřené na vytvoření soupisu možného využití pelet v různých místech HÚ, s ohledem na specifickou problematiku těchto míst. Práce se však nezabývá konkrétními výsledky v citovaných pracích.

3.1 Technologické spáry při konstrukci bufferu

Při konstrukci bufferu z lisovaných bloků se uvažují dva typy technologické spáry, a to spára mezi ÚOS a bentonitovými bloky a spára mezi bentonitovými bloky a horninou. Obě spáry jsou vyznačené na Obr. 2., na kterém je vyobrazený svislý řez vertikálním uložením ÚOS. Technologické spáry se řeší u obou způsobů uložení (vertikální, horizontální) a podle dostupných pramenů a zkušeností se vždy bude jednat o spáry o tloušťkách až desítky milimetrů. Problematika technologických spár je shrnutá v rozpracované disertaci J. Štásky:

„Výzkumné práce v zahraničí se zabývaly např. vlivem různého druhu (materiálů a i způsobů) vyplnění spár na teplotu v bentonitu, přičemž cílem ve většině prací je simulovat průběh maximální teploty bentonitu v čase, např. [5]. Vždy byl prokázán pozitivní vliv zaplnění spáry mezi bentonitem a horninou na odvod tepla od ÚOS. Existují i další důvody, v knize [6] se uvádí: „Důvodem pro zaplnění spáry je zlepšení tepelných, mechanických a chemických vlastností celého systému jako celku“. Některé práce se zabývají konkrétními případy, např. možnou erozí bentonitových bloků při přítoku vody z horniny do nezaplňené spáry [7], zaplněná spára omezí odpadávání úlomků horniny do volného prostoru spáry [6] a důležité je také zvýšení množství bentonitu (objemové hmotnosti) okolo ÚOS. Předchozí práce prokázaly, že hydraulická vodivost a bobtnací tlak bentonitu exponenciálně závisí na zhutnění bentonitu, např. [8]. Tzn., že 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.

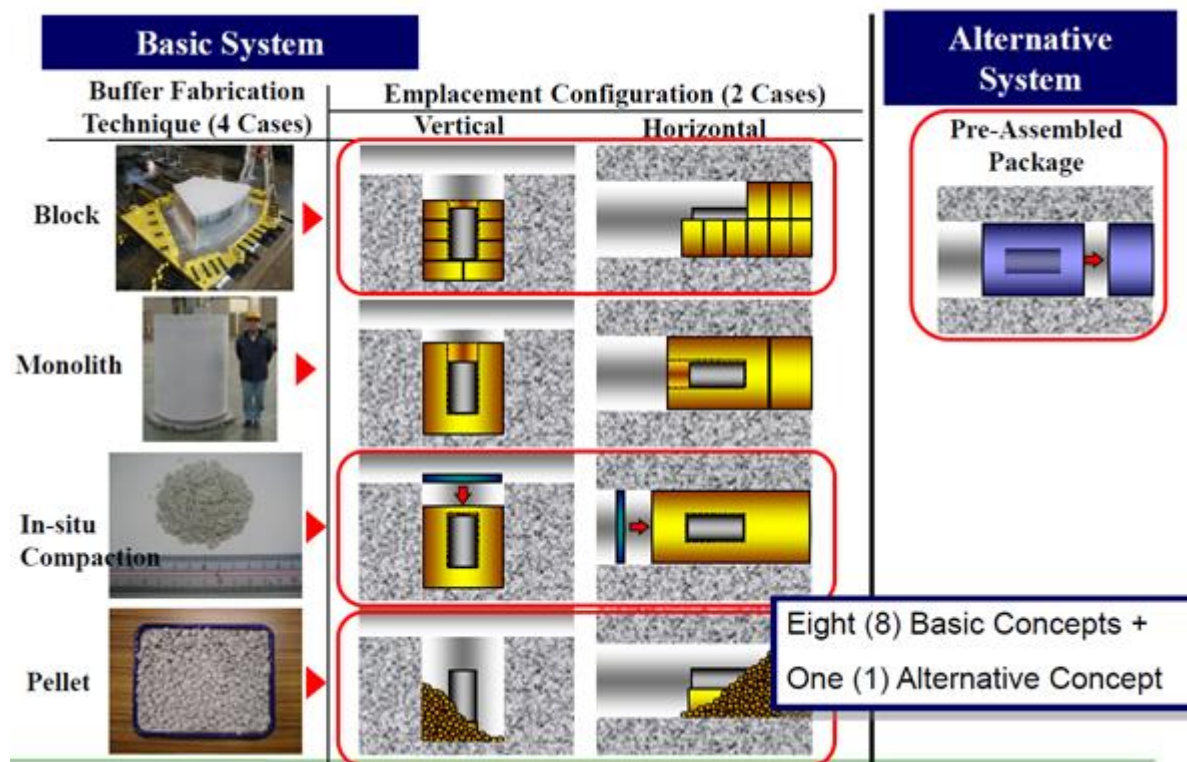
Např. ve finském výzkumu [3] bylo provedeno několik testů zaplnění spáry o tloušťce 50 mm (+- 25mm) zaměřených na studium tlaků (radiální i axiální, bobtnací) v testovací komoře. Byly zkoušeny různé způsoby zaplnění spáry (písek, bentonitová pasta - tekutá směs bentonitu s vodou, různé druhy bentonitových pelet). Nejlepší výsledky, dle finského referenčního návrhu HÚ, byly prokázány pro bentonitové pelety. Bentonitové pelety byly více efektivní při generování a udržení bobtnacího tlaku, zvláště při velikosti spáry 50 mm korespondující s nynějším finským referenčním návrhem [3].“



Obr. 2 – Konstruktivní řešení úložného místa pro ÚOS ve finském konceptu [9] 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))

3.2 Těsnicí vrstva okolo ÚOS

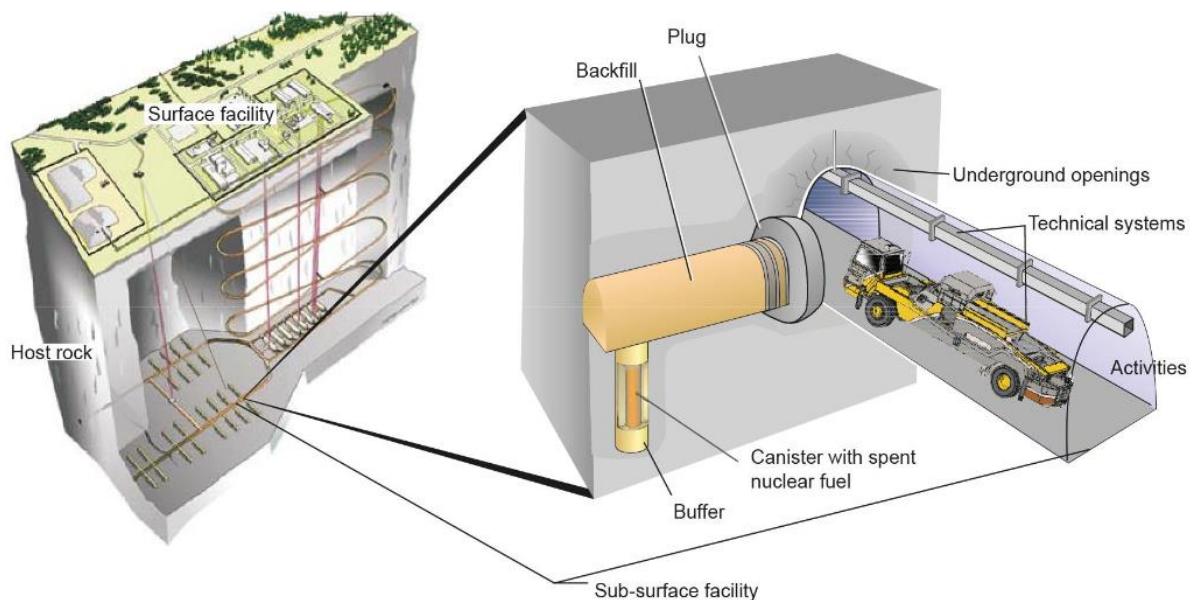
Možnosti použití pelet okolo ÚOS byly např. zmíněny v prezentaci na konferenci International Conference - Underground Disposal Unit Design & Emplacement Processes for a Deep Geological Repository (16-18 June 2008, Prague) v prezentaci pana Toguriho [10]. Na Obr. 3 jsou přehledně zobrazeny možnosti výstavby bentonitové vrstvy okolo ÚOS. Jednou z uvedených variant je i použití bentonitových pelet, a to pro oba způsoby uložení ÚOS (vertikální x horizontální). Systém využívající bentonitové pelety je nejvíce zkoušený ve Švýcarsku, např. FE experiment [11]. Více o švýcarském výzkumu je uvedeno v kapitole 5.2.



Obr. 3 – Různé způsoby výstavby bentonitové vrstvy v HÚ s vyznačením možného využití bentonitových pelet [10].

3.3 Těsnící zátky oddělující uzavřené ukládací prostory

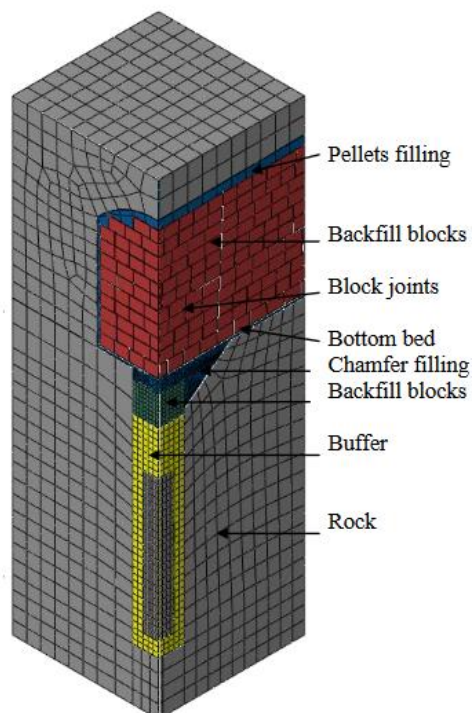
Důležité využití bentonitových pelet může být u těsnících zátek hlubinného úložiště, které budou např. oddělovat zaplněné prostory od nezaplňných. Bentonitové pelety jsou použité i v experimentu EPSP (Experimental Pressure and Sealing Plug, projektu „Full-Scale Demonstration Of Plugs And Seals“ - DOPAS, FP7 323273) realizovaném v Podzemní laboratoři Josef [2]. Část této rešerše je věnována i materiálům využitým v experimentu EPSP (kapitoly 4.1; 4.2). V rámci projektu DOPAS, byly vystavěny další tři experimentální zátky – ve Francii, Švédsku a Finsku. U francouzského experimentu FSS [12] byly použity bentonitové pelety, viz odstavec 5.3. Ve švédském experimentu DOMPLU (Dome Plug) byly použity pro těsnící část bentonitové bloky a pelety [13]. Ve finském experimentu POPLU (Posiva plug) [13] nebyly pelety použity. Na Obr. 4 je vyobrazeno využití těsnící zátky (Plug) ve švédském systému pro ukládání ÚOS.



Obr. 4 – Schématické zobrazení místa využití těsnící 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) [13]

3.4 Vyplnění přístupových tunelů

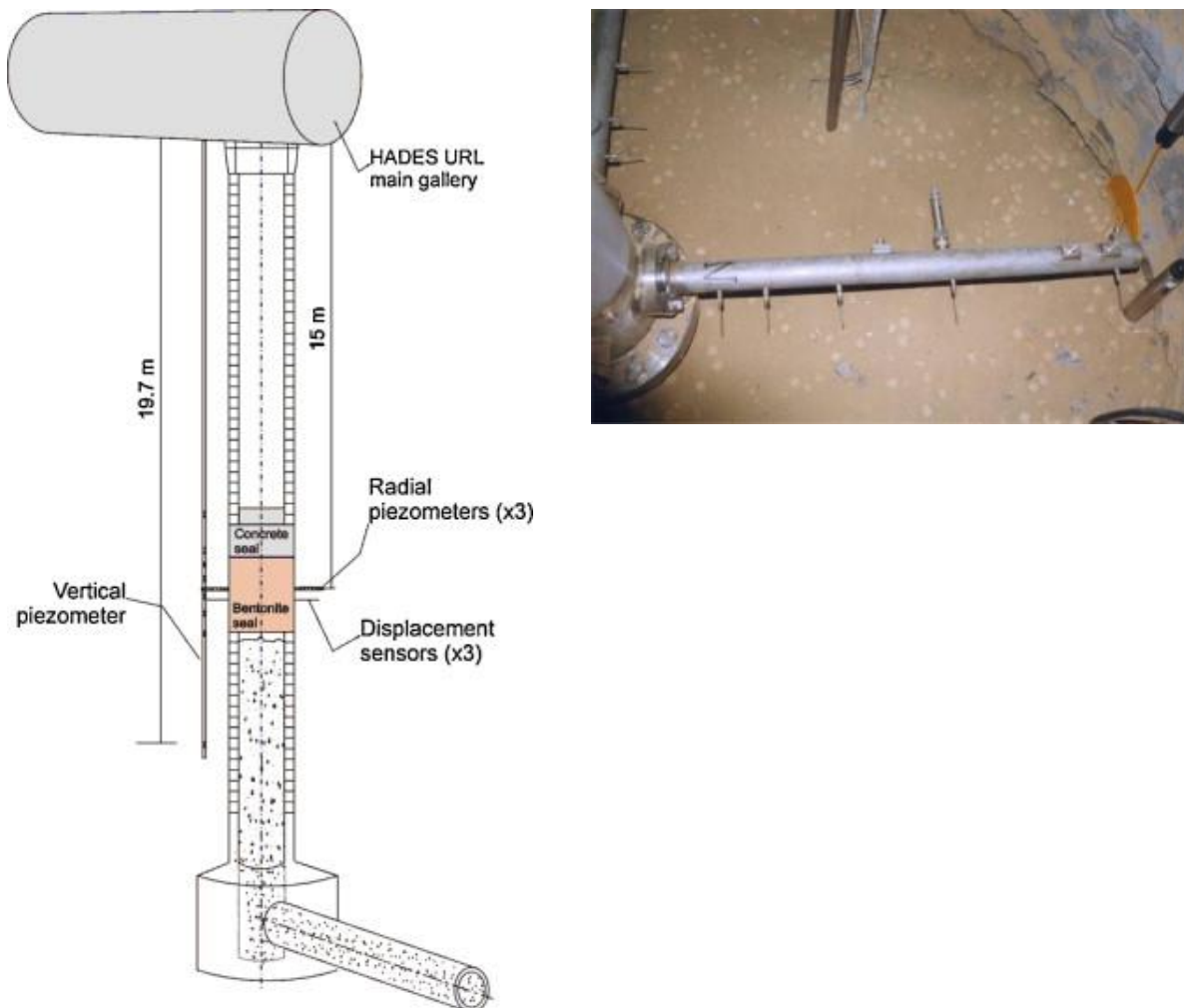
Dalším možným využitím bentonitových pelet je zaplnění a zatěsnění přístupových tunelů, tzv. backfill. Např. ve Finsku se předpokládá zaplnění přístupových tunelů kombinací pelet a bloků viz Obr. 5. Mimo požadavků bezpečnostních a technických bude významnou roli pro volbu konečného technického řešení hrát i ekonomické hledisko - výstavba vrstvy z bentonitových pelet může být levnější než výstavba z bentonitových bloků. Výstavba z pelet mj. nabízí využití odlišných technologií (sypání, stříkání) než ukládání bloků.



Obr. 5 – Na obrázku je znázorněno konstrukční řešení úložného místa pro ÚOS ve finském konceptu s vyznačením bentonitových pelet (Pellets filling) pro zaplnění spáry mezi bloky (Backfill blocks) a horninou (Rock) při zaplnění přístupových štol [14].

3.5 Šachty a komíny

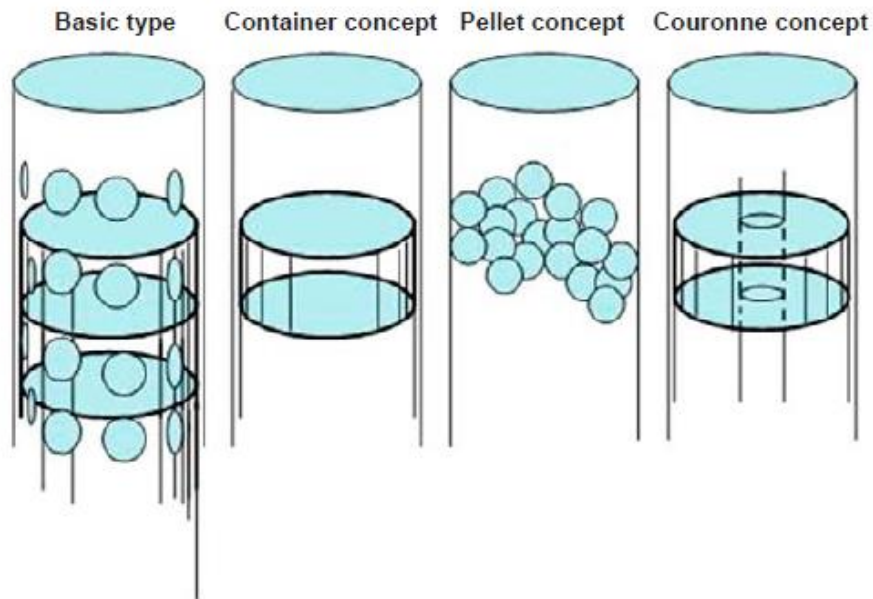
Bentonitové pelety mohou být použité i pro „svislé zátky“, tj. při vyplnění šachet a komínů. V belgickém experimentu (Shaft Sealing Test) byla použita bentonitová směs složená z 50 % pelet a z 50 % práškového bentonitu. Bentonitová zátka měla průměr 2,2 m a výšku 2,25 m. Schéma experimentu Shaft Sealing Test je na Obr. 6 [15].




Obr. 6 – Schéma experimentu zaplnění šachty v podzemní laboratoři HADES v MOL (Belgie) a vpravo obrázek zkoušené bentonitové směsi (50 % pelet a 50 % prášku) [15].

3.6 Zaplnění vrtů po geologickém průzkumu

Při uzavírání úložiště bude nutné zaplnit nejen přístupové a ukládací tunely, ale i vrtý po geologickém průzkumu. Tyto vrtý by mohly tvořit preferenční cesty pro únik radionuklidů. Např. ve Švédsku [16] jsou bentonitové pelety zkoušené jako jeden z konceptů pro zaplnění vrtů, viz Obr. 7.



Obr. 7 – Koncepty pro zaplnění průzkumných vrtů v [16] První možnost zleva předpokládá využití lisovaných bentonitových bloků v perforovaném měděném obalu, druhá možnost je „kontejner“ s bentonitovými bloky, třetí možnost je zaplnění vrtu bentonitovými peletami a čtvrtá možnost je zaplnění vrtu bentonitovými bloky umístěnými na tyči.

| | | |
|--|--|---------------------|
|  SÚRAO | Návrh a výroba směsi bentonitových pelet 1. Průběžná zpráva | Evidenční označení: |
| | | (doplň SÚRAO) |

4 Zkušenosti s výrobou pelet na území ČR

Není známo, že by v České republice existovala průmyslová či poloprovozní výroba pelet z českého bentonitu. Bentonitové pelety dostupné na trhu v ČR jsou dovážené a především určené pro pažení hydrogeologických vrtů, např. [17] a [18]. Pelety pro pažení vrtů v drtivé většině obsahují aditiva, která upravují vlastnosti bentonitu (např. zvyšují objemovou hmotnost, aby došlo k rychlejšímu klesání pelety pod hladinu vody).

Podle výsledků provedené rešerše lze tedy říci, že pelety nebyly v ČR dosud průmyslově vyráběny. Nejbližší tomuto požadavku jsou práce souvisejících s disertací J. Šťástky, např. [19] a projektem DOPAS [2]. Pro projekt DOPAS, bylo, na základě experimentálního vývoje, připraveno 36 tun bentonitových pelet s označením B75 PEL 12. Další práce byly realizovány s granulovaným materiálem označeným jako REC [20]. Následující kapitoly shrnují práce realizované ve výše jmenovaných výzkumech na obou typech pelet.

4.1 Výroba protlačováním maticí

Vybraná technologie (Obr. 8) je založená na protlačování materiálů skrz matici¹. Velikost tření na plochách otvorů matrice určuje zhutnění pelet. Obecně lze říci, že pokud je materiál sušší (až po určitou mez), tak lze po lisování očekávat vyšší zhutnění materiálu.

V průmyslovém provozu byla upravena technologie, která není primárně určená pro lisování bentonitu. Po podrobném seznámení se s postupem výroby a možnostmi zařízení byl připraven nový postup pro zkušební lisování. Pro lisování byl použit průmyslově sušený, mletý Bentonit 75 (dodavatel Keramost a.s.). Tento bentonit bylo nutné před lisováním vlhčit. Na základě pilotních pokusů bylo určeno, že bentonit pro výrobu ve větším měřítku bude nejprve navlhčen zhruba na 30 % a podle kvality produkce bude rozhodnuto o dalším postupu, zejm. snižování vlhkosti vstupního materiálu. Pro lisování (protlačování) pelet byly využity dvě matrice s různým průměrem otvorů, jedna s průměrem 8 mm, a druhá s průměrem 12 mm.

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 matici 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 matici.

Na Obr. 8 je foto linky pro výrobu bentonitových pelet s označením B75 PEL 12. Na Obr. 9 vlevo je zobrazená matrice pro zhutňování pelet a vpravo jsou s matricí zobrazeny dva osově uložené ocelové válce, které protlačují bentonit skrz matici.

¹ Matrice – ocelová kruhová deska horizontálně umístěná ve stroji pro lisování pelet, kruhovými otvory v matrici je lisovacími válci (ocelová kola) bentonit protlačován a vznikají tak bentonitové pelety - válečky



Obr. 8 – Výrobní linka pro lisování pelet. Na obrázku jsou zřejmé dva pásové dopravníky. Horní pásový dopravník sype zvlhčený materiál do stroje, ve kterém se zhušťují pelety protlačováním skrz matrici. Bentonitové pelety ze stroje samovolně vypadávají na spodní pásový dopravník, který dopravuje pelety k expedičnímu místu. (interní materiály poskytovatele).



Obr. 9 – Obrázek matrice pro zhušťování pelet vlevo 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 [6].

4.1.1 Pelety o průměru 8 mm

Po prvních dvou zkouškách lisování s matricí s otvory 8 mm bylo určeno, že pro další vývoj nebude tato matrice využívána (Obr. 10). Hlavním důvodem bylo to, že se matrice bentonitem postupně ucpávala a bylo zřejmé, že by lisování pelet o průměru 8 mm nebylo možné realizovat v plnoprovozním měřítku.



Obr. 10 – Fotografie vylisovaných bentonitových pelet o průměru 8 mm (interní materiály poskytovatele).

4.1.2 Pelety o průměru 12 mm – B75 PEL 12

Zkoušky lisování matricí s otvory o průměru 12 mm prokázaly využitelnost v poloprovozu. Teplota stroje byl ustálena a nedocházelo k nežádoucímu přehřívání. Po prvním testu byla postupně snižována vlhkost vstupního materiálu s cílem dosáhnout vyšší objemové hmotnosti lisovaného bentonitu. Výsledná optimální vlhkost zajišťovala bezproblémový průběh lisování. Nejdříve byla realizována poloprovozní zkouška, po které proběhla plnoprovozní zkouška, s cílem vyprodukovat dostatečné množství kvalitních pelet pro potřeby projektu DOPAS [20], resp. zátky EPSP. Při plnoprovozní zkoušce bylo vylisováno 36 tun pelet, které byly označeny „B75 PEL 12“, viz Obr. 11.

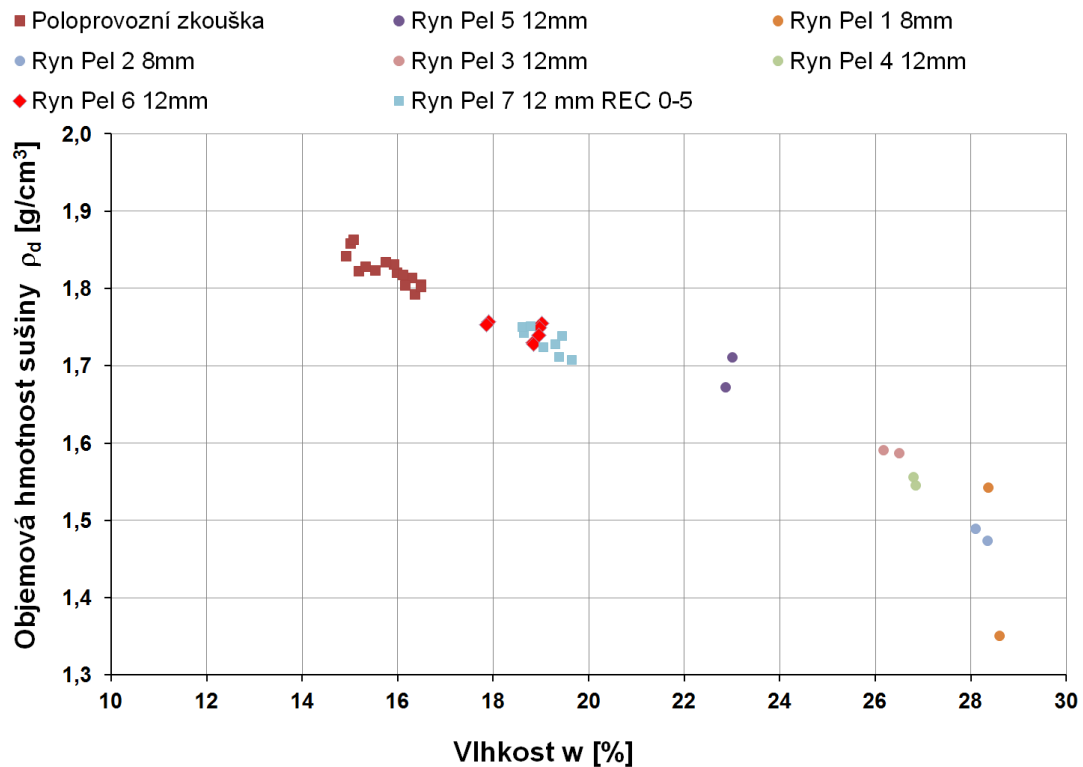


Obr. 11 – Fotografie vylisovaných bentonitových pelet o průměru 12 mm (interní materiály poskytovatele).

4.1.3 Vyhodnocení zkoušek lisování a poloprovozní zkoušky

Postupným snižováním množství vody ve vstupním materiálu bylo dosaženo zvýšení objemové hmotnosti sušiny vylisovaných pelet. Při snížení vlhkosti bentonitu na 15 % došlo při lisování k přehřátí stroje. Poloprovozní zkouška, při které byly vylisovány tři tuny pelet B75 PEL 12, byla realizována při vlhkosti materiálu okolo 16 % a vše proběhlo bez problémů. Při poloprovozní zkoušce se také určil pracovní výkon odzkoušené technologie - produkce 1 tuny pelet za 1 hodinu zahrnuje i počáteční vlhčení bentonitu (průmyslově dodávaný bentonit má vlhkost zhruba 6 % až 8 %).

Graf na Obr. 12 znázorňuje závislost objemové hmotnosti sušiny na vlhkosti lisovaného bentonitu v průběhu zkoušek. V grafu jsou tmavě červeně znázorněny hodnoty z poloprovozní zkoušky, která předcházela plnoprovozní zkoušce. Mimo lisování z jemně mletého Bentonitu 75 bylo odzkoušeno také lisování granulovaného materiálu s označením REC 0-5 mm. Použití granulovaného materiálu nemělo vliv na dosaženou objemovou hmotnost sušiny pelet.



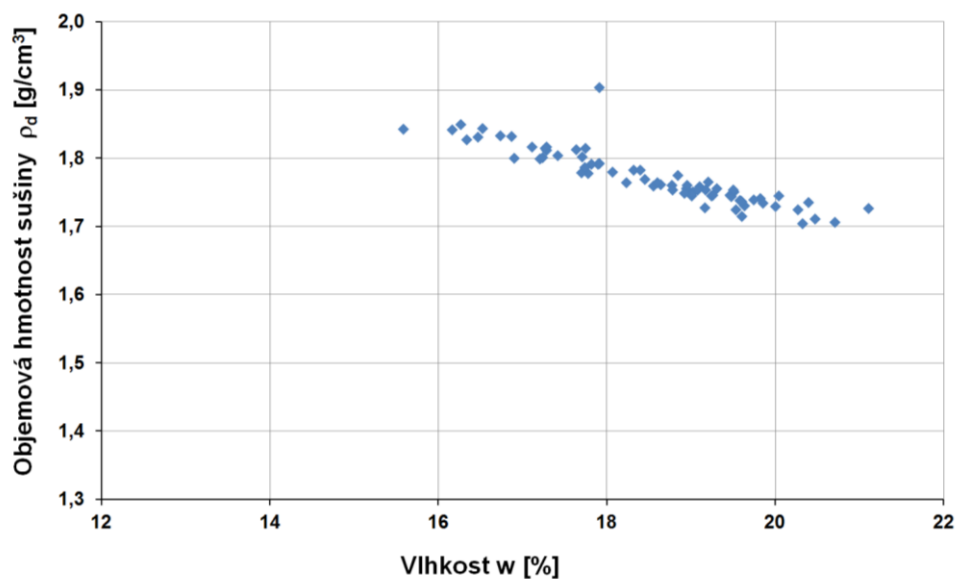
Obr. 12 – Závislost objemové hmotnosti sušiny na vlhkosti lisovaného bentonitu v průběhu zkoušek v ČLUZ a.s. V grafu jsou bentonitové pelety nyní značené jako B75 PEL (průměr 12 mm a 8 mm), popsány jako Ryn Pel. (interní materiály poskytovatele). Číslo (1 až 7) v popisu za Pel označuje pořadí zkoušky.

4.1.4 Plnoprovozní zkouška lisování bentonitových pelet B75 PEL 12

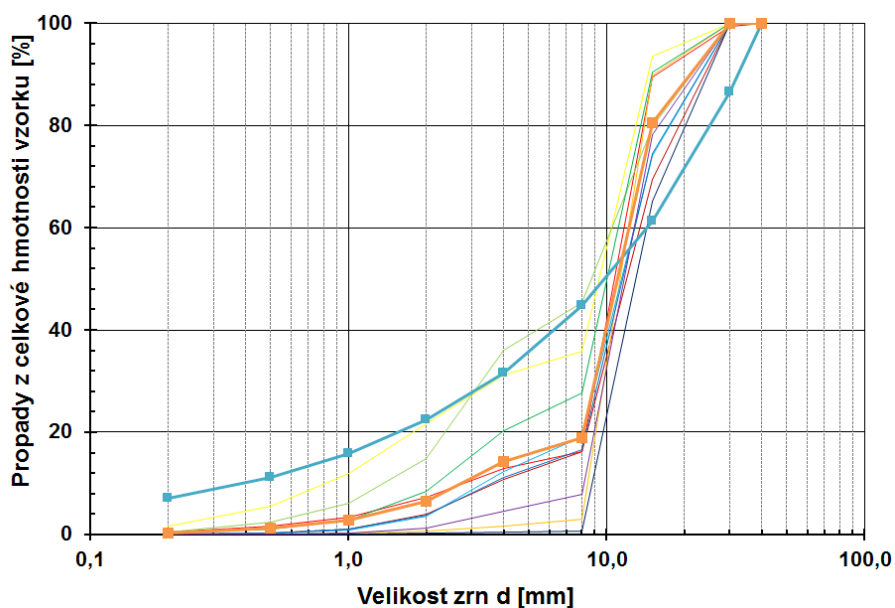
Cílem plnoprovozní zkoušky bylo vylisování dostatečného množství pelet pro experiment EPSP (DOPAS [2]), a tím ověřit výsledky z poloprovozní zkoušky. Výsledné pelety z plnoprovozní zkoušky dostaly označení B75 PEL 12 (Obr. 13). Celkem bylo vylisováno 36 tun. Graf (Obr. 14) zobrazuje hodnoty objemové hmotnosti sušiny v závislosti na vlhkosti po plnoprovozní zkoušce. Pro vyhodnocení plnoprovozní zkoušky byly také provedeny zrnitostní rozборы, viz Obr. 15. Zrnitostní rozборы ukázaly, že se zrnitost pelet při plnoprovozní zkoušce měnila. To mohlo být způsobeno různou vlhkostí lisovaného materiálu, viz Obr. 14. Vlhkost v průběhu plnoprovozní zkoušky kolísala v rozmezí od 16 % do 20 %. Vliv také může mít nestejný tvar pelet, resp. jejich různá délka.



Obr. 13 – Bentonitové pelety o průměru 12 mm (B75 PEL 12) z plno provozní zkoušky lisování, rychlost lisování 1 tuna za 1 hodinu (interní materiály poskytovatele).



Obr. 14 – Výsledky objemové hmotnosti sušiny a vlhkosti lisovaného bentonitu při plno provozní zkoušce (interní materiály poskytovatele).



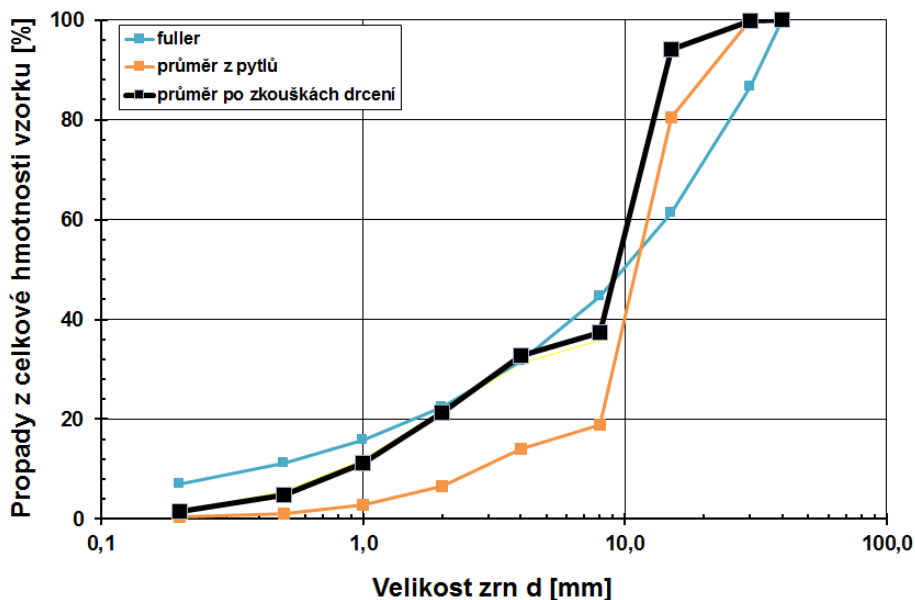
Obr. 15 – Zrnitostní křivky z rozborů B75 PEL 12 (slabé barevné čáry) po plno provozní zkoušce; vypočítaná průměrná zrnitost (oranžově silně), teoretická „ideální“ - Fullerova křivka pro B75 PEL 12 (světle modrá silně), (interní materiály poskytovatele).

4.1.5 Drcený materiál z B75 PEL 12

Zrnitostní složení má zásadní vliv na výslednou kvalitu těsnicí vrstvy z pelet. Jednou z možných úprav zrnitosti je drcení hutnicími prostředky (vibrační deska apod.). Toto drcení bylo, v rámci DOPAS, experimentálně odzkoušeno pro B75 PEL 12, viz Obr. 16. Po drticím pokusu byly provedeny zrnitostní rozборы nadrceného materiálu, viz Obr. 17.



Obr. 16 – Experimentální drcení B75 PEL 12 s cílem úpravy zrnitosti mj. byla zjištěna také možnost zhutnění v určitém objemu, ale tento výsledek není důležitý pro tuto práci (interní materiály poskytovatele).



Obr. 17 – Křivky zrnitosti B 75 PEL 12; modrá čára je vypočítaná křivka podle Fullerovy studie; oranžová čára znázorňuje průměr B75 PEL 12 po plno provozní zkoušce lisování ve výrobě (pytlovaný materiál, zrnitost z různých pytlů) a černá čára zobrazuje křivku zrnitosti pro drcené pelety B 75 PEL 12 (interní materiály poskytovatele) po zkouškách hutnění (drcení).

Z Obr. 17 je zřejmý pozitivní vliv drcení - posun křivky zrnitosti (B 75 PEL 12) ke křivce stanovené podle Fullerovy studie. Materiál s tzv. „optimalizovanou plynulou“ zrnitostí podle

Fullerovy studie bude mít lepší zhutnění po volném sypání² než stejný materiál bez „optimalizované“ zrnitosti.

4.2 Výroba pelet lisováním mezi válci

Technologie lisování mezi válci je primárně určena pro úpravu podsítného zbytku z úpravny bentonitů. Jedná se tedy o recyklační linku pro nežádoucí prachový zbytek. Po vylisování a vysušení je materiál, označený jako REC, drcen. Před drcením mají pelety tvar destiček o hranách až 15 cm. Po drcení mají destičky lisovaného bentonitu velikost největší hrany do 5 cm. Z průmyslové výroby lze získat frakce určené použitými sítmi - viz Tabulka 1. Je tedy možné získat bentonitovou drť v rozmezí např. od 0,8 do 2 mm a také např. nad 5 mm. Tabulka 1 ukazuje procentuální zastoupení frakcí bentonitové drti (zrn) v průmyslové výrobě. Každý řádek tabulky je z jiného výrobního cyklu. Průměrná hodnota ze všech cyklů je uvedena v posledním řádku tabulky. Průměrně má 1,89 % procent zrn větší průměr než 5 mm, 71,87 % zrn má průměr zrn v rozmezí 2 mm až 5 mm, 24,78% zrn je v rozmezí 0,8 mm až 2 mm a 1,45% zrn má menší průměr zrna než 0,8 mm.

Tabulka 1 – procentuální zastoupení zrn REC (interní materiály poskytovatele)

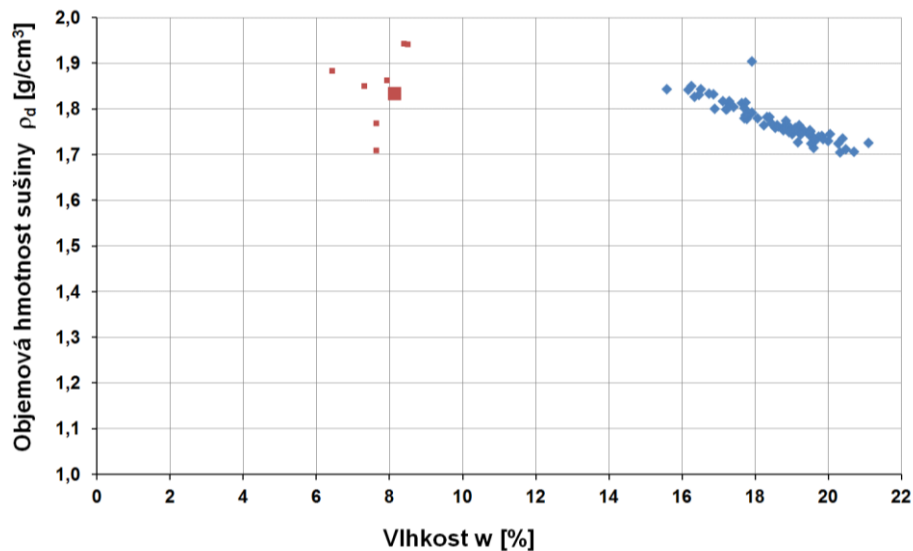
| | velikosti ok sít v mm | | | |
|---------------|-----------------------------|--------------|--------------|-------------|
| | > 5,0 | > 2,0 | > 0,8 | < 0,8 |
| | procentuální zastoupení zrn | | | |
| | 1,8 | 72,57 | 24,31 | 1,32 |
| | 1,96 | 71,83 | 24,63 | 1,58 |
| | 1,75 | 72,02 | 24,72 | 1,51 |
| | 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 |

² I volné sypání materiálu lze označit za způsob hutnění bentonitu, protože výška sypání způsobí mechanickou (gravitační potenciální) energii bentonitu (pelet), které při volném sypání budou svojí energií působit na ostatní materiál vrstvy a to bude mít zřejmě vliv na objemovou hmotnost vrstvy.

4.3 Porovnání výsledků pelet B75 PEL 12 a REC

Pro porovnání B75 PEL 12 a REC byly zjištěny objemové hmotnosti sušiny, viz Obr. 18. U obou materiálů bylo dosaženo hodnot okolo $1,8 \text{ g/cm}^3$, ale při různých vlhkostech materiálů. Vlhkost REC se pohybovala v rozmezí 6 % až 9 % a vlhkost B75 PEL 12 byla v rozmezí 16 % až 20 %. Pro lisování obou druhů pelet byl použitý stejný materiál Bentonit 75 z ložiska Černý Vrch.

Optimalizace technologie s cílem vyšší objemové hmotnosti pelet je možná pouze u materiálu označeného jako REC, který je lisovaný mezi válci. U druhého peletizovaného materiálu B75 PEL 12 bylo s největší pravděpodobností dosaženo limitu dostupné technologie.



Obr. 18 – Grafické znázornění dosažených objemových hmotností sušin (zhutnění) pelet; modře jsou znázorněny hodnoty pro B75 PEL 12 a červeně hodnoty pro materiál označený jako REC (větší červená značka označuje průměrnou hodnotu pro REC zkoušeného v rámci projektu DOPAS).

V rámci řešení různých projektů byly zkoušené tzv. sypné hmotnosti pro dvě aplikace a to volné sypání a následné setřesení. Tabulka 2 shrnuje výsledky pro REC a B75 PEL 12. Hodnoty uvedené v tabulce jsou orientační, protože byly počity výsledky z různých prací a u volného sypání závisí na způsobu provedení (výška sypání atd.).

Tabulka 2 – Orientační výsledky objemových hmotností sušiny pro B 75 PEL 12, B75 PEL drcené a REC (dvě zrnitosti):

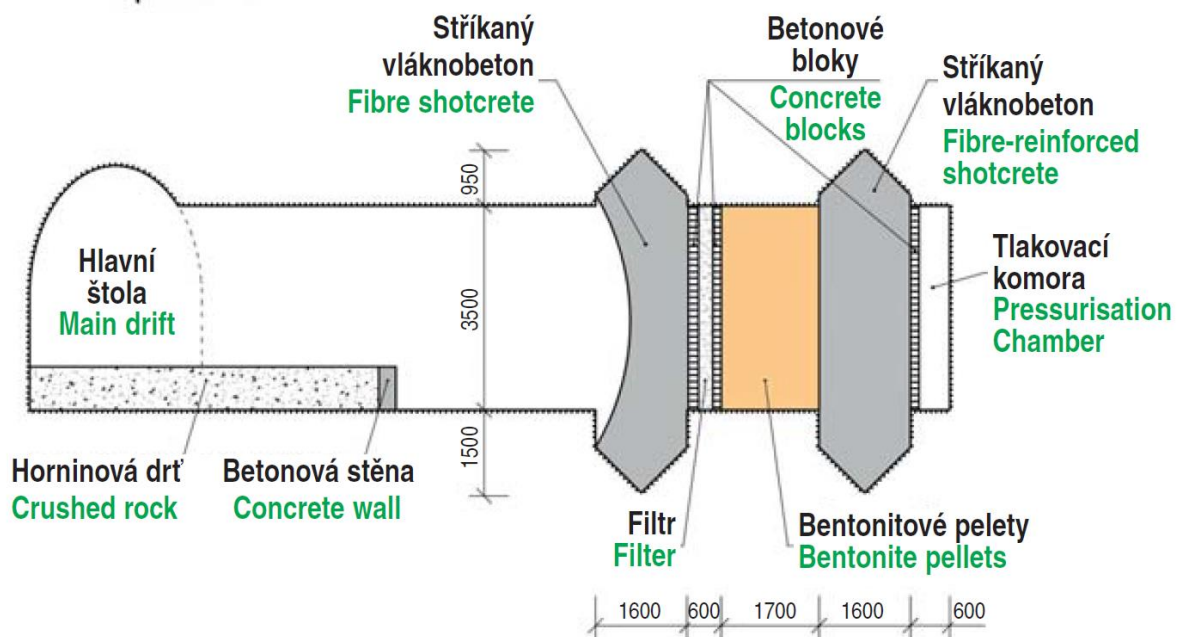
| materiál | Objemová hmotnost sušiny [g/cm^3] | |
|-------------------|--|---|
| | Volné sypání (válec 5 dm^3) | Volné sypání a setřesení (válec 5 dm^3) |
| B75 PEL 12 | 1,04 | 1,27 |
| B75 PEL 12 drcené | 1,12 | 1,37 |
| REC 0,8-2 | 1,03 | 1,21 |
| REC 0,8-5 | 1,07 | 1,25 |

4.4 Bentonitová vrstva v EPSP experimentu (DOPAS projekt)

Na Obr. 19 je konstrukce tlakové zátky EPSP, která se skládala z těchto hlavních částí: tlakovací komory, vnitřní zátky ze stříkaného vláknobetonu, bentonitového těsnění (bentonitové pelety), filtru, vnější zátku ze stříkaného vláknobetonu a z hostitelského horninového prostředí.

V EPSP experimentu byla požadována minimální objemová hmotnost sušiny bentonitové vrstvy (bentonitového těsnění) $1,4 \text{ g/cm}^3$. Pelety B75 PEL 12 byly při výstavbě bentonitového těsnění hutněny na objemovou hmotnost okolo $1,45 \text{ g/cm}^3$. B75 PEL 12 byly použity pro výstavbu 95% objemu bentonitové vrstvy a zbylý objem zátky (přístropí rozrážky) byl zastříkán technologií stříkaného jílu. Technologie stříkaného jílu vychází z technologie pro stříkání betonu tzv. suchou cestou a místo betonové směsi byl použitý jako nástřikový materiál REC. Stříkáním bentonitové drtě REC byly dosahovány objemové hmotnosti sušiny okolo $1,35 \text{ g/cm}^3$. Při výstavbě EPSP bylo dosaženo průměrné objemové hmotnosti sušiny bentonitového těsnění mírně nad požadovanou hranicí $1,4 \text{ g/cm}^3$.

EPSP experiment



Obr. 19 – Konstrukční řešení zátky EPSP – svislý řez osou rozrážky [21].

5 Vybrané zkušenosti ze zahraničních projektů

V následujících kapitolách jsou shrnuty vybrané výsledky ze zahraničního výzkumu. Nejlepšího zhutnění bentonitových pelet po volném sypání bylo dosaženo ve Francii (kapitola 5.3).

5.1 Finsko

Výzkum zaměřený na nalezení vhodných pelet či směsí ve Finsku (švédský systém KBS) lze rozdělit podle místa využití pelet v konstrukci HÚ [22]; [6]. 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. Spáry mezi bentonitovými bloky (bufferem) a horninou budou o průměrné tloušťce 50 mm. Ve finském výzkumu byl uvažován rozptyl tloušťky spár od 25 mm do 75 mm, a to v případě decentralizovaného (mimo osu úložného vrtu) uložení ÚOS. Spáry mezi bloky a horninou v backfillu budou o tloušťkách až desítek centimetrů.

Ve společném finsko-kanadském projektu byly zkoušeny dvě technologie lisování pelet, a to mezi válci anebo protlačováním maticí s otvory o určitém průměru (např. 12 mm). Bentonitové pelety z obou technologií jsou znázorněny na Obr. 20.



Obr. 20 – Bentonitové pelety ve finském výzkumu pro zaplnění technologické spáry; vlevo bentonitové pelety z technologie protlačování skrz matici; vpravo bentonitové pelety zhotovené lisováním mezi válci s otvory, do kterých je bentonit zatlačován [6].

Pro zaplnění spáry byly zkoušeny různé druhy bentonitových pelet, přičemž nejvyšší objemová hmotnosti sušiny peletové vrstvy dosáhla hodnoty okolo 1,1 g/cm³.

V práci [6] 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 práci [3] viz Obr. 21, na kterém jsou zobrazené zkoušené pelety a drtě.



a) Cebogel pellets.



b) Hosakawa 2011 pellets.



c) Hosokawa 2012 pellets.



a) MX-80 bentonite powder.




b) Ibeco RWC bentonite powder.


 c) Sieved (removed $\geq 2\text{mm}$) Ibeco RWC bentonite.

Obr. 21 – Finské pelety (nahore) a drtě (dole) zkoušené v práci [3].

Tabulka 3 – Vlastnosti zkoušených pelet a drtě v [3]. V tabulce jsou uvedené 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 nasypání pelet (Poured Bulk density) a objemové hmotnosti sušiny těchto pelet (Dry Density).

| | 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^3) | 1050 | 1067 | - |
| Dry density (kg/m^3) | 861 | 914 | - |
| Crush strength (N) | 170 | 136 | - |

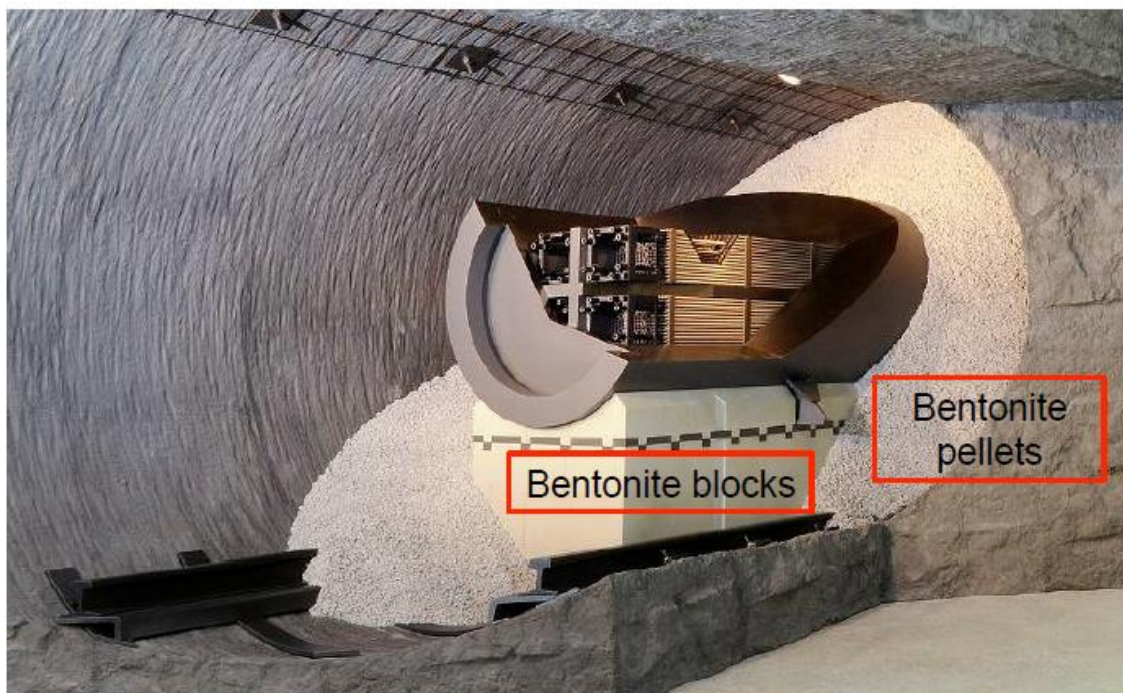
| | | |
|--|--|---------------------|
|  SÚRAO | Návrh a výroba směsi bentonitových pelet 1. Průběžná zpráva | Evidenční označení: |
| | | (doplň SURAO) |

Tabulka 4 – Vlastnosti zkoušených drtí v [3]. V tabulce jsou uvedené vlastnosti zkoušených drtí např. zrnitostní složení (particle size), vlhkosti (water content) a objemové hmotnosti po sypání (Bulk density)

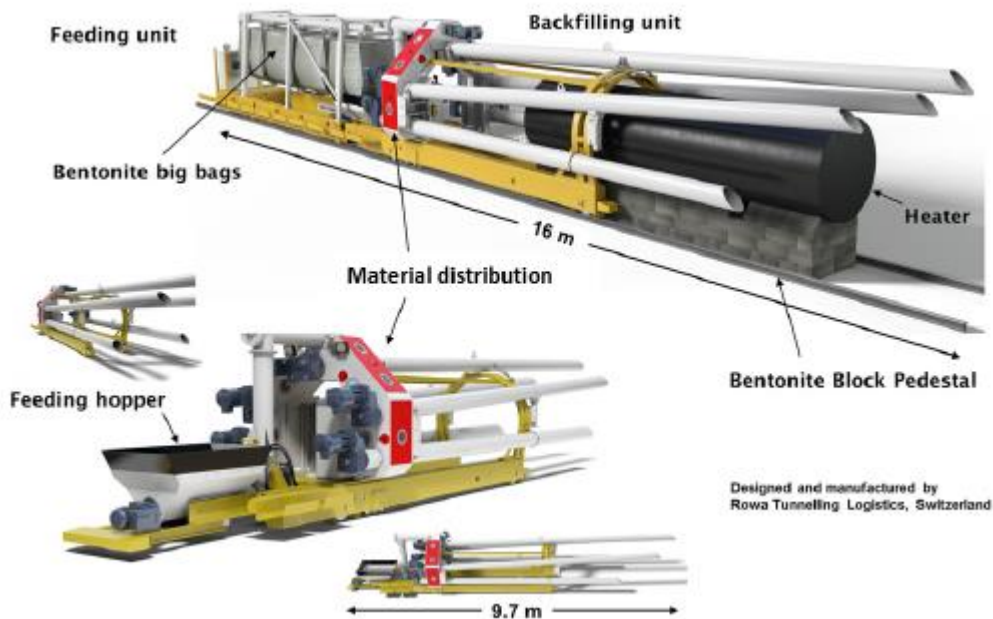
| | MX-80 powder | Ibeco RWC powder 13 % |
|---------------------------------------|---------------------|----------------------------------|
| Origin | Wyoming, USA | Milos, Greece |
| Type | sodium, Na | calcium, Ca |
| Particle size (mm) | 0-1 | 0-5 |
| Water content (%) | 12 ± 1.5 | 13 ± 1.5 |
|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

5.2 Švýcarsko

Švýcarský koncept je založený na horizontálním uložení ÚOS v jílové geologické formaci [23] na lisované bentonitové bloky (pedestal) [24], viz Obr. 22. Po uložení bude ÚOS obsypán bentonitovou směsí z pelet. Švýcarské pelety byly připraveny pro FE experiment, který byl vybudován v podzemní laboratoři v Mont-Terri [25]. Granulovaný materiál byl pod názvem Granulated Bentonite Mixture (GBM) [11] připraven z rozdrcených bentonitových pelet, které měly průměrnou objemovou hmotnost sušiny 2,18 g/cm³ a vlhkost okolo 5 % [11]. Zrnitost GBM se blížila Fullerově křivce. V průběhu FE experimentu byly zjištěny průměrné objemové hmotnosti sušiny GBM okolo 1,5 g/cm³, maximálně 1,52 g/cm³ [26]. GBM byl při aplikaci v FE experimentu hutněný šnekovými dopravníky (Obr. 23), které oproti volnému sypání dohutní GBM právě na cca 1,5 g/cm³. Objemová hmotnost sušiny volně sypaného GBM byla 1,42 g/cm³ [26].



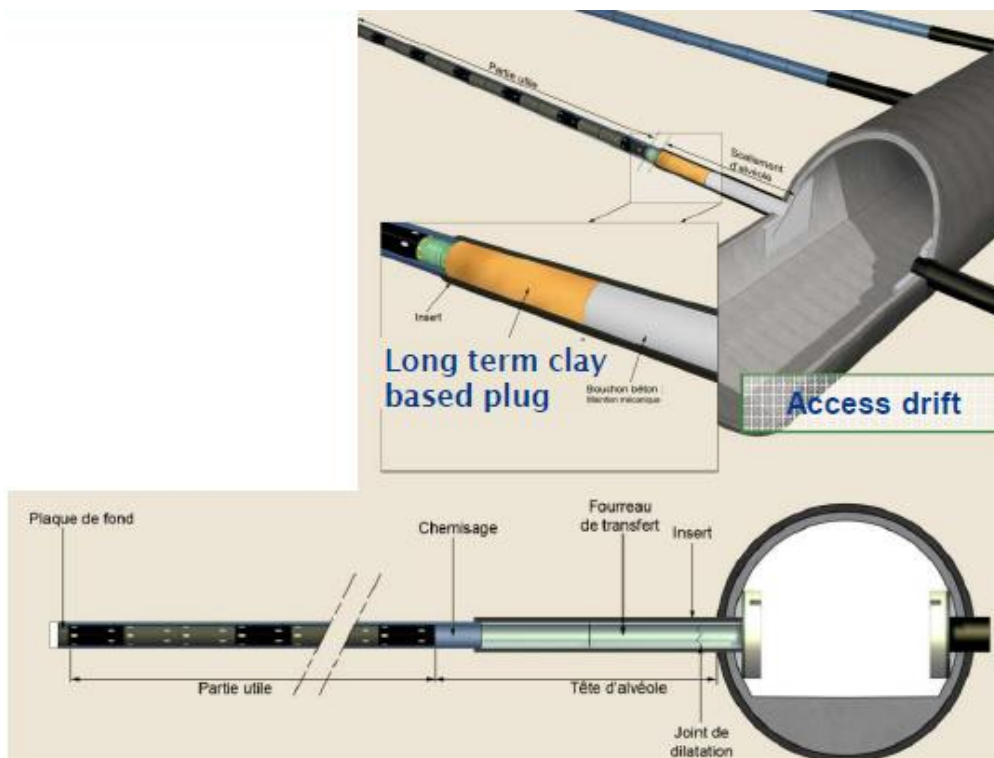
Obr. 22 – Řešení horizontálního způsobu ukládání VJP ve Švýcarsku [24]



Obr. 23 – Stroj se šnekovými dopravníky pro aplikaci GBM v FE experimentu [26], který GBM nejenom dopravuje, ale také jej dohutňuje.

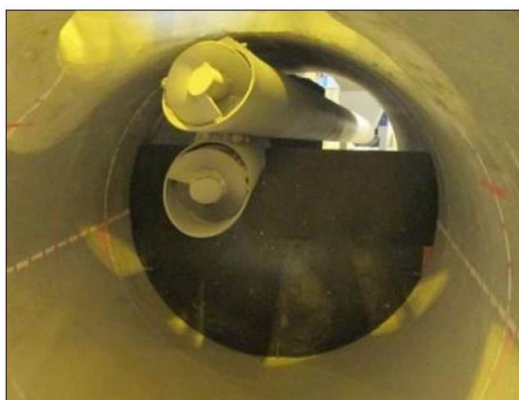
5.3 Francie

Ve Francii je vyvíjen horizontální způsob ukládání VJP. Francouzský způsob je založený na ukládání ÚOS přímo do jílovitých hornin bez využití bentonitu jako bufferu, např. [27]. Bentonit by však měl být použit pro těsnící zátka, viz Obr. 24 (Long term clay based plug).



Obr. 24 – Zobrazení francouzského způsobu ukládání [27].

Výstavba těsnící zátky byla realizována v rámci projektu FSS, ve kterém byly použity bentonitové pelety [12]. Nejdříve proběhl test systému dvou šnekových dopravníků, viz Obr. 25. 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 experimentu 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. 25 vlevo. Na obrázku je vidět ruka pracovníka, který zřejmě dohutňuje (dovibrovává) sypanou směs. Tuto informaci se ale nepodařilo v literatuře najít. Na Obr. 26 vlevo je zobrazen detail konce šnekového dopravníku a vpravo je pohled na bentonitovou vrstvu při její výstavbě v experimentu FSS.



Obr. 25 – Obrázek z testování aplikace bentonitových pelet dvěma šnekovými dopravníky; vlevo zkoušky v boxu a vpravo obrázek ze zkoušky ve větším měřítku [12].

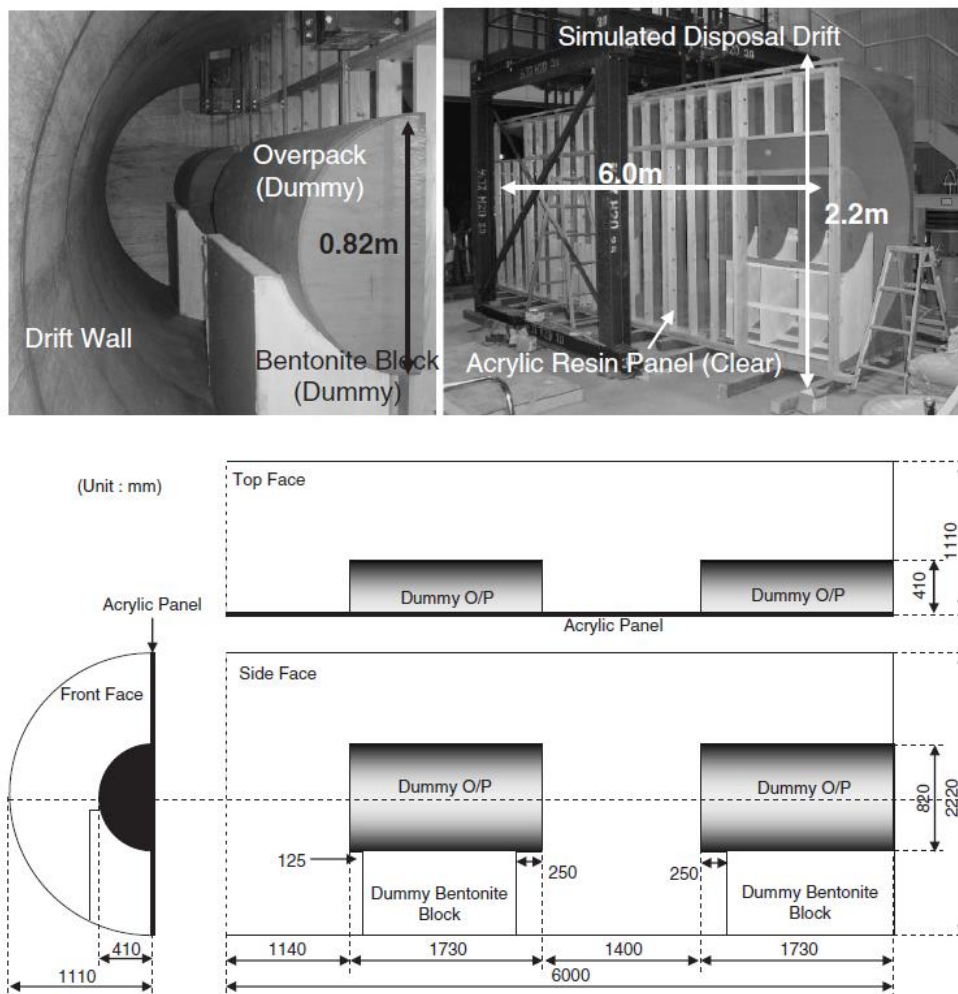


Obr. 26 – Obrázky z výstavby bentonitové vrstvy z pelet v FSS experimentu [12].



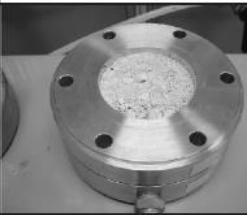
5.4 Japonsko

V japonském výzkumu popsáném v [4] byly práce s peletami zaměřeny na výstavbu bufferu při horizontálním uložení ÚOS. Pro zkoušky technologie byl připraven experiment v reálném měřítku. Experiment je dobře znázorněn na Obr. 27. Skládal se z horizontální zkušební komory simulující ukládací tunel a ze dvou válců, které simulovaly horizontální uložení dvou ÚOS. Pro výstavbu bentonitové vrstvy byl použit šnekový dopravník, který dopravoval bentonitový granulát. Výsledná průměrná objemová hmotnost sušiny bentonitové vrstvy v experimentu byla $1,29 \text{ g/cm}^3$ [4].

Před výstavbou experimentu byly odzkoušeny tři druhy bentonitových pelet, jejichž výroba je zvládnuta v poloprovozním měřítku. Výsledky testů vybraných bentonitových pelet jsou shrnuty na Obr. 28. Pro výstavbu experimentu byla vybrána bentonitová drť označená Chunk type (Ore) na základě nejvyšších výsledků objemové hmotnosti sušiny po volném sypání ($1,17 \text{ g/cm}^3$) [4] při vlhkosti 7,5 % a také proto, že se jedná o jednodušší výrobu oproti dalším zkoušeným typům pelet (Chunk type (Block) – drcených z bloků a Brigette type lisovaných v briketovacím stroji).



Obr. 27 – Obrázky a schémata japonského experimentu pro odzkoušení využití pelet při horizontálním způsobu ukládání [4].


| Manufacturing technique | Briquette type | Chunk type (block) | Chunk type (Ore) |
|--|---|--|---|
| Appearance |  |  |  |
| Dry density [Grain] (Mg/m ³) | 1.77 | 1.96 | 1.70 |
| Dry density [Bulk] (Mg/ m ³) | 1.00 | 1.05 | 1.17 |
| Hydraulic conductivity (m/s) | 1.93×10^{-12} | 1.48×10^{-12} | 1.60×10^{-12} |
| Thermal conductivity (W/mK) | 0.129 | 0.281 | 0.330 |

Obr. 28 – Obrázky vybraných bentonitových pelet a jejich vlastnosti pro japonský experiment popsány v [4]. V tabulce jsou uvedené objemové hmotnosti jednotlivých pelet (zrn) – Dry density (Grain); Objemové hmotnosti volně sypaných pelet- Dry density (Bulk); hydraulická vodivost – Hydraulic conductivity; Součinitel tepelné vodivosti – Thermal conductivity.

6 Diskuse a závěry z rešerše

Lze říci, že nejvíce se využívají tři druhy výroby pro lisování pelet či granulátů. Prvním typem je protlačování skrz matrici (extrusion), druhým je lisování mezi válci (roller compaction) a třetím typem jsou tzv. granuláty (granulated bentonite). Granuláty se vyrábějí z různých frakcí bentonitu např. i z podrcených bentonitových pelet (bloků). Granuláty také mohou být tvořeny směsí drcených pelet a jemně mletého bentonitu.

Bentonitové pelety je možné využít i jako výplňový materiál tunelů a šachet (např. finská kombinace bloků a pelet pro backfill), při vertikálním uložení ÚOS (např. zaplnění technologických spár) a také při horizontálním ukládání ÚOS (např. švýcarský systém ukládání). Využití pelet také může přinést technologické výhody při výstavbě.

| | | |
|--|--|---------------------|
|  SÚRAO | Návrh a výroba směsi bentonitových pelet 1. Průběžná zpráva | Evidenční označení: |
| | | (doplňí SÚRAO) |

7 Návrh prací

Dle získaných zkušeností a podle výsledků rešerše dodavatel prací předkládá návrh prací na řešení projektu.

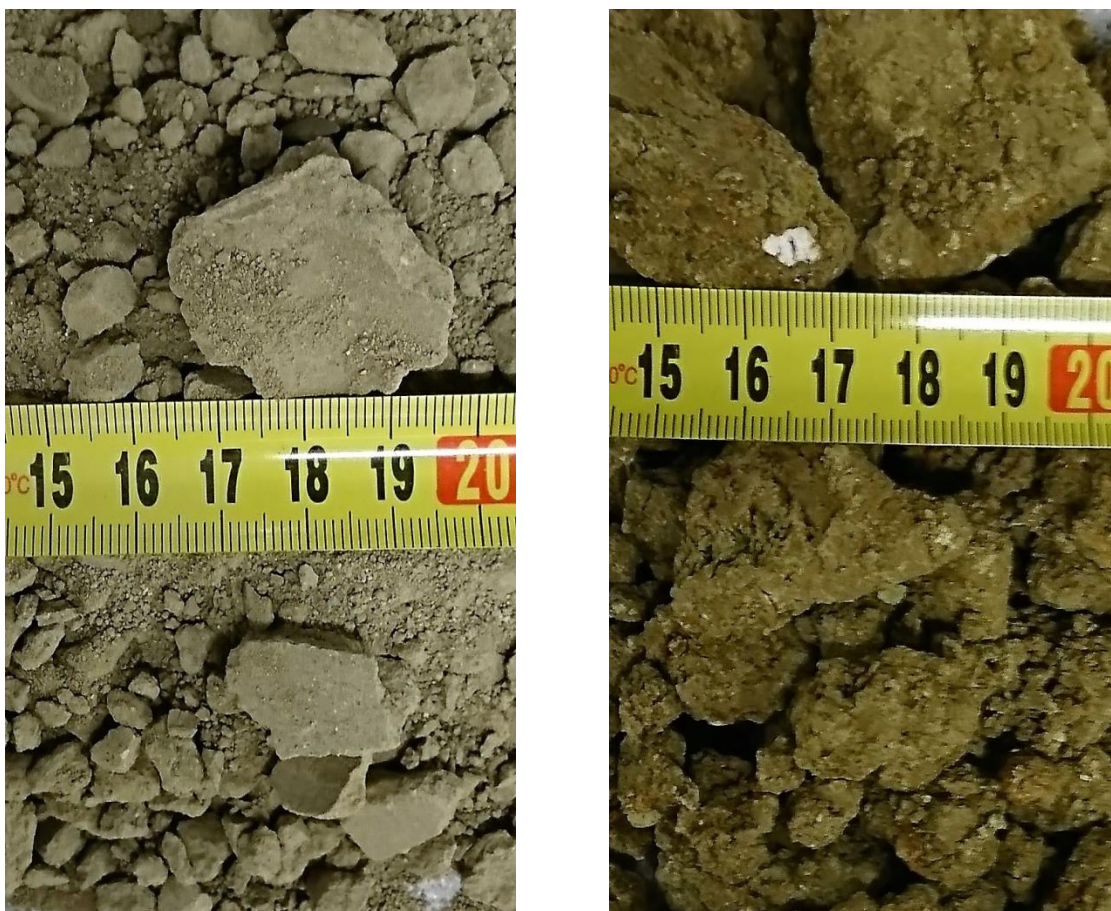
Hlavním cílem je vývoj směsi z bentonitu s co nejvyšší objemovou hmotností sušiny při volném sypání. Pro vývoj budou použity existující technologické linky u průmyslového partnera. Po seznámení se s výrobou byly vybrány dvě technologie, které se používají v úpravně bentonitu pro výrobu meziprojektu předcházejícího finálnímu výrobku. Předpokládá se, že obě technologie mohou spojit (zhutnit) bentonit do pelet a výsledná směs bude mít vysokou objemovou hmotnost sušiny.

Návrh prací byl připraven z výsledků rešerše a po seznámení se s možnostmi výroby. Je zřejmé, že lisování bentonitu do pelet závisí především na technologii lisování a na vlhkosti bentonitu. Pro vlhkost obecně platí, že při nižších vlhkostech bentonitu je dosahováno po lisování vyšší objemové hmotnosti sušiny bentonitu. Vliv na objemovou hmotnost sušiny volně sypaných směsí má i granulometrie bentonitových směsí a je nutné se jí, i podle výsledků zahraničních prací, zabývat.

7.1 Technologie

V úpravně bentonitů budou zkoušeny dvě technologie výroby. První technologií je lisování mezi válci. Druhou technologií je odzkoušení výroby pelet v kolovém mlýnu. Při obou technologiích výroby budou lisovány různě vlhké bentonity. Výhodami vybraných technologií je, že obě jsou dobře zvládnuté a subdodavatel výzkumu je bude s největší pravděpodobností využívat i v následujících desetiletích. Obě technologie také zaručují tzv. průmyslovou výrobu požadovanou objednatelem.


V průběhu listopadu 2017 proběhly konzultační práce a podrobné seznámení se s výrobou. Z výroby byly odebrány první vzorky materiálů z obou technologií. Materiály byly popsány, označeny interním značením dodavatele a jsou postupně vyhodnocovány. Na Obr. 29 jsou ukázky prvních testovaných materiálů.



Obr. 29 – Obrázky prvních testovaných materiálů v laboratořích u dodavatele; vlevo je materiál, který je po lisování „mezi válci“ a částečně podrcený a vpravo je materiál, který byl vylisovaný v kolovém mlýnu

V prosinci 2017 budou zahájeny první zkoušky lisování a optimalizace obou vybraných technologií. V roce 2018 bude pokračovat lisování pelet a začnou práce na optimalizaci zrnitostního složení tak, aby bylo dosaženo co nejlepších výsledků objemových hmotností po volném sypaní.


Také jsou postupně připravovány podrobné popisy obou technologií výroby.

| | | |
|--|--|---------------------|
|  SÚRAO | Návrh a výroba směsi bentonitových pelet 1. Průběžná zpráva | Evidenční označení: |
| | | (doplň SURAO) |

7.2 Harmonogram projektu

Na základě výsledků rešerše a po seznámení se s výrobou poskytovatel navrhuje zachovat harmonogram dle schváleného Zadávacího listu, viz následující tabulka:


| | Popis etapy | T0 = zahájení prací | Cíl | | | | | |
|---------------------------------------|---|---------------------------|--|-----|------|-----|------|-----|
| 1 | Shrnutí stávajícího stavu řešené problematiky + návrh prací | T0+1 měs. (start 10/2017) | Rešerše, 1. průběžná zpráva – tato zpráva | | | | | |
| 2 | Výroba pelet + laboratorní ověření | T0+9 měs. | Receptura a popis výroby pelet, 2. průběžná zpráva | | | | | |
| 3 | Návrh směsi v laboratoři | T0+12 měs. | Popis směsi, 3. průběžná zpráva | | | | | |
| 4 | Produkce směsi (min. 4 tuny) + test většího měřítka | T0+13 měs. | Demonstrace produkce a test, 4. průběžná zpráva | | | | | |
| 5 | Experimentální zkoušky hutnění | T0+14 měs. | Experimentální zkoušky hutnění na ČVUT | | | | | |
| 6 | Závěrečné zhodnocení a závěrečná zpráva | T0+15 měs. | Závěrečné zhodnocení, závěrečná zpráva | | | | | |
| HMG | | 2017 | | | 2018 | | | |
| | | II | III. | IV. | I. | II. | III. | IV. |
| Rešerše + návrh prací | | | | | | | | |
| Výroba pelet + laboratorní ověření | | | | | | | | |
| Návrh směsi v laboratoři | | | | | | | | |
| Produkce směsi + test většího měřítka | | | | | | | | |
| Experimentální zkoušky hutnění | | | | | | | | |
| Zhodnocení a závěrečná zpráva | | | | | | | | |

| | | |
|--|--|---------------------|
|  SÚRAO | Návrh a výroba směsi bentonitových pelet 1. Průběžná zpráva | Evidenční označení: |
| | | (doplň SÚRAO) |

Po shrnutí stávajícího stavu řešené problematiky je dalším cílem výroba pelet a laboratorní ověření vlastností pelet. V průmyslové výrobě budou odzkoušeny dvě varianty výroby, a to lisování bentonitu mezi válci a v kolovém mlýnu. Lisovaný bentonit bude mít různé vlhkosti. Laboratorně budou sledovány objemové hmotnosti sušiny vylisovaných pelet. Dále pak se laboratorní práce zaměří na zrnitostní složení pelet a jejich vlhkosti.

Měsíční HMG a hlavní práce pro etapu Výroba pelet a laboratorní ověření:

| měsíc | Popis předpokládaných prací |
|------------------|--|
| 10/2017 | Seznámení se s technologiemi lisování, odběr prvních vzorků lisovaného bentonitu a příprava podrobného popisu technologií lisování |
| 11/2017 | Seznámení se s technologiemi lisování, odběr prvních vzorků lisovaného bentonitu a příprava podrobného popisu technologií lisování |
| 12/2017 – 5/2018 | Zkoušky v průmyslové výrobě, laboratorní zkoušky a průběžné vyhodnocování |
| 6/2018 | Vyhodnocení etapy a případné doplňující zkoušky v průmyslové výrobě |

| | | |
|--|--|---------------------|
|  SÚRAO | Návrh a výroba směsi bentonitových pelet 1. Průběžná zpráva | Evidenční označení: |
| | | (doplň SÚRAO) |

8 Závěr


Dle provedeného shrnutí dosavadních poznatků a zkušeností z výroby pelet je zřejmé, že bentonitové pelety mohou být použity v konstrukci hlubinného úložiště. Jak ukazuje provedená rešerše, v některých aplikacích jsou pelety těžko zastupitelné.

V ČR byly zatím pelety úspěšně odzkoušeny při výstavbě modelu těsnící zátky (experiment EPSP). Vrstva z bentonitových pelet použitých v projektu EPSP splnila požadavky dané projektem. Pro další uvažované použití bentonitových pelet (buffer) je však nutné dosáhnout ještě vyšších objemových hmotností.

Na základě výsledků zahraničních projektů lze konstatovat, že lisováním je možno dosáhnout nejvyšší objemové hmotnosti sušiny jednotlivých pelet okolo $2,2 \text{ g/cm}^3$ a objemových hmotností sušiny pelet s upravenou zrnitostí po tzv. volném sypání okolo $1,5 \text{ g/cm}^3$.


Hlavním úkolem prací je tedy odzkoušení technologií, kterými se budou z českého bentonitu lisovat bentonitové pelety, a dosáhnout co možná nejvyšší objemové hmotnosti po tzv. volném sypání (ideálně $1,55 \text{ g/cm}^3$). Poskytovatel prací předpokládá, že všechny požadavky lze splnit a z českého bentonitu lze připravit pelety, které mohou být využitelné v dalších místech konstrukce hlubinného úložiště.

Podle výsledků rešerše a podle dosavadních zkušeností získaných z předchozích projektů je možné říci, že pro české úložiště v krystaliniku lze předpokládat všechna možná využití bentonitových pelet. Bentonitové pelety, drtě a směsi mohou být velice důležité pro zaplnění technologické spáry mezi bentonitovými bloky a horninou při svislém uložení ÚOS, ale také je možné, že bude výhodné pro české horninové podmínky modifikovat švýcarský systém zaplnění úložného tunelu bentonitovými peletami, který může výrazně zjednodušit výstavbu bufferu.


| | | |
|--|--|---------------------|
|  SÚRAO | Návrh a výroba směsi bentonitových pelet 1. Průběžná zpráva | Evidenční označení: |
| | | (doplňí SURAO) |

9 Bibliografie

- [1] 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>
- [2] 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>
- [3] HOLT, Erika, Mia LOIJA, Stefania FORTINO a Pieti MARJAVAARA. *Experimental studies of buffer gap filling with artfical 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
- [4] 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>
- [5] 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](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
- [6] MARJAVAARA, Pieti, Erika HOLT a Ville SJOBLÖM. *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
- [7] 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>
- [8] PACOVSKY, Jaroslav, Jiri STASTKA, Lucie HAUSMANNOVA, Zbynek KAISR a Zbynek VENKRBEK. CTU IN PRAGUE, FACULTY OF CIVIL ENGINEERING. *Výstavba, provozování a vyhodnocení demonstračního experimentu Mock-up-Josef: Dílčí zpráva č.1*. Praha, 2011.
- [9] 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

| | | |
|--|---|---------------------|
|  SÚRAO | Návrh a výroba směsi bentonitových pelet | Evidenční označení: |
| | 1. Průběžná zpráva | (doplňí SURAO) |

- Oy, 2012 [cit. 2013-08-21]. ISBN 978-951-652-198-8. Dostupné z: http://www.posiva.fi/files/3071/POSIVA_2012-17.pdf
- [10] TOGURI, Satohito, Hidekazu ASANO, Hajime TAKAO, Takeshi MATSUDA a Kiyoshi AMEMIYA. *Full-scale demonstration of EBS construction technology, (i) block, pellet and in-situ compaction method: presentation*. Radioactive Waste Management Funding and Research Center; JGC corporation. International Conference Underground Disposal Unit Design & Emplacement Processes for a Deep Geological Repository. 16-18 June 2008, Prague, 2008.
- [11] 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.
- [12] 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
- [13] 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
- [14] KRISTENSSON, Ola, Mattias ÅKESSON, Daniel MALMBERG a Lennart BÖRGESSON. *Description of Thermo - Hydro - Mechanical modeling of Bentonite clay performed by Clay Technology* [online]. b.r., , 3 [cit. 2017-11-16]. Dostupné z: <http://www.claytech.se/pdf/Beskrivning%20av%20THM-modellering%20av%20Bentonitlera%20v2.pdf>
- [15] 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>
- [16] PUSH, Rolan, Gunnar RAMQVIST, Niclas BOCKGARD a Lennart EKMAN. *Sealing of investigations boreholes, Phase 4: R-11-20* [online]. SKB, 2011, 51 s. [cit. 2016-11-21]. ISSN 1402-3091. Dostupné z: http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/44/045/44045470.pdf
- [17] *ADASI Morava* [online]. 2015 [cit. 2015-06-10].
- [18] *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>

| | | |
|--|--|---------------------|
|  SÚRAO | Návrh a výroba směsi bentonitových pelet 1. Průběžná zpráva | Evidenční označení: |
| | | (doplň SURAO) |

- [19] ŠTÁSTKA, 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.
- [20] 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
- [21] DVOŘÁKOVÁ, Markéta, Irena HANUSOVÁ, Jiří SVOBODA a Marek VENCL. *EXPERIMENT EPSP – STAVBA ZÁTKY PRO HLUBINNÉ ÚLOŽIŠTĚ RADIOAKTIVNÍCH ODPADŮ V RÁMCI EVROPSKÉHO PROJEKTU DOPAS*. 2014, 10 s.
- [22] 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].
- [23] 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].
- [24] 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>
- [25] 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>
- [26] KOHER, Sven, Benoit GARRITE, Hanspeter WEBER a Herwig MULLER. *LUCOEX - DELIVERABLE (D - N°:D 2.5) Emplacement Report LUCOEX – WP2*. NAGRA, 2015.
- [27] ANDRA, . The French geological disposal project Cigéo: A converging approach. In: *Waste Management Symposia 2013* [online]. 2013, s. 23 [cit. 2015-10-06].

NAŠE BEZPEČNÁ BUDOUCNOST



SÚRAO

Správa úložišť radioaktivních odpadů

Dlážděná 6, 110 00 Praha 1

Tel.: 221 421 511, E-mail: info@surao.cz

www.surao.cz