

Technická zpráva číslo 388/2019

# PROVEDENÍ PŘEDBĚŽNÉHO VÝPOČTU TLAKU NA UOS - ZÁVĚREČNÁ ZPRÁVA

Autoři: Martin Hasal, Zdeněk Michalec, Radim Blaheta

Ústav geoniky AV ČR, v.v.i.

**Ostrava, listopad 2018**



**Název projektu: Výzkumná podpora pro bezpečnostní hodnocení hlubinného úložiště**

**Název dílčího projektu: Provedení předběžného výpočtu tlaku na UOS**

**Závěrečná zpráva**

*Evidenční číslo objednatele: SÚRAO TZ 388/2019*

*Evidenční číslo poskytovatele: PB-2019-ZZ-U1937-040-Tlak\_kontejneru*

**Řešitelé a autoři: Martin Hasal, Zdeněk Michalec, Radim Blaheta**

**Ústav geoniky AV ČR, v.v.i.**



## Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b> .....	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>Zdroje tlaku a materiálové parametry</b> .....	<b>13</b>
2.1	Jevy měnící tlak na UOS .....	13
2.1.1	Omezení hodnot bobtnacího tlaku.....	21
2.2	Vyhodnocení jednotlivých zdrojů tlaků působících na UOS .....	22
2.3	Metodika výpočtu .....	22
<b>3</b>	<b>Modelové situace</b> .....	<b>24</b>
3.1	Deformace kontejneru .....	24
3.2	Plně omezený objem.....	30
3.3	Částečně omezený objem.....	32
3.4	Proměnná objemová hustota bentonitu .....	33
3.4.1	Situace s volnou mezerou mezi bentonitem a horninou případně i bentonitem a UOS	33
3.4.2	Situace s mezerou zaplněnou bentonitem jiného typu.....	35
<b>4</b>	<b>Dosavadní publikovaný výzkum v dané problematice</b> .....	<b>36</b>
4.1	Situace při nerovnoměrném sycení bentonitu.....	36
4.2	Situace při posunu na poruše jdoucí napříč úložným vrtem.....	37
4.3	DECOVALEX 2019 projekt – EB experiment.....	38
4.4	Simulace úložiště dle švédského konceptu KSB-3 .....	42
4.5	Vývoj celkového tlaku v bentonitu při změnách vody/plynu.....	45
4.5.1	Vliv Injektované vody.....	45
4.5.2	Vliv injektovného plynu.....	50
<b>5</b>	<b>Závěr</b> .....	<b>52</b>
<b>6</b>	<b>Seznam literatury</b> .....	<b>54</b>

## Seznam obrázků:


Obr. 1 Závislost bobtnacího tlaku (Swelling pressure) na objemové hmotnosti (dry density) pro FEBEX bentonit. Kde šedé čtverce reprezentují měření, a černá plná křivka reprezentuje korelované měření, Gens 2016. ....	15
Obr. 2 Závislost bobtnacího tlaku (Swelling pressure) na objemové hmotnosti (dry density) pro pelety z FEBEX bentonitu. Kde modré trojúhelníky reprezentují měření, a černá plná křivka reprezentuje korelované měření za konstantního objemu, Gens 2016. ....	15
Obr. 3 Závislost bobtnacího tlaku bobtnacího tlaku na objemové hmotnosti bentonitu B75, Šťástka 2014. ....	16
Obr. 4 Závislost bobtnacího tlaku bobtnacího tlaku na objemové hmotnosti bentonitu B75, Vašíček 2014. ....	16
Obr. 5 Závislost bobtnacího tlaku (Swelling pressure) na objemové hmotnosti (final dry density) pro FEBEX bentonit pro různé druhy vody, deionised – destilovaná voda, Gens 2016. ....	17
Obr. 6 Závislost bobtnacího tlaku $MPa$ (swelling pressure) na teplotě $^{\circ}C$ (temperaure) pro bloky FEBEX bentonitu. Červená barva reprezentuje závislost pro bentonit o $\rho d = 1500 kg \cdot m - 3$ , zelená barva reprezentuje $\rho d = 1600 kg \cdot m - 3$ a modrá odpovídá $\rho d = 1700 kg \cdot m - 3$ . Villar 2009. ....	18
Obr. 7 Vývoj teploty ( $^{\circ}C$ ) v okolí v HÚ ve vertikálním směru v čase - horizontální uložení vzdálenost mezi vrty 21m a 1,4 mezi UOS-NJZ. Záporné hodnoty v ose z udávají směru pod úložiště, kladné hodnoty v ose z udávají směru nad úložiště. ....	19
Obr. 8 Závislost bobtnacího tlaku bobtnacího tlaku na objemové hmotnosti bentonitu B75, Šťástka 2014 – II. Modré body reprezentují měření a modrá linie reprezentuje aproximační exponenciální křivku průběhu měření. Červená křivka představuje předpokládanou maximální hodnotu bobtnacího tlaku a zelená dolní odhad bobtnacího tlaku. ....	21
Obr. 9 Schématický návrh kontejneru ve variantě 1a včetně rozměrů. ....	24
Obr. 10 Schématický návrh kontejneru ve variantě 2 včetně rozměrů. ....	25
Obr. 11 Výpočetní oblasti pro jednotlivé varianty UOS - VVER 440. (vlevo) Výpočetní oblast pro Variantu 1. (uprostřed) Detail na mezeru mezi vnitřním a vnějším pláštěm. (vpravo) Výpočetní oblast pro Variantu 2. Modrá hranice reprezentuje předepsanou tlakovou okrajovou podmínku. ....	26
Obr. 12 Výsledné posunutí (deformace) v radiální složce $m$ při tlaku $10 Mpa$ . (vlevo) Varianta 1. (vpravo) Varianta 2. ....	27
Obr. 13 Schematické zobrazení modelu s omezeným objemem. ....	31
Obr. 14 Schematické zobrazení modelu s částečně omezeným objemem. ....	33
Obr. 15 Schematické zobrazení modelu s přítomností technologický mezer. ....	34
Obr. 16 Schématické zobrazení nerovnoměrného sycení bentonitu, dle Börgesson 2009. Černé šipky znázorňují preferenční saturační cestu, respektive zvýšení tlaku v tomto směru. ....	36
Obr. 17 Znázornění dvou limitních případů při tvorbě ukládacího vrtu (Case 1 a Case 2) dle Börgesson 2009. Červená čerchovaná linie zobrazuje tzv. banánový vrt. Modře je zobrazena situace při odlomení masivu. ....	37

Obr. 18 Příklad výsledků z Börgesson L. et al. 2004. Deformovaná síť po 23 mm smykovém posuvu. (vlevo) Deformovaná konečně-prvková síť s odstraněnou horní částí. (vpravo) průměrné napětí v bentonitu ( <i>MPa</i> ). .....	38
Obr. 19 Rozložení EB experimentu. Kanistr (Dummy canister), pelety (Granular backfill), bentonitové bloky (Bentonite blocks), betonové lůžko (Concrete bed). .....	39
Obr. 20 Celkové napětí (Total pressure) <i>bar</i> v čase (Time) <i>dny</i> pro senzory PE1 a PE2. ....	40
Obr. 21 Celkové napětí (Total pressure) <i>bar</i> v čase (Time) <i>dny</i> pro senzory PE3, PE4, PE7 a PE8. ....	41
Obr. 22 Celkové napětí (Total pressure) <i>bar</i> v čase (Time) <i>dny</i> pro senzory PE5 a PE6. ....	41
Obr. 23 Ukázka homogenizace bentonitu na konci experimentu-téměř plná saturace .....	42
Obr. 24 Čtvrtina symetrického modelu hypotetického uložště lokalizovaného v hloubce 1000m. Model prezentovaný Royal Institute of Technology, Chijimatsu a kol. 2005. ....	42
Obr. 25 (vlevo) Vývoj tlaku na kontejner dle týmu z LBNL. (vpravo) Průběh teploty na povrchu kontejneru dle LBNL, Rutqvist a kol. 2015. ....	44
Obr. 26 (vlevo) Srovnání vývoj tlaku na kontejner dle týmu z LBNL. (vpravo) Průběh teploty na povrchu kontejneru dle LBNL. Červená křivka reprezentuje mírně porušenou horninu (sparsely fractured) a zelená reprezentuje neporušenou horninu (unfractured), obě jsou výstupem z modelu LBNL, Rutqvist a kol. 2015. ....	44
Obr. 27 Vývoj celkového tlaku (Evolution of compressive stress) v jednom bodě na kontejneru při zapojení různých modelů, Rutqvist a kol. 2015. ....	45
Obr. 28 Řez zařízením pro migraci plynu za konstantního objemu bentonitu a radiálním průtokem plynu. Snímače jsou následující: [PT1] - celkové axiální napětí na koncovém uzavření zpětného tlaku, [PT2] - celkové axiální napětí na koncovém uzavěru vstřikování, [PT3] - celkové radiální napětí v blízkosti zavádění koncového vstřikování, [PT4] ] – pórový tlak v blízkosti koncového uzavěru pro injektáž, [PT5] - celkové radiální napětí v střední rovině a [PT6] - celkové radiální napětí blízko koncového uzavření zpětného tlaku. Hodnoty 1,2 a 3 označují umístění senzorů pro měření průtoku plynu. Části zařízení jsou Vitonův těsnící kroužek (Viton 'O' ring), Bentonit (Bentonite), Filtry z nerezové oceli (Stainless steel filters), Dálkový snímač tlakové vody (Remote porewater pressure sensor), Šroub s uzavěrem (Cap screw), Tlaková tyč pro přenos hraničního napětí (Push-rod), Vstřikovací sestava (Injection assembly), Tlaková tyč (Annular tube), Snímač radiálního napětí (Radial stress sensor), Radial sink arrays (Radiální pole pro měření průtoku plynu), Tlaková nádoba (Pressure vessel), Snímač axiálního napětí (Axial stress sensor), Koncová část (End closure). ....	46
Obr. 30 Monitorované změny celkového tlaku v MX-80- 10 vzorku ve dnech (Elapsed time (days)). Růžová křivka reprezentuje injektovaný tlak (Porewater pressure) a ostatní čáry reprezentují tlakovou odezvu v jednotlivých čidlech (Total stress). ....	47
Obr. 33 Detail intervalu 60 až 80 dne z Obr. 34. ....	51
Obr. 34 Časový průběh injektáže plynu do tlakové nádoby. Tlak injektovaného plynu a celkové napětí (Gas pressure and total stress), Pórový tlak (Porewater pressure), uplynulý čas – dny (Elapsed time (days)). ....	51

## Seznam tabulek:


Tab. 1 Chemické složení Pearsonovy vody. ....	17
Tab. 2 Materiálové parametry jednotlivých materiálů použitých ve výpočtu. ....	25
Tab. 3 Hodnoty maximálního posunutí (deformace) ve směru Z – paralelní s osou symetrie (axiální) a R – kolmý (radiální) na osu symetrie pro obě varianty UOS. Hodnota tlaku na kontejner byla předepsaná jako 10 MPa na vnější hranici. ....	27
Tab. 4 Hodnoty maximálního posunutí (deformace) ve směru Z – paralelní s osou symetrie (axiální) a R – kolmý (radiální) na osu symetrie pro obě varianty UOS. Hodnota tlaku na kontejner byla předepsaná jako 15 MPa na vnější hranici. ....	27
Tab. 5 Varianta 1a – délkové parametry UOS, poloměry materiálů v UOS, objemy jednotlivých částí, plocha poloviny pláště UOS, plocha podstavy UOS, váha vnitřního a vnějšího pláště, tlak na plášť při horizontálním uložení a tlak na podstavu při vertikálním uložení. ....	29
Tab. 6 Varianta 2 – délkové parametry UOS, poloměry materiálů v UOS, objemy jednotlivých částí, plocha poloviny pláště UOS, plocha podstavy UOS, váha vnitřního a vnějšího pláště, tlak na plášť při horizontálním uložení a tlak na podstavu při vertikálním uložení. ....	29



 <b>SÚRAO</b>	<b>Provedení předběžného výpočtu tlaku na UOS – Závěrečná zpráva</b>	Evidenční označení:
		<b>SÚRAO TZ 388/2019</b>

### Seznam použitých zkratk:

D-2019	DECOVALEX-2019
DECOVALEX-2019	Development of Coupled Codes and Their Validation against Experiments
EB	Engineered Barrier Emplacement Experiment
EBS	Engineered Barrier System (systém inženýrských bariér)
EDZ	Excavation Damaged Zone (zóna porušená ražbou)
FEBEX	Full-scale Engineered Barriers Experiment
HÚ	Hlubinné úložiště (radioaktivních odpadů)
NJZ	Nový jaderný zdroj
LBNL	Lawrence Berkeley National Laboratory
RAO	Radioaktivní odpad
SW	Software
THMC	Termo-hydro-mechanicko-chemické
ÚGN	Ústav geoniky AV ČR
UOS	Ukládací obalový soubor
VJP	Vyhořelé jaderné palivo
ZZ	Závěrečná zpráva

 <b>SÚRAO</b>	<b>Provedení předběžného výpočtu tlaku na UOS – Závěrečná zpráva</b>	Evidenční označení:
		<b>SÚRAO TZ 388/2019</b>

## Abstrakt

Cílem tohoto projektu je určit maximální hodnotu působícího tlaku na ukládací obalový soubor (UOS), který bude sloužit k uložení jaderného odpadu. Maximální hodnota tlaku na UOS představuje veličinu, jež je důležitá z dlouhodobého pohledu hodnocení bezpečnostních funkcí UOS. Časový horizont tohoto projektu se pohybuje v oblasti plné nebo téměř plné saturace inženýrské bariéry a nenarůstající teploty v okolí UOS.

V rámci tohoto projektu jsou posuzovány veškeré zdroje tlaku působícího na UOS a je postupně evaluována míra jejich vlivu. Došlo k určení signifikantních zdrojů tlaků a s těmito bylo pracováno v definovaných modelových situacích.

Byly vytvořeny modelové situace reprezentující pravděpodobné situace, které mohou nastat během uložení UOS v budoucím hlubinném úložišti (HÚ). Základním předpokladem je nestlačitelnost samotného UOS, jež je za pomoci numerické simulace validována. Byla vytvořena metodika, podle níž lze vypočítat maximální hodnotu tlaku působícího na UOS za každé situace, která nastane v budoucím HÚ. Finální část práce je věnována krátkému rozboru zahraničních projektů na podobnou problematiku.

## Klíčová slova

*Thermo-hydro-mechanicko-chemické jevy, predikce, tlak na ukládací obalový soubor, simulace, DECOVALEX.*


## Abstract

This project aims to determine the maximum value of pressure on the container, which will serve to store nuclear waste inside. The maximum pressure value on the container is a value that is related to safety assessment of the long-term container functionality in the future nuclear waste disposal. The time horizon of this project interests in the period of either full or almost full saturation of the engineering barrier and the not increasing temperature around the container.

Within this project, all sources of pressure on the container are considered, and the extent of their impact is gradually evaluated. Significant pressure sources are identified and used in model situations. Defined model situations reflect the individual situations that may occur during container storage in a future underground repository. The basic assumption is the incompressibility of the container itself. It was validated by numerical simulation. A methodology has been developed, which provides the way how to calculate the maximal pressure on the container under every situation that can occur in the future repository. The final part of the report is devoted to short summary of foreign projects with a similar focus.

## Keywords

*Thermo-hydro-mechanical-chemical phenomena, prediction, pressure on container, simulation, DECOVALEX.*

 <b>SÚRAO</b>	<b>Provedení předběžného výpočtu tlaku na UOS – Závěrečná zpráva</b>	Evidenční označení:
		<b>SÚRAO TZ 388/2019</b>

## 1 Úvod


Tato zpráva byla zpracována v rámci projektu SÚRAO „Výzkumná podpora bezpečnostního hodnocení hlubinného úložiště“, který je součástí přípravy hlubinného úložiště radioaktivních odpadů (dále jen HÚ). Cílem projektu je získat vybraná data, modely, argumenty a další informace potřebné pro zhodnocení potenciálních lokalit pro umístění HÚ z hlediska dlouhodobé bezpečnosti. Na základě veřejného zadávacího řízení byla v červenci 2014 uzavřena čtyřletá smlouva s ÚJV Řež, a. s. a jeho subdodavateli: Českou geologickou službou; ČVUT v Praze; Technickou univerzitou v Liberci; Ústavem Geoniky AV ČR, v. v. i.; a společnostmi Arcadis CZ a. s.; Progeo, s. r. o.; Chemcomex Praha, a. s. a Centrum výzkumu Řež s. r. o. o poskytování výzkumné podpory hodnocení dlouhodobé bezpečnosti v následujících oblastech:

- i. Chování VJP a forem RAO, nepřijatelných do přípovrchových úložišť, v prostředí hlubinného úložiště;
- ii. Chování ukládacích obalových souborů (UOS) VJP a RAO v prostředí hlubinného úložiště;
- iii. Chování tlumících, výplňových a dalších konstrukčních materiálů v prostředí hlubinného úložiště;
- iv. Řešení úložných vrtů a jejich vliv na vlastnosti obklopujícího horninového prostředí;
- v. Chování horninového prostředí;
- vi. Transport radionuklidů z úložiště;
- vii. Další charakteristiky lokalit potenciálně ovlivňující bezpečnost úložiště.

Cílem tohoto projektu „Provedení předběžného výpočtu tlaku na UOS“ je předběžné vyhodnocení tlaku na UOS v budoucím HÚ. Znalost tlaku na kontejner je důležitá z dlouhodobého pohledu hodnocení bezpečnostních funkcí UOS. Předpokládaná délka životnosti UOS je v řádů tisíců let, proto je důležité znát tlak, který na UOS bude vyvíjen. Neboli, tlak je jedním z důležitých parametrů pro návrh UOS, který ovlivní životnost UOS jako jedné z inženýrských bariér v budoucím HÚ.

V tomto projektu je vypočítána pravděpodobná hodnotu tlaku, jež bude působit na kontejner v různých místech a za různého spektra situací, jež se mohou nacházet v HÚ. Časová perioda pro výpočet tlaku je určena, jako období, kdy nastane plná (nebo téměř plná) saturace bentonitu a teplo produkované VJP nebude výrazně převyšovat okolní teplotu masivu (rozdíl méně než 8°C). Cílem tohoto zadávacího listu (ZL) není přesné určení data, kdy tento okamžik nastane, protože toto závisí na přesné konfiguraci HÚ. Více informací lze nalézt v Hasal a kol. 2017.

Organizace této závěrečné zprávy (ZZ) kopíruje postup prací se ZL. Nejprve byla provedena studie dosavadních poznatků, která sumarizuje možné a hlavní příčiny zvýšeného tlaku na UOS. Dále poté byly vyhodnoceny materiálové parametry bentonitu, jehož bobtnací vlastnosti vytvářejí jeden z hlavních zdrojů zvýšeného tlaku působícího na UOS. Studován byl bentonit FEBEX, pro nějž jsou známy veškeré materiálové charakteristiky, jež ovlivňují velikost bobtnacích účinků. Dále byly studovány dostupné zdroje pro český bentonit. Na jejich základě, byly provedeny výpočty pro předběžné určení tlaku působícího na UOS za využití českého bentonitu. Ne všechny vlastnosti českého bentonitu byly známy, proto se provedla predikce chování za základě znalostí vlastností FEBEX bentonitu. Na tomto základě byl doporučen

 <b>SÚRAO</b>	<b>Provedení předběžného výpočtu tlaku na UOS – Závěrečná zpráva</b>	Evidenční označení:
		<b>SÚRAO TZ 388/2019</b>

seznam experimentů, které by měly být provedeny k upřesnění chování českého bentonitu, viz Kapitola 5.

Zaměřili jsme se na typické situace, které mohou nastat při (vertikálním/horizontálním) uložení UOS v HÚ. Přičemž jsme zkoumali následující situace:

- a) Plně omezený objem – UOS a okolní bentonitové těsnění v objemu je v těsném kontaktu, který neumožňuje žádnou expanzi v důsledku bobtnání. Nebyla brána v potaz vlastní váha UOS neboli působící tlak na UOS je zcela rovnoměrný a daný vlastnostmi bentonitu a jeho počáteční objemovou hustotou za sucha.
- b) Rozšíření situace a) – přidání možnosti expanze/imploze bentonitu určitým směrem
- c) Existence technologických mezer – mají za následek postupné snížení objemové hustoty za sucha a následně snížení maximálního bobtnacího tlaku.
- d) V poslední modelové situaci byl uvažován vliv nehomogenity.

Všechny výpočty a získané poznatky jsou uvedeny v této ZZ. Závěr ZZ sumarizuje celou problematiku a přidává seznam doporučení pro budoucí zpřesnění výpočtů tlaků na kontejner.

Dále byla tato zpráva rozšířena o poznatky sumarizující zahraniční výzkum v této oblasti, jež má přímý vliv na řešenou problematiku, viz Kapitola 4. Uvedené poznatky rozšiřují text z předchozích kapitol. Jednalo se o problematiku extrémního zvýšení tlaku za extrémních situací, jako zemětřesení, nerovnoměrné saturace bentonitu nebo nevhodného tvar vrtu. Dále byl text rozšířen o poznatky z mezinárodního projektu DECOVALEX, které ukazují pravděpodobný vývoj tlaku v čase.

## 2 Zdroje tlaku a materiálové parametry

Skladba HÚ zahrnuje přítomnost velkého množství materiálů o různých vlastnostech a prostorovém uspořádání. V této kapitole jsme se pokusili najít příčiny zvýšení tlaku na UOS a vydefinovat ty signifikantní pro předběžný výpočet tlaku na UOS. Tato kapitola také obsahuje rozbor materiálových parametrů bentonitu ve vztahu k řešené problematice, jež představuje jeden z hlavních zdrojů zvýšeného tlaku působícího na UOS.

### 2.1 Jevy měnící tlak na UOS

Podrobnou analýzou bylo zjištěno, že tlak na UOS bude způsoben přítomností následujících jevů:

- 1) Hydrostatický tlak vody v hornině, jež je prostřednictvím téměř plně saturovaný bentonit přenášen na UOS.
- 2) Bobtnací tlak bentonitu.
- 3) Zvýšená teplota bentonitu a okolní horniny.
- 4) Degradace UOS, přičemž korozní produkty mají větší objem než korodovaný materiál.
- 5) Zvýšení pórového tlaku vlivem uvolňování plynu během koroze.
- 6) Chemické změny materiálů – bentonitu.
- 7) Deformace technických vrtů a úložného vrtu.

Následuje postupné vyjádření ke všem bodům a úvaha o jejich vlivu na celkový tlak působící na UOS. Cílem tohoto projektu je řádově určit přibližnou hodnotu tlaku na kontejner, ne jeho přesnou hodnotu. Protože pro určení přesné hodnoty je třeba znát detailní materiálové parametry pro danou lokalitu HÚ. V následujícím textu je brána v potaz řada zjednodušení, ale vždy je vysvětleno, za jakých okolností takové zjednodušení lze použít. Případně jaký je vliv zjednodušení na celkovou očekávanou hodnotu tlaku.

Ad 1) Hydrostatický tlak vody


Hydrostatický tlak  $p_w [Pa]$  lze vypočítat jako

$$p_w = \int_0^z \rho_w(z) g dz \approx \rho_w g z,$$

kde  $\rho_w(z)$  je hustota horniny závislá na hloubce  $z [m]$ ,  $g$  je gravitační konstanta [ $m \cdot s^{-2}$ ],  $\rho_w$  je hustota vody [ $kg \cdot m^{-3}$ ]. Zjednodušení ( $\approx$ ) si můžeme dovolit, ale obecně platí, že výpočet hydrostatického tlaku vody závisí na přesné definici všech třech proměnných.

Hustota vody se mění s geotermickým stupněm s přírůstkem  $3^\circ C$  na každých 100 m hloubky. Neboli v dané hloubce pro tento projekt bude  $22^\circ C$ . Kdy hustota vody je  $997.76 kg \cdot m^{-3}$ . Na druhou stranu tato hodnota platí pro demineralizovanou vodu a v krystalinických horninách platí, že hustota vody roste z hloubkou, protože se zvyšuje koncentrace minerálu rozpuštěných ve vodě. Ale přesné hodnoty tlaku ani hustoty vody lze zjistit jen odběrem z dané lokality. Změna hustoty a teploty, má ale minimální vliv (změna v  $kPa$  oproti očekávané hodnotě tlaku v  $MPa$ ) v dané hloubce, proto bude počítáno s konstantní hustotou vody  $1000 kg \cdot m^{-3}$  při teplotě  $4^\circ C$ .

Taktéž hodnota gravitačního zrychlení je různá v různých místech planety, což také souvisí s proměnnou hustotou země a vzdáleností od gravitačního středu. Hloubka 500 m tvoří zanedbatelnou vzdálenost proti poloměru země ( $6\,371\,m$ ), proto budeme

 <b>SÚRAO</b>	<b>Provedení předběžného výpočtu tlaku na UOS – Závěrečná zpráva</b>	Evidenční označení:
		<b>SÚRAO TZ 388/2019</b>

počítat s konstantní hodnotou  $9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ , a později se zaokrouhlenou hodnotou  $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ .

Lze pozorovat, že v hloubce  $z_w = 100 \text{ m}$  je

$$p_w = 1000 \cdot 9,81 \cdot 100 = 981 \text{ kPa}.$$

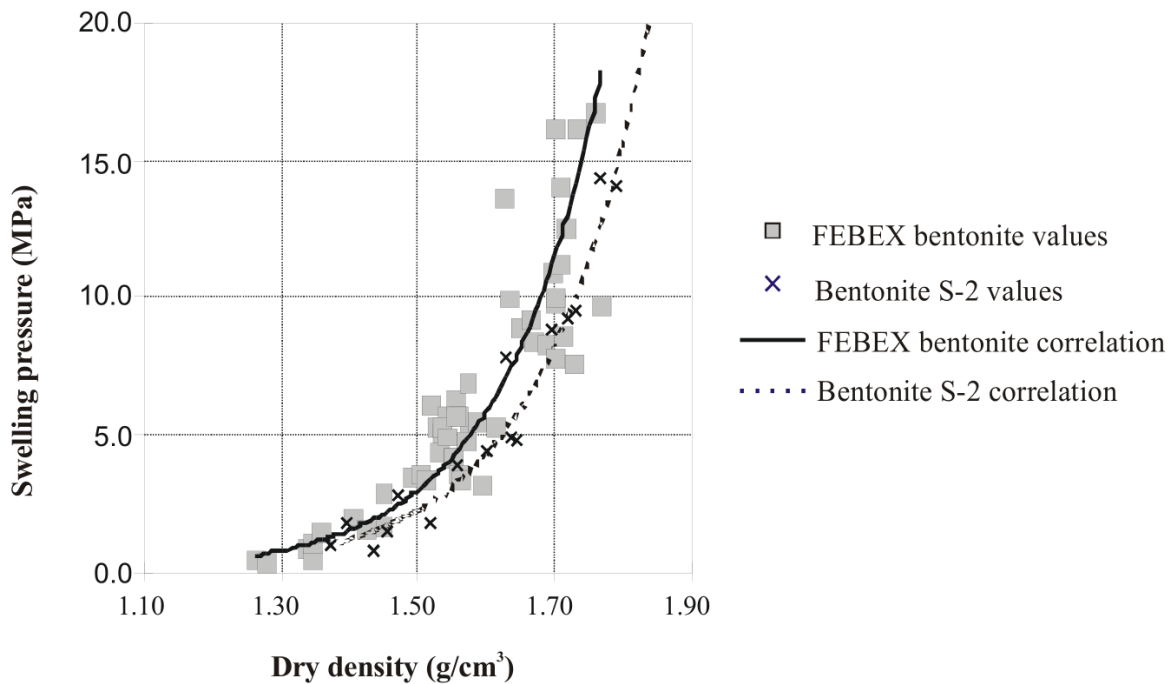
Neboli na každých 100 m hloubky se hodnota hydrostatického tlaku zvýší o přibližně 1 MPa. Tudíž v uvažované hloubce  $z_w = 500 \text{ m}$  bude hodnota hydrostatického tlaku přibližně  $5 \text{ MPa} = 5 \cdot 10^6 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ . Jedná se o limitní hodnotu, jež nemůže být překročena. V zásadě platí, že tato hodnota 5 MPa platí pro spojitý vodní sloupec. Neboli pokud porézní systém v hornině bude spojitý od povrchu až k UOS, pak hodnota tlaku na kontejneru bude ovlivněna velikostí hydrostatického tlaku. Pokud se v budoucím HÚ mezi povrchem a UOS objeví velmi nepropustná vrstva materiálu (např. jílová), jež uzavře porézní systém, pak tato hodnota může být menší. Zkušenosti z Äspö Hard Rock Laboratory ukazují, že švédští kolegové pracují s touto limitní hodnotou tlaku, Dixon 2000.

#### Ad 2) Bobtnací tlak bentonitu

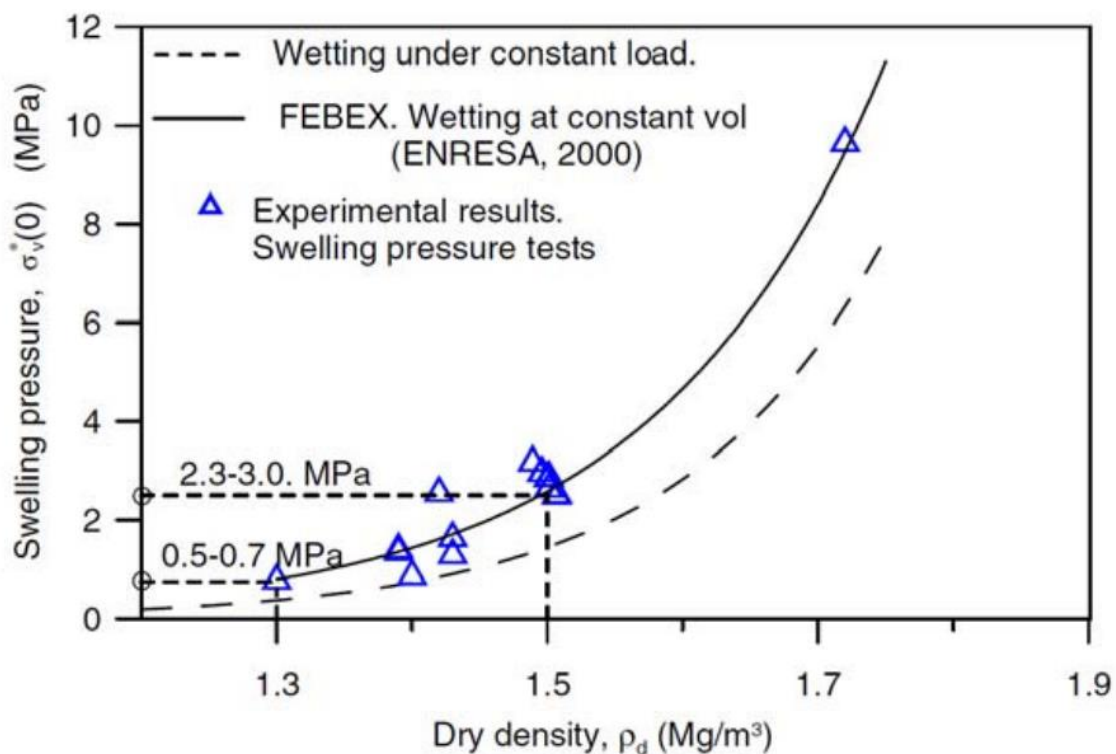
Zhutnění bentonitu do formy bloku nebo pelet je jednou z možností, jak dopravit materiál do HÚ. Zhutněný bentonit poté slouží pro konstrukci jedné z inženýrských bariér zabráňujících šíření radionuklidů do prostředí, více lze nalézt v Pospíšková a kol. 2015. Podstatná je skutečnost, že zhutněný bentonit při kontaktu se vzdušnou vlhkostí či vodou začne bobtnat. Neboli v HÚ zhutněný bentonit vyplní všechen volný prostor (spáry, mezery, pukliny atd.) a pokud má stále bobtnací potenciál, ale nemá prostor kam bobtnat, pak začne tlačít na své okolí. Jinými slovy, pokud dojde k uzavření prostoru okolí UOS bentonitem, jež dále nemá prostor k bobtnání, dojde ke zvýšení působícího tlaku na UOS. Toto zvýšení tlaku je závislé hlavně na objemové hustotě bentonitu a případně dalších jevech, jako saturaci, teplotě, druhu vody atd. Poznamenejme, že časové období pro tento projekt je stabilní období, tj. období s minimální změnou objemové hmotnosti bentonitu  $\rho_d [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$ .

Závislost bobtnacího tlaku [MPa] na objemové hmotnosti bentonitu  $\rho_d [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$  pro zhutněný FEBEX bentonit lze pozorovat na Obr. 1. Lze vidět, že daná závislost roste exponenciálně. Dále je dobré si povšimnout, jak pro velmi podobné objemové hmotnosti vycházejí různé hodnoty bobtnacího tlaku. Např. pro  $\rho_d = 1,7 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  je hodnota bobtnacího tlaku v mezích od 8 až po 16 MPa. Původ je stále předmětem zkoumání a nejpravděpodobnějším závěrem je, že závisí na uspořádání a orientaci vnitřních mezivrstev bentonitu, které mají vždy ve směru kolmém na vnitřní mezivrstvy větší bobtnací sílu, viz Gens 2017.

Závislost bobtnacího tlaku [MPa] na objemové hmotnosti bentonitu  $\rho_d [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$  pro pelety z FEBEX bentonitu lze pozorovat na Obr. 2. Z porovnání Obr. 1 a Obr. 2 je zřejmé, že bobtnací tlak pro pelety je podobný bobtnacímu tlaku zhutněných bentonitových bloků. Pozn. pelety mají vyšší počáteční objemovou hmotnost, ale mají větší volný prostor mezi peletami, když se umístí do měřicího zařízení. Proto je zde uvažována průměrná objemová hmotnost v měřicím zařízení na objem, který zabere zhutněný bentonit.



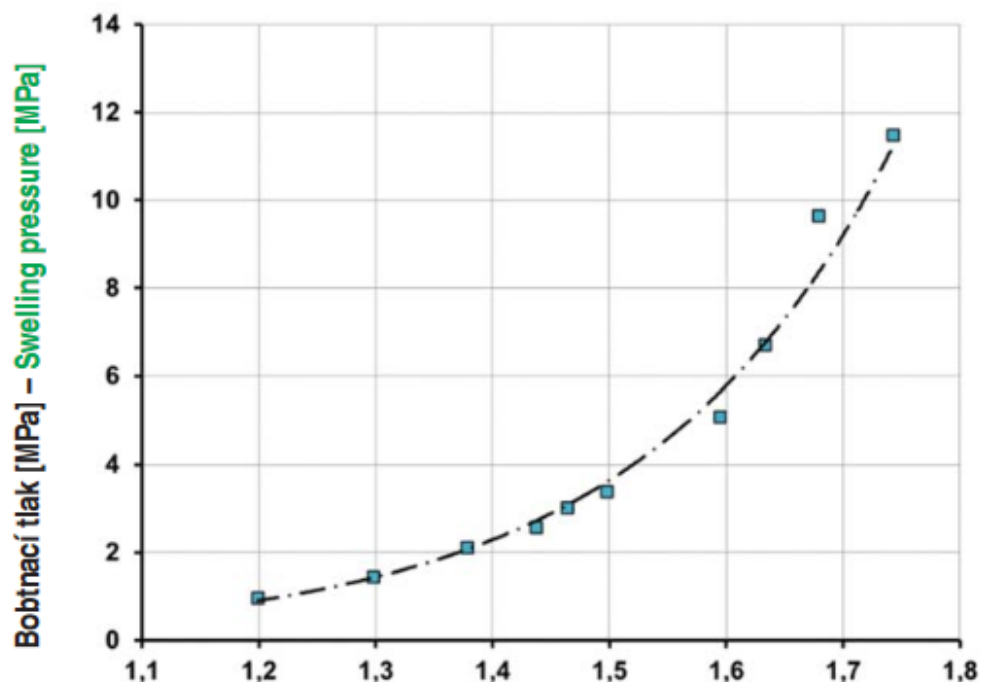
Obr. 1 Závislost bobtnacího tlaku (Swelling pressure) na objemové hmotnosti (dry density) pro FEBEX bentonit. Kde šedé čtverce reprezentují měření, a černá plná křivka reprezentuje korelované měření, Gens 2016.



Obr. 2 Závislost bobtnacího tlaku (Swelling pressure) na objemové hmotnosti (dry density) pro pelety z FEBEX bentonitu. Kde modré trojúhelníky reprezentují měření, a černá plná křivka reprezentuje korelované měření za konstantního objemu, Gens 2016.

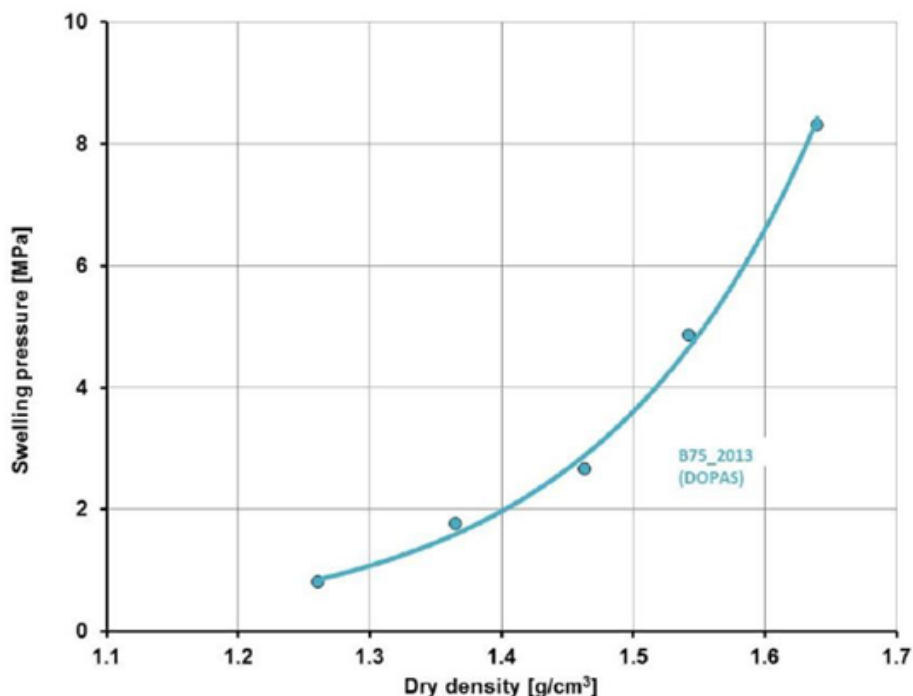


Pro český bentonit B75 jsme v dostupné literatuře našli dvě měření. První z nich je zobrazeno na Obr. 3 a druhé na Obr. 4. Je zřejmé, že oba výsledky se liší, přičemž oba popisují chování bentonitu B75. Což jen dokazuje, jaký rozptyl mohou mít měření, viz Obr. 1.



#### Objemová hmotnost vysušené zeminy [Mg/m<sup>3</sup>] – Dry density of soil [Mg/m<sup>3</sup>]

Obr. 3 Závislost bobtnacího tlaku bobtnacího tlaku na objemové hmotnosti bentonitu B75, Št'ástka 2014.



Obr. 4 Závislost bobtnacího tlaku bobtnacího tlaku na objemové hmotnosti bentonitu B75, Vašíček 2014.

Jak bylo uvedeno výše, na bobtnací tlak bentonitu má vliv několik faktorů. Některé z nich mohou být vyloučeny ve studovaném stabilním období, ale v celém období životnosti HÚ má vliv druh vody na bobtnací účinek bentonitu. Na Obr. 5 lze pozorovat

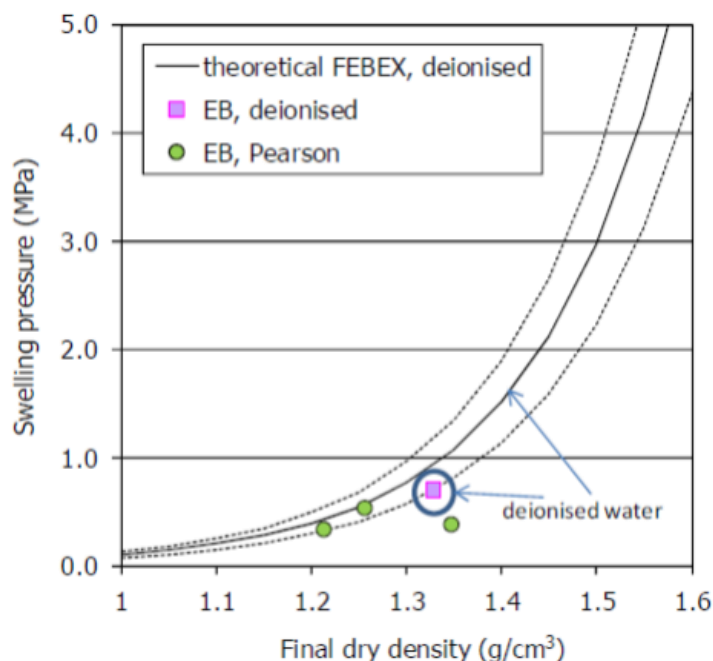


snížení bobtnacího účinku bentonitu FEBEX za použití Pearsonovy vody, což je slaná voda s obsahem chloridu sodného 19 g/L, která má podobné složení jako voda v okolní hornině Opalinus clay. Chemické složení Pearsonovy vody je uvedeno v Tab. 1. Dále platí, že obsah solí ve vodě významně ovlivňuje fyzikální parametry nejen bobtnací tlaku, ale i permeabilitu, saturační křivku (osmotický tlak). Obecně tedy platí, že čím vyšší obsah minerálů ve vodě tím více snížený bobtnací tlak.

Veškeré poznatky, zde uvedené, platí pro čistý bentonit, ne pro bentonit ve směsi např. s křemičitým pískem. Dále platí, že pro jiné druhy bentonitu mohou být uvedené výsledky jiné. Dále, zde uvedené závislosti bobtnacího tlaku na druhu vody nebylo možné vyhledat pro český bentonit.

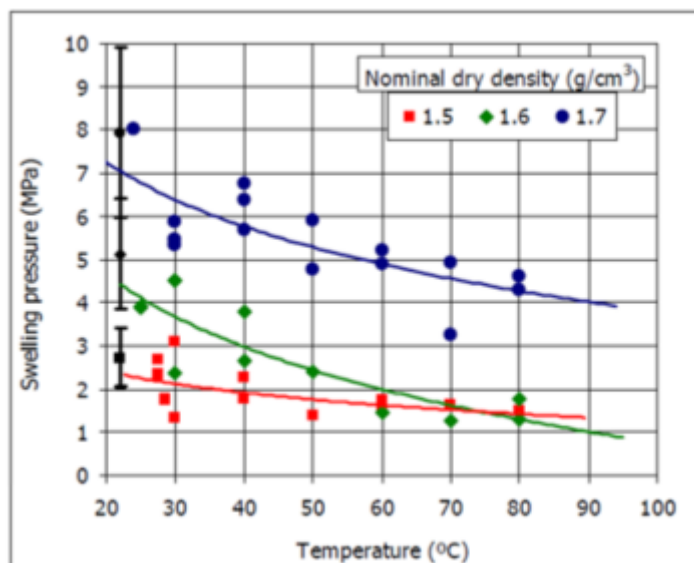
Tab. 1 Chemické složení Pearsonovy vody.

Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Sr <sup>+</sup>	pH
10635.90	1354.41	25.75	413.19	1034.06	5550.01	62.95	44.69	7.6



Obr. 5 Závislost bobtnacího tlaku (Swelling pressure) na objemové hmotnosti (final dry density) pro FEBEX bentonit pro různé druhy vody, deionised – destilovaná voda, Gens 2016.

Platí, že bobtnací tlak se snižuje s teplotou, viz Obr. 6. Při teplotě okolo 22°C jsou provedeny i experimenty na měření bobtnacího tlaku bentonitu, které zde byly uvedeny. Je pravdou, že se zvyšující teplotou se snižují bobtnacího účinky bentonitu. K podložení tohoto tvrzení, ale nejsou k dispozici měření pro český bentonit, proto doporučujeme v případě potřeby tyto parametry doměřit a v této práci budeme počítat bez snížení bobtnacích účinků bentonitu vlivem zvýšené teploty. Z Obr. 6 je patrné, že čím vyšší je objemová hmotnost, tím vyšší je procentuální snížení bobtnacího tlaku vlivem teploty FEBEX bentonitu.



Obr. 6 Závislost bobtnacího tlaku [MPa] (swelling pressure) na teplotě [°C] (temperature) pro bloky FEBEX bentonitu. Červená barva reprezentuje závislost pro bentonit o  $\rho_d = 1500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , zelená barva reprezentuje  $\rho_d = 1600 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  a modrá odpovídá  $\rho_d = 1700 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . Villar 2009.

#### Ad 3) Zvýšená teplota bentonitu a okolní horniny.

Vycházíme z předpokladu, že teplota na povrchu UOS nesmí překročit 95°C, Pospíšková a kol. 2015. V průběhu let bude růst, než dosáhne maxima a poté klesat zpět k teplotě v daném místě a čase obvyklém. Více detailů lze nalézt v Hasal a kol. 2017. Časový úsek tohoto projektu byl určen, jako období, kdy teplota v okolí UOS se nezvyšuje. Platí, že zvýšená teplota UOS v tomto období má vliv na všechny materiály v HÚ. Následující jevy jsou ovlivněny zvýšenou teplotou a ovlivňují celkový tlak na kontejner:

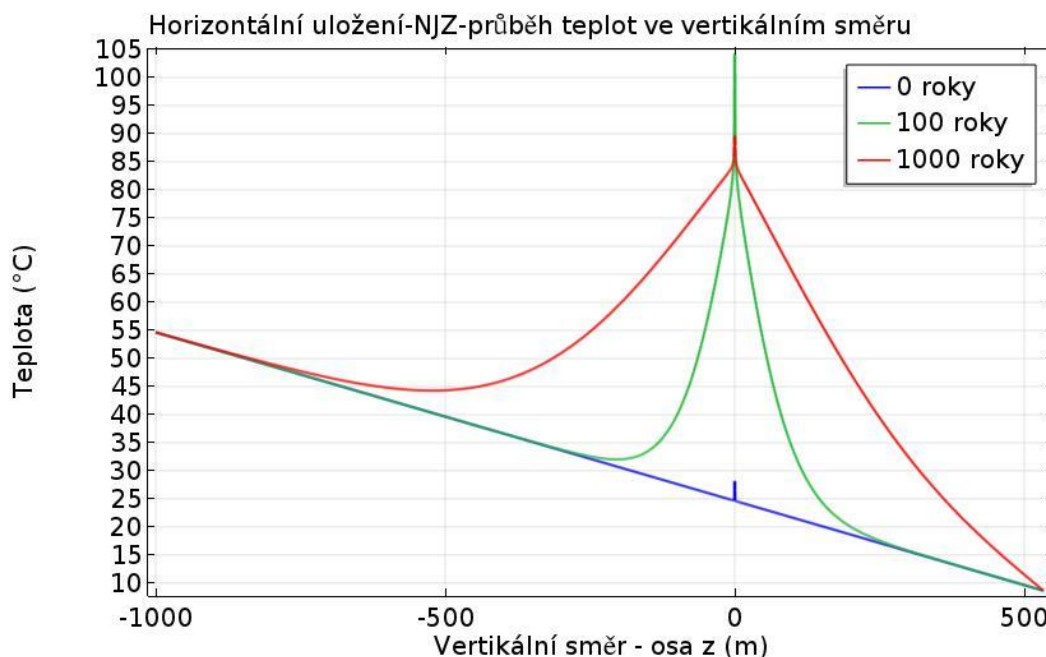
- Pro rozptyl teplot od 22°C až 95°C teplotní roztažnost kontejneru je v případě očekávaných teplot v HÚ velmi malá. Toto platí jak pro ocelový, měděný kontejner nebo vzájemnou kombinaci.
- Teplotní roztažnost bentonitu, je malá i při signifikantně vyšších teplotách, než budou v HÚ.
- Teplotní roztažnost masivu krystalické horniny je také minimální při očekávaných hodnotách. Navíc stejně jako pro všechny předchozí materiály platí, že s klesající teplotou se materiály smršťují, a proto klesá jejich tlak na UOS.

Zvýšení tlaku působícího na UOS vlivem každého jednotlivého jevu je nízké, ale v součtu tyto jevy mohou dosáhnout až k hodnotě 0,5 MPa, Rutqvist 2015. Proto je třeba je vzít v úvahu do celkového tlaku působícího na UOS. Samozřejmě platí, že s klesající teplotou jejich celkový vliv bude klesat.

V Hasal a kol. 2017 byl prezentován vývoj maximální teploty ve vertikálním směru v případě horizontálního úložiště, viz převzatý Obr. 7. Výsledky jsou zobrazeny pro výchozí typ horizontálního uložení UOS (1,4 m mezi UOS, 21 m mezi vrty), které pro dlouhodobou studii vlivu teploty v HÚ nejsou signifikantně rozdílné od vertikálního uložení a od různých vzdáleností mezi vrty a UOS.

Počáteční stav HÚ po uložení reprezentuje modrá křivka na Obr. 7, jež reprezentuje zobrazení počáteční teploty masivu nastavenou dle geotermického stupně – nárůst

teploty s hloubkou. Modrá křivka na Obr. 7 zobrazuje nárůst teploty směrem do hloubky (interval -1000 m až 0) a pokles směrem k povrchu (533 m). Zelená křivka na Obr. 7 zobrazuje nárůst teploty v okolí HÚ po 100 letech. Lze pozorovat nárůst teploty na hodnotu okolo 105°C v úrovni HÚ. Teplo produkované z UOS po dobu 100 let ovlivní okolí HÚ do vzdálenosti +/- 250 m od úrovně HÚ (533 m). Červená křivka ukazuje ovlivnění teploty zemského povrchu teplem produkovaným UOS v HÚ a žádné ovlivnění horniny v hloubce -1533 m po 1000 letech. Z výše uvedeného plyne, že teplotní ovlivnění okolí HÚ bude minimálně v řádu tisíců let.



Obr. 7 Vývoj teploty (°C) v okolí v HÚ ve vertikálním směru v čase - horizontální uložení vzdálenost mezi vrtů 21m a 1,4 mezi UOS-NJZ. Záporné hodnoty v ose z udávají směru pod úložiště, kladné hodnoty v ose z udávají směru nad úložiště.

#### Ad 4) Degradace UOS

Obecně platí, že korozní produkty mají větší objem než samotný materiál podléhající korozi. Toto platí, zejména pro využití nerezového kontejneru. Předpokladem je, že UOS bude uložen v uzavřeném vrtu a stlačitelnosti okolního masivu je minimální. Tudíž během koroze vzroste objem materiálu uvnitř vrtu, což může zpětně stlačit bentonit a tím se zvýší jeho objemová hmotnost, respektive bobtnací tlak.

Množství korozních produktů je stále v oblasti intenzivního výzkumu. Navíc záleží na druhu použité oceli. Proto musíme v nynější fázi výzkumu a experimentálního vývoje UOS, zanedbat vliv zvýšení tlaku působícího na UOS vlivem nárůstu objemu korozních produktů.

#### Ad 5) Zvýšení pórového tlaku vlivem uvolňování plynu během koroze

Jev, který nastane ve stabilním období. Příčinou tvorby plynu jsou rozklad radioaktivního odpadu, koroze kovů zejména nerezového kontejneru a radiolýza vody produkující  $H_2$ , Rodwell et al. 1999. Migrace plynu v HÚ je předmětem intenzivního zkoumání a velmi bude záležet na typu bentonitu jeho objemové

hmotnosti. Což definuje difúzní koeficienty, na nichž záleží, jak rychle se bude plyn odvádět v případě, že nevzniknou dodatečné preferenční cesty.

Obecně vzato, zvýšení tlaku na kontejner vlivem přítomnosti korozních plynů bude minimální, zejména v případě, kdy plyn bude putovat mimo oblast uložení UOS. Pokud plyn nebude unikat, může se jednat o signifikantní zdroj tlaku Rodwell et al. 1999. Předpokládáme, že plyn bude migrovat mimo HÚ, proto tento jev nebudeme zahrnovat ve výpočtech. Modelováním šířením plynu v bentonitu se zabývá nynější Task A projektu DECOVALEX, proto doporučujeme sledovat aktuální výsledky v tomto projektu. Obecně veškerá dostupná literatura se zabývá problematikou migrace plynů směrem ven z HÚ, a ne zvýšením tlaku působícího na samotný UOS.

Ad 6) Chemické změny materiálů - bentonitu.

Bylo provedeno několik dlouhodobých testů, které zkoumali chování bentonitu z dlouhodobého hlediska. Bylo prokázáno malé snížení bobtnacího tlaku, Wang 2014. Podařilo se prokázat snížení bobtnacích účinků vlivem radioaktivního záření, např. pro Zhisin bentonit, Huang 2004. Report Dixon 2000 popisuje snížení bobtnacích účinků tzv. backfillu, což je výplň tunelů a dalších technických prostorů. V těchto prostorech může být použita směs s bentonitem v nízkém poměru (15% Finsko, Švédsko, méně než 10% Kanada) což vzájemně s přítomností slané vody sníží dlouhodobý účinek bobtnacího tlaku. Výzkum v této oblasti je pro český bentonit stále aktuální, a ne všechny výsledky jsou k dispozici, proto budeme počítat s nesnižujícím se bobtnacím tlakem bentonitu vlivem dlouhodobých chemických změn.

Ad 7) Deformace technických vrtů a úložného vrtu

Jedním z faktorů, který může dodatečně způsobit zvýšení tlaku na kontejner je deformace samotného úložného vrtu a pracovních tunelů. Příčiny deformace obou prostor mohou být dvojí, samotná deformace masivu vlivem vyrovnávání napěťových polí nebo zvýšení vnějšího tlaku na prostor HÚ. Při rozboru těchto situací se zaměříme pouze na krystalickou horninu, protože v např. v jílové může být situace odlišná. Navíc český koncept HÚ počítá pouze s krystalickou horninou, Pospíšková a kol. 2015.

V krystalické hornině dochází k největším deformacím během odvrátání nebo ražby vlivem elasto-plasticity materiálů. Ze zkušeností víme, že vrt v krystalinických horninách se deformuje nejvíce během samotného odvrátání a poté už je samotná deformace vrtu minimální, nebo neznatelná. U zakládacích chodeb o velikosti cca 20 m<sup>2</sup> Pusch et al. 2011 popisuje deformaci v krystalinických horninách v řádu centimetrů v prvních 100 letech. Celkově posunutí má logaritmický průběh v čase, tj. logaritmicky klesá.

Druhým případem je deformace vlivem nárůstu vnější síly. Příčiny mohou být v zásadě dvojí. První z nich je zemětřesení, jedná se těžce předpověditelnou situaci. Rozbor této situace je částečně proveden v Kapitole 4.2. Druhou možností je zalednění oblasti na HÚ. Nguyen 2007 předpokládá zvýšení tlaku na úložiště v řádu až 30 MPa. Více detailů lze nalézt v Pusch et al. 2011.

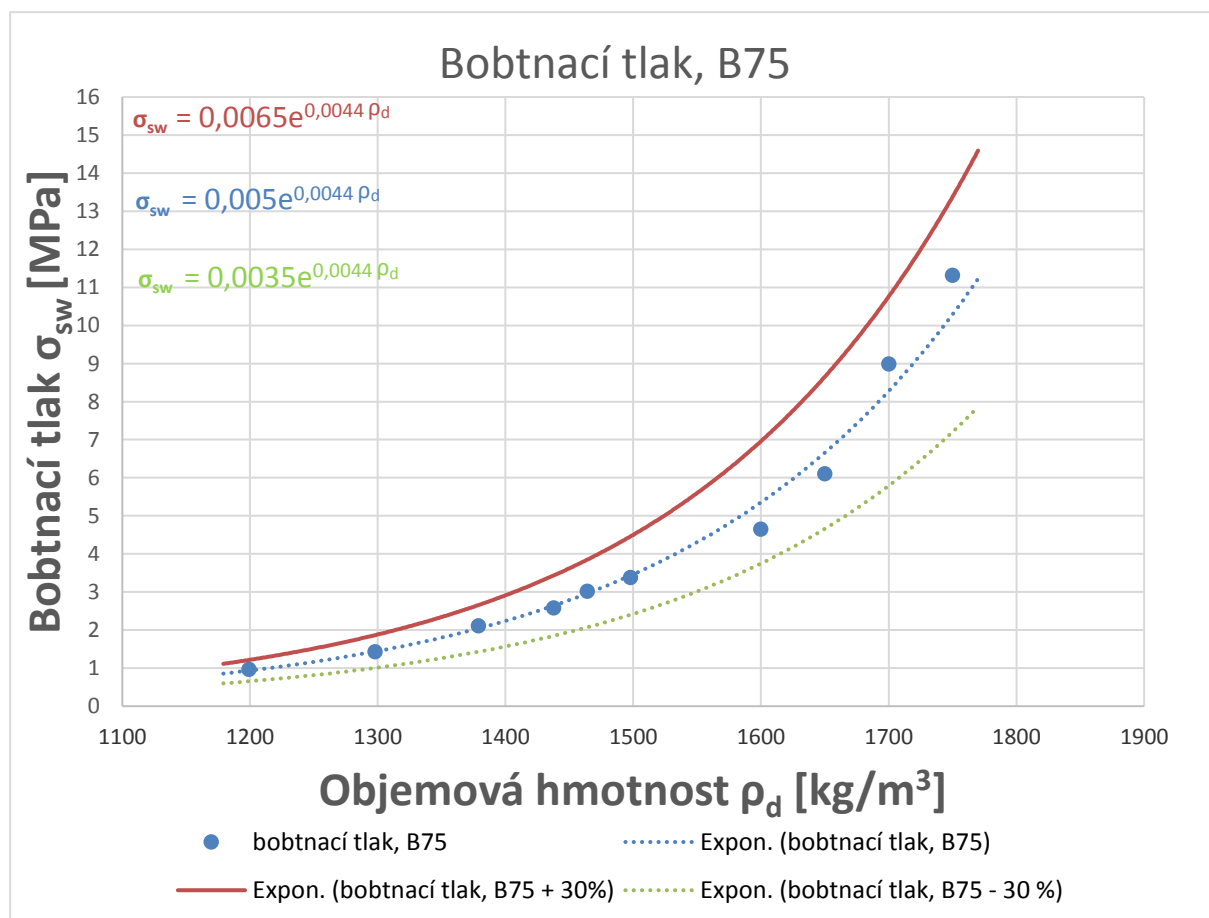
Deformace samotného vrtu je nízká i v případě zatížení ledovcem, zemětřesení není stálým jevem, proto tento vliv deformace nebudeme uvažovat ve výpočtech.

### 2.1.1 Omezení hodnot bobtnacího tlaku


Na Obr. 1 bylo ukázáno, jak velký rozptyl může být při měření bobtnacího tlaku, což se ukázalo při srovnání výsledků pro český bentonit B75 na Obr. 3 a Obr. 4, které byly pravděpodobně měřeny za saturace destilovanou vodou (informace o původu vody není k dispozici v literatuře). Taktéž lze pozorovat snížení bobtnacího tlaku při použití minerální vody (Obr. 5) a vyšší teploty samotného bentonitu (Obr. 6).

Proto v této podkapitole definujeme meze bobtnacího tlaku pro český bentonit z dostupných zdrojů. Vyjdeme ze zdroje Štáštka 2014 – II, viz Obr. 8. Ze znalostí FEBEX bentonitu víme, že se hodnoty bobtnacího tlaku mohou v jednom měření lišit až o 30%, viz Obr. 1. Přičemž zde bylo autorem poukázáno, že se jedná o měření v měření za pomoci destilované vody. Neboli hodnota bobtnacího tlaku v reálném HÚ bude nižší, ale stále v námi definovaném intervalu nejistoty. Do budoucna doporučujeme provést experimenty pro určení velikosti bobtnacího tlaku za různých podmínek.

Dále jsou tyto měření provedeny za plné saturace. Bobtnací tlak bentonitu roste se saturací, tj. nárůst tlaku působícího na UOS vlivem bobtnacího tlaku bude postupný. Z Obr. 6 je zřejmé, že bobtnací tlak klesá s teplotou. Cílem tohoto projektu je vymežit maximální tlak, proto pracujeme s hodnotou maximálního bobtnacího tlaku, který ale v reálném prostředí může být nižší po dobu zvýšení teploty nad 22°C.



Obr. 8 Závislost bobtnacího tlaku na objemové hmotnosti bentonitu B75, Štáštka 2014 – II. Modré body reprezentují měření a modrá linie reprezentuje aproximační exponenciální křivku průběhu měření. Červená křivka představuje předpokládanou **maximální hodnotu bobtnacího tlaku** a zelená dolní odhad bobtnacího tlaku.

 <b>SÚRAO</b>	<b>Provedení předběžného výpočtu tlaku na UOS – Závěrečná zpráva</b>	Evidenční označení:
		<b>SÚRAO TZ 388/2019</b>

## 2.2 Vyhodnocení jednotlivých zdrojů tlaků působících na UOS

Ve výše uvedeném textu bylo uvedeno několik jevů, které mohou zvýšit nebo snížit tlak na kontejner. Ukazuje se v souladu s literaturou Dixon 2000, že největšími zdroji tlaku jsou hydrostatický tlak  $p_w$  [Pa] a bobtnací tlak bentonitu  $\sigma_{sw}$  [Pa]. Proto jsme v přecházející kapitole určili pravděpodobnou horní mez bobtnacího tlaku, viz červená křivka na Obr. 8, kterou budeme dále používat ve výpočtu.

Dále pak následuje zvýšení tlaku vlivem termální expanze bentonitu a okolní horniny. Jež roste s rostoucí teplotou v okolí úložiště a začne klesat, jakmile teplo dodávané UOS přestane převyšovat okolní teplotu, viz Kapitola 4.4 a Obr. 7.

Ostatní zdroje představují minoritní zdroje tlaku, jelikož jejich příspěvek do celkového tlaku na kontejner je řádově menší než dvou výše uvedených majoritních zdrojů. Navíc pro jejich přesné určení pro český bentonit chybí dostatečné množství podkladů, jež by určilo míru jejich vlivu.

## 2.3 Metodika výpočtu

Nechť  $\sigma$  je tenzor napětí v bentonitu určený buď složkami  $\sigma = (\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \sigma_{xy}, \sigma_{xz}, \sigma_{yz})$  v kartézských souřadnicích, nebo složkami  $\sigma = (\sigma_{rr}, \sigma_{\phi\phi}, \sigma_{zz}, \sigma_{r\phi}, \sigma_{rz}, \sigma_{\phi z})$  v cylindrických souřadnicích s osou totožnou s osou symetrie UOS. Potom tlak na plochu určenou jednotkovou normálou  $n$  bude  $\sigma : n = \sigma_n$ . Tlak na plášti UOS budeme značit  $\sigma_r$  a na podstavách UOS  $\sigma_a$ .

### Napětí v bentonitu

Deformaci porézního média  $\Omega$  lze popsat posunutím  $u$ , tenzorem deformace  $\varepsilon = \varepsilon(u)$  a tenzorem napětí  $\sigma$ . Používá se klasická mechanika kontinua, tzn. napětí v tahu jsou pozitivní. Zatímco napětí v tlaku jsou záporné.

Předpokládá se, že  $(u, \varepsilon, \sigma)$  se vyvíjí v čase a v rovnováze s působícími objemovými silami  $f$ . Vývoj času je pomalý, takže setrvačné síly jsou zanedbávány. Globální rovnováha hybnosti má podobu


$$\nabla \cdot \sigma = f \quad (2.1)$$

Celkové napětí v bentonitu při plné saturaci je vypočítáno jako

$$\sigma = \sigma_{eff} - \sigma_w - \sigma_{sw} - \sigma_t, \quad (2.2)$$

kde  $\sigma_{eff} = C : \varepsilon_{el}$  je efektivní napětí, které v případě elasticity nebo elasto-plasticity závisí lineárně na elastické části deformace - v případě zanedbání vlastní váhy bentonitu, vlastní výplně HÚ a váhy kontejneru je  $\sigma_{eff} = 0$ .  $\sigma_w$  je napětí indukované pórovým tlakem (hydrostatický tlak) vody  $\sigma_w = \alpha p_w I$ ,  $\sigma_{sw} = p_{sw} I$  je bobtnací tlak, kde  $I$  je tenzor identity.  $\sigma_t = p_t I$  je termální napětí, jež je spočtenou hodnotou a představuje zvýšení reprezentující součet termálních expanzí bentonitu, okolní horniny a UOS.



 <b>SÚRAO</b>	<b>Provedení předběžného výpočtu tlaku na UOS – Závěrečná zpráva</b>	Evidenční označení:
		<b>SÚRAO TZ 388/2019</b>

Potom po dosazení je celkový tlak  $p_{total}$  [MPa], který působí na vnější obal kontejneru

$$p_{total} = \alpha \rho_w g z_w 1E - 6 + 0.0055 e^{4.3566 \rho_d} + p_t \quad [MPa]. \quad (2.3)$$

kde  $\alpha$  je Biotův koeficient (= 1 pro bentonit),  $g$  je gravitační konstanta [ $m \cdot s^{-2}$ ],  $\rho_w$  je hustota vody [ $kg \cdot m^{-3}$ ],  $z_w$  je výška vodního sloupce nad úložištěm,  $\rho_d$  je objemová hmotnost bentonitu [ $kg \cdot m^{-3}$ ] a  $1E - 6$  je přepočten na jednotku MPa. Funkční předpis  $0.0055 e^{4.3566 \rho_d}$  reprezentuje horní mez bobtnacího tlaku při dané objemové hustotě, viz Obr. 8. Tento funkční předpis vymezuje maximální hodnotu bobtnacího tlaku v souladu s výše popsányi závislostmi na nejistotě měření, použitém druhu vody, teplotní roztažnosti a chemických změnách.

### 3 Modelové situace

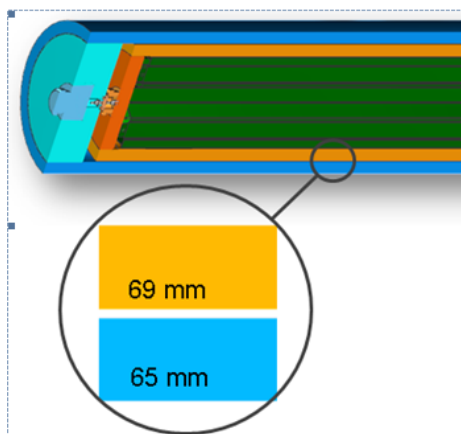
Předpokládaný způsob uložení UOS je dvojího typu – vertikální a horizontální. Přičemž může dojít k rozdílu celkového tlaku působícího na UOS mezi jednotlivými způsoby uložení UOS. Z tohoto důvodu v následujícím textu uvažujeme modelové situace, jež rozliší jednotlivé situace. Nejdříve je třeba dokázat, že nedojde k samotné deformaci UOS. Protože by došlo k redistribuci objemové hmotnosti a návaznému snížení bobtnacího tlaku.

#### 3.1 Deformace kontejneru

Hlavním cílem v této podkapitole je ukázat, že konstrukční návrh je dostatečně odolný, tak aby nedošlo k velké deformaci UOS vlivem předpokládaného tlaku, což by způsobilo redistribuci objemové hmotnosti bentonitu uvnitř vrtu a tím ke snížení bobtnacího tlaku. Následující výpočty také nepřímo prokážou odolnost UOS proti mechanickému porušení (mez pevnosti) za očekávaného tlaku.

V nynější době probíhá intenzivní vývoj návrhu optimálního tvaru a materiálů budoucího UOS. Proto nebudeme zasahovat do přílišných detailů, které se navíc mohou měnit během vývoje. Dle informací ze SÚRAO bude uvažován dvouplášťový obalový soubor válcového tvaru. Přitom přichází v úvahu dvě varianty pro každé palivo, jmenovitě UOS 440, UOS 1000 a nový jaderný zdroj (NJZ):

1. varianta - vnější obal z uhlíkové oceli, preferované materiálové složení X65MS (1.8767). Vnitřní obal nerez ocel (1.4404). Tato varianta se může dále dělit na
  - a. dva pláště, uvnitř v mříži palivové články (UOS pro všechny typy paliv mají stejnou tloušťku stěny. Uvedené rozměry jsou pro UOS 440, UOS 1000 a NJZ bude rozměrově stejný (Ø 914/ Ø 784/4650 mm).



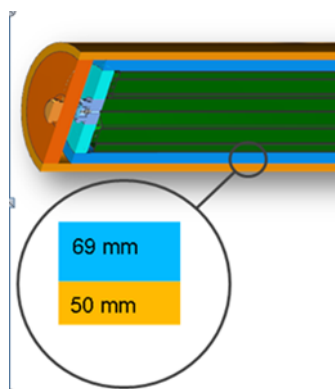
Vnější obal	položka	rozměr	materiál
	tělo	Ø 795/ Ø 665/3810 mm	X65MS
	dno	Ø 665/140 mm	X65MS
	víko	Ø 665/210 mm	X65MS
Vnitřní pouzdro	položka	rozměr	materiál
	tělo	Ø 658/ Ø 520/3380 mm - trubka	1,4404
	dno	Ø 654/80 mm	1,4404
	víko	Ø 520/80 mm	1,4404
	koš		1,4404

Obr. 9 Schématický návrh kontejneru ve variantě 1a včetně rozměrů.

- b. vnější obal (VO) + do něj vložená nerezová pouzdra (VP), v každém pouzdra jeden palivový soubor. S následujícími rozměry, kde uvedené hodnoty znamenají: Ø/ tloušťka stěny těla UOS
  - VVER 440: VO 813/ 60 mm, VP (pouzdro) –219,1/22,2 mm (7 palivových souborů)



- VVER 1000/NJZ: VO 914/65 mm, VP 355,6/36 mm (3 palivové soubory)
2. varianta - vnější obal měď, Cu OF a vnitřní obal z uhlíkové oceli X65MS (1.8767). Kde Ø/ tloušťka stěny těla UOS bude VO - 758/50 mm, VP – 658/69mm



Obr. 10 Schématický návrh kontejneru ve variantě 2 včetně rozměrů.

Cílem je spočítat odolnost kontejneru vůči tlaku, který reprezentuje součet všech předpokládaných zdrojů tlaku. Byly zvoleny dvě hodnoty referenčního tlaku a to hodnota 10 [MPa] a 15 [MPa], obě reprezentují dolní a horní odhad pravděpodobného tlaku působícího na UOS. Pokud nedojde k výrazné deformaci UOS, pak nedojde k redistribuci objemové hmotnosti, tj. deformace UOS neovlivní velikost celkového tlaku na UOS.

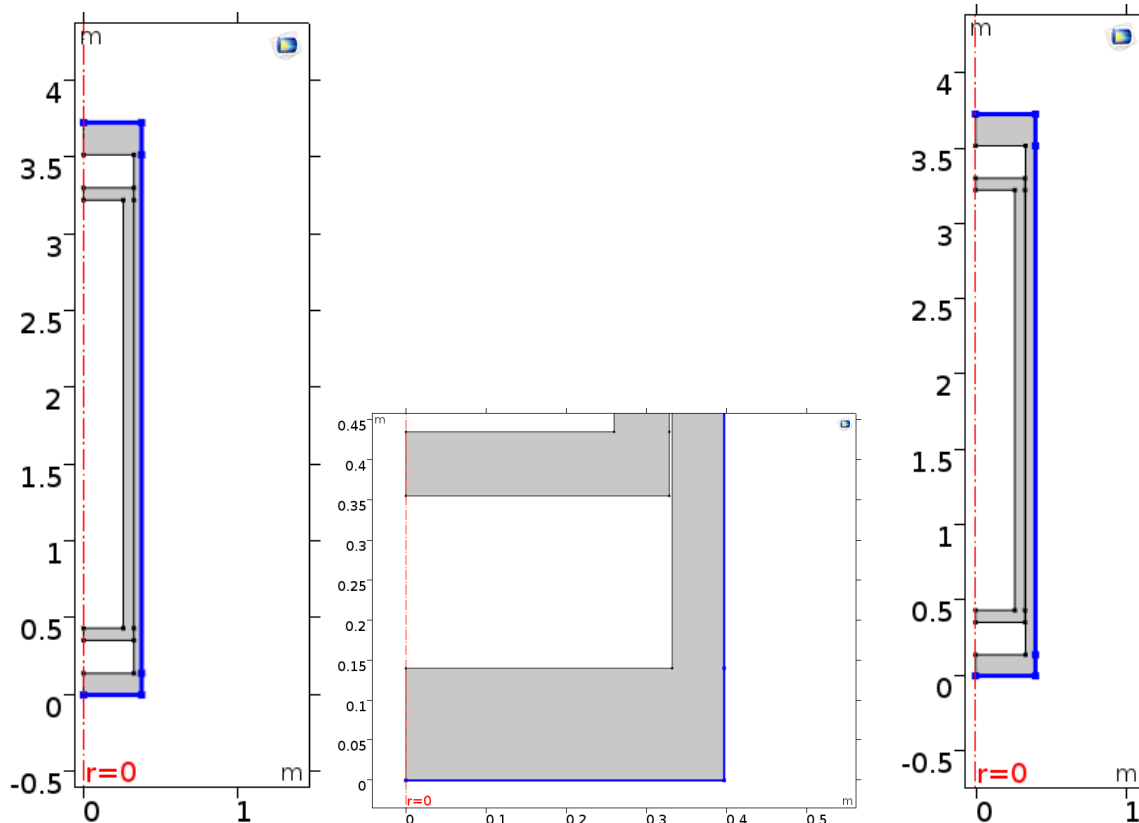
Bez úhony na obecnosti bude v dalším textu počítáno pouze s Variantou 1a a Variantou 2. Varianta 1b uvažuje různá rozložení vnitřních nerezových pouzder, ke kterým nejsou známy detaily v nynější fázi vývoje. Všechny parametry jsou uvedeny této kapitole vyjma délek kontejneru, jež byly převzaty z Hasal a kol. 2017 a jsou zobrazeny v Tab. 5. Tab. 5 obsahuje také zjednodušené výpočty objemů jednotlivých částí UOS. Zjednodušené znamená, že do výpočtu byly zahrnuty jen základní tvary válcových částí, tj. úchopy jednotlivých UOS u víka nebyly zahrnuty do výpočtu, protože jejich detailní geometrie není k dispozici. Zde uvedené platí i pro vnitřní strukturu UOS, do níž budou uloženy palivové tyče a pro další detaily UOS. Platí, že nezapočítané detaily mají malý vliv na deformaci a hmotnost UOS, proto mohou být zanedbány.

Veškeré výpočty byly provedeny v programu COMSOL Multiphysics 5.4, jež umožňuje simulaci deformace materiálů za určitého tlaku. Vstupy do modelu a zároveň materiálové parametry jsou uvedeny v Tab. 2. Poznamenejme, že se jedná o hodnoty nalezené z volně dostupných zdrojů a nemusí přesně odpovídat finálním materiálovým parametrům použitým při výrobě UOS v budoucím HÚ. Předpokládáme ale, že odchylka bude maximálně v řádu jednotek procent.

Tab. 2 Materiálové parametry jednotlivých materiálů použitých ve výpočtu.

Materiál / Parametry	Hustota [ $kg \cdot m^3$ ]	Youngovo číslo [Pa]	Poissonovo číslo [-]
Cu OF	8 940	120E9	0,34
Uhlíková ocel X65MS	7 850	200E9	0,30
Nerez ocel	7 950	200E9	0,275

Výpočetní oblasti pro Variantu 1 - VVER 440 a Variantu 2 - VVER 440 jsou zobrazeny na Obr. 11, kde modrá hranice reprezentuje tlakovou okrajovou podmínku a červená osa je osa rotační symetrie. Mezi vnějším a vnitřním obalem byla zachována mezera v případě Varianty 1a, viz Obr. 11 vlevo a detail okraje na prostředním obrázku. Ostatní varianty pro VVER 1000 a NJZ se budou lišit celkovou délkou, viz Tab. 5 a Tab. 6.



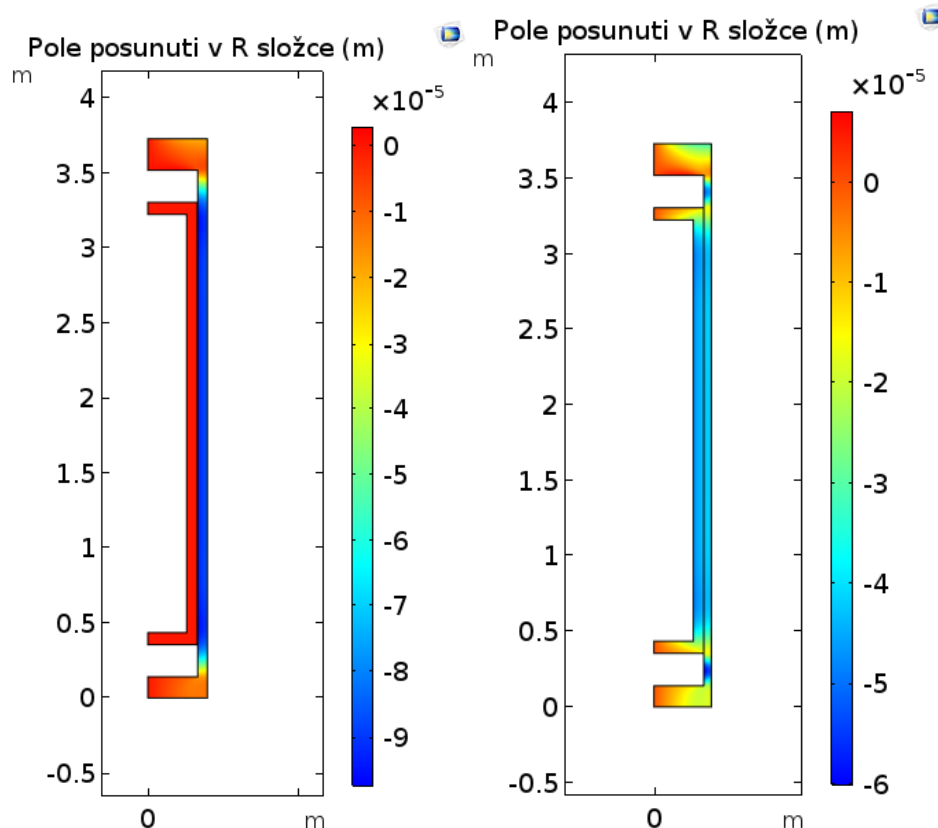
Obr. 11 Výpočetní oblasti pro jednotlivé varianty UOS - VVER 440. (vlevo) Výpočetní oblast pro Variantu 1. (uprostřed) Detail na mezeru mezi vnitřním a vnějším pláštěm. (vpravo) Výpočetní oblast pro Variantu 2. Modrá hranice reprezentuje předepsanou tlakovou okrajovou podmínku.

Cílem numerické simulace bylo vypočítat celkovou deformaci UOS. Pokud deformace UOS bude velmi malá vůči vlastním rozměrům, pak bentonit nebude bobtnat tímto směrem k deformované části a nedojde k redistribuci objemové hmotnosti, jako v případě mezer.

Deformaci v radiálním směru (kolmý na osu rotace) pod tlakem  $10 \text{ MPa}$  lze pozorovat na Obr. 12. V důsledku přítomnosti mezery a velké tuhosti došlo pouze k deformaci vnějšího pláště UOS u Varianty 1 v radiálním směru o maximální hodnotu  $-0,08985 \text{ mm}$  oproti původní hodnotě, a v axiálním směru o maximální hodnotu v  $-0,0290 \text{ mm}$  oproti původní hodnotě. Neboli celková deformace vnějšího pláště UOS pro Variantu 1 je v řádu desetin milimetru, což nebude mít vliv na redistribuci objemové hmotnosti bentonitu v okolí UOS.

Tab. 3 a Tab. 4 sumarizují maximální deformaci všech druhů UOS v axiálním a radiálním směru pod tlakem  $10 \text{ MPa}$  a  $15 \text{ MPa}$ . Poznamenejme, že hodnoty v tabulkách jsou záporné, protože se jedná o posunutí, tj. rozdíl původních a vypočtených (deformovaných) souřadnic. Počátek souřadného systému je uprostřed podstavy spodního víka a tlak je předepsán na vnější hranici neboli dojde k deformaci kontejneru dovnitř. Proto záporná hodnota posunutí.

Pro všechny varianty UOS vyšlo, že celková deformace je velmi malá a nebude mít vliv na redistribuci objemové hmotnosti bentonitu v okolí UOS. Výpočty zde uvedené platí, jak pro vertikální, tak pro horizontální uložení UOS.




Obr. 12 Výsledné posunutí (deformace) v radiální složce (m) při tlaku 10 MPa. (vlevo) Varianta 1. (vpravo) Varianta 2.

Tab. 3 Hodnoty maximálního posunutí (deformace) ve směru Z – paralelní s osou symetrie (axiální) a R – kolmý (radiální) na osu symetrie pro obě varianty UOS. Hodnota tlaku působícího na UOS byla předepsaná jako 10 MPa na vnější hranici.

UOS	Varianta 1		Varianta 2	
	R (m)	Z (m)	R (m)	Z (m)
VVER 440	-8,98E-5	-2,90E-5	-5,18E-5	-3,45E-4
VVER 1000, NJZ	-8,99E-5	-3,97E-4	-5,16E-5	-4,13E-4

Tab. 4 Hodnoty maximálního posunutí (deformace) ve směru Z – paralelní s osou symetrie (axiální) a R – kolmý (radiální) na osu symetrie pro obě varianty UOS. Hodnota tlaku působícího na UOS byla předepsaná jako 15 MPa na vnější hranici.

UOS	Varianta 1		Varianta 2	
	R (m)	Z (m)	R (m)	Z (m)
VVER 440	-1,35E-4	-4,35E-4	-7,77E-5	-5,15E-4
VVER 1000, NJZ	-1,35E-4	-5,96E-4	-7,74E-5	-6,21E-4

 <b>SÚRAO</b>	<b>Provedení předběžného výpočtu tlaku na UOS – Závěrečná zpráva</b>	Evidenční označení:
		<b>SÚRAO TZ 388/2019</b>

K výpočtu celkového tlaku na kontejner je třeba vypočítat i samotnou váhu UOS. Samotná hmotnost UOS při působení na vnější plochu dohromady tvoří zdroj zvýšeného tlaku. K výpočtu hmotnosti bylo uvažováno s objemovými hodnotami z Tab. 5 a s parametry hustoty jednotlivých materiálů z Tab. 2.


Z Tab. 5 a Tab. 6 lze vyzorovat, že nárůst tlaku vlastní vahou na spodní polovinu pláště při horizontálním uložení je v řádu jednotek  $kPa$  v obou variantách. Přibližně desetkrát vyšší tlaky na podstavu lze pozorovat při vertikální uložení, protože dojde ke snížení povrchu styčné plochy.

Tab. 5 Varianta 1a – délkové parametry UOS, poloměry materiálů v UOS, objemy jednotlivých částí, plocha poloviny pláště UOS, plocha podstavy UOS, váha vnitřního a vnějšího pláště, tlak na plášť při horizontálním uložení a tlak na podstavu při vertikálním uložení.

UOS	Délka [m]	Vnější obal [m]	Tloušťka stěny [m]	Objem vnějšího pláště [m <sup>3</sup> ]	Vnitřní obal [m]	Tloušťka vnitřní stěny [m]	Objem vnitřního pláště [m <sup>3</sup> ]	Výška dna - vnější [m]	Výška víka - vnější [m]	Objem víka + dna vnějšího [m]	Výška dna a víka - vnitřní [m]	Objem víka + dna vnitřního [m]	Váha vnější [kg]	Váha vnitřní [kg]	Plocha stěny [m <sup>2</sup> ]	Plocha podstavy [m <sup>2</sup> ]	Tlak horizontální [Pa]	Tlak vertikální [Pa]
VVER 440	3,733	0,398	0,065	0,556	0,329	0,069	0,377	0,140	0,210	0,122	0,080	0,034	5322,425	3267,441	9,323	0,496	18076,870	169763,407
VVER 1000	5,374	0,398	0,065	0,801	0,329	0,069	0,587	0,140	0,210	0,122	0,080	0,034	7242,647	4933,066	13,422	0,496	17798,834	240631,287
NJZ	5,374	0,398	0,065	0,801	0,329	0,069	0,587	0,140	0,210	0,122	0,080	0,034	7242,647	4933,066	13,422	0,496	17798,834	240631,287

Tab. 6 Varianta 2 – délkové parametry UOS, poloměry materiálů v UOS, objemy jednotlivých částí, plocha poloviny pláště UOS, plocha podstavy UOS, váha vnitřního a vnějšího pláště, tlak na plášť při horizontálním uložení a tlak na podstavu při vertikálním uložení.

UOS	Délka [m]	Vnější obal [m]	Tloušťka stěny [m]	Objem vnějšího pláště [m <sup>3</sup> ]	Vnitřní obal [m]	Tloušťka vnitřní stěny [m]	Objem vnitřního pláště [m <sup>3</sup> ]	Výška dna - vnější [m]	Výška víka - vnější [m]	Objem víka + dna vnějšího [m]	Výška dna a víka - vnitřní [m]	Objem víka + dna vnitřního [m]	Váha vnější [kg]	Váha vnitřní [kg]	Plocha stěny [m <sup>2</sup> ]	Plocha podstavy [m <sup>2</sup> ]	Tlak horizontální [Pa]	Tlak vertikální [Pa]
VVER 440	3,733	0,379	0,050	0,415	0,329	0,069	0,377	0,140	0,210	0,119	0,080	0,034	4775,366	3226,341	8,889	0,451	17661,086	173954,706
VVER 1000	5,374	0,379	0,050	0,598	0,329	0,069	0,587	0,140	0,210	0,119	0,080	0,034	6406,863	4871,015	12,797	0,451	17291,094	245177,677
NJZ	5,374	0,379	0,050	0,598	0,329	0,069	0,587	0,140	0,210	0,119	0,080	0,034	6406,863	4871,015	12,797	0,451	17291,094	245177,677

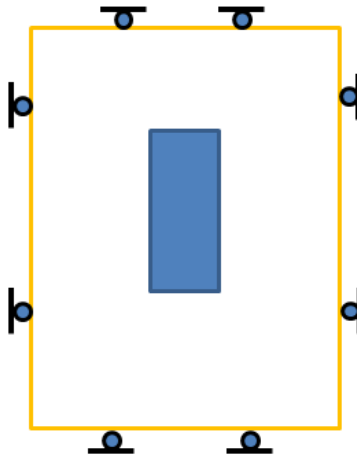
 <b>SÚRAO</b>	<b>Provedení předběžného výpočtu tlaku na UOS – Závěrečná zpráva</b>	Evidenční označení:
		<b>SÚRAO TZ 388/2019</b>

### 3.2 Plně omezený objem

Plně omezený objem reprezentuje nejjednodušší modelovou situaci, kdy UOS s bentonitovým okolím má zamezeno jakékoliv rozpínání díky velké tuhosti horniny a UOS. Schematicky je daná situace zobrazena na Obr. 13, který zobrazuje 2D řez uložení v nejširším místě kruhového vrtu. Přičemž na Obr. 13 je modře zobrazen UOS a bíle je zobrazen prostor inženýrské bariéry, tj. bentonitu. Na okrajích jsou zobrazeny okrajové podmínky – roller (nulové posunutí v kolmém směru), jež reprezentují pravděpodobný stav v HÚ neboli je umožněn pohyb bentonitu ve směru tečném k hraně oblasti, ale neumožňují proniknutí bentonitu skrze stěnu.

Model plně omezeného objemu reprezentuje z mechanického hlediska několik situací, jež mohou nastat v HÚ:

- Při horizontálním uložení tato situace reprezentuje stav uvnitř kolony UOS pro každý UOS. Levá a pravá strana na Obr. 13 reprezentují horninový masiv, který je oproti bentonitu dostatečně tuhý a neumožňuje deformaci bentonitu ve směru kolmém na masiv. Horní a dolní strana reprezentuje vyvážený stav bentonitu. Neboli hranu, jež se nachází přesně v polovině vzdálenosti mezi UOS. Přičemž předpokladem je, rovnoměrná objemová hmotnost bentonitu v ose UOS neboli nedochází k přesunu objemové hmotnosti ve směru osy UOS.
- Uložení UOS na konci horizontálního vrtu, kdy je jedna část v přímém kontaktu s masivem skrze bentonitovou bariéru. Předpokladem je, že masiv nepodléhá deformaci a objemová hmotnost bentonitu je neměnná mezi UOS a masivem.
- Uložení UOS na začátku horizontálního vrtu, kdy je jedna část v přímém kontaktu s betonovou zátkou, jež uzavře vrt při horizontálním uložení. Předpokladem je, že betonová nepodléhá deformaci.
- Vertikální uložení za předpokladu, že vrchní část bude zapečetěna nedeformovatelnou a nepohyblivou betonovou vrstvou.
- Vertikální uložení za předpokladu, že tzv. výplň (buffer) bude mít stejnou distribuci objemové hmotnosti v celém objemu jako bentonitová vrstva v okolí UOS.



Obr. 13 Schematické zobrazení modelu s omezeným objemem.

V případě, že neuvažujeme váhu UOS, váhu bentonitu ani deformaci masivu, nedochází k žádné deformaci bentonitové vrstvy a UOS, tj.  $\varepsilon = 0$ . Neboli za předpokladu elastického chování je  $\varepsilon = \varepsilon_{el} = 0$  a tudíž  $\sigma_{eff} = 0$ , takže

$$\sigma = -(\sigma_w + \sigma_{sw} + \sigma_t)$$

V tomto případě bude tlak na kontejner roven součtu pórového  $\sigma_w$ , maximálního bobtnacího tlaku  $\sigma_{sw}$  a termálního napětí  $\sigma_t$ . V uvedeném případě se také nezmění objemová hustota, takže pro určení maximálního bobtnacího tlak vycházíme z počáteční hodnoty  $\rho_d$ .


Pro určení maximální hodnoty tlaku na kontejner uvažujeme následující předpoklady:

- bentonit je téměř (nebo plně) saturován,
- objemová hmotnost bentonitu je  $\rho_d = 1\,600\text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,
- UOS je stále zdrojem tepla. Zvýšená teplota masivu na  $80^\circ\text{C}$  (oproti původní teplotě masivu) vlivem přítomnosti UOS trvá,
- všechna prostředí jsou izotropní

Za výše uvedených podmínek bude výsledný tlak  $p_t$  [MPa] na UOS dán součtem

$$p_{total} = p_w + p_{sw} + p_t = 5 + 7 + 0,5 = 12,5\text{ MPa}.$$

Neboli maximální hodnota působícího tlaku na UOS bude  $12,5\text{ MPa}$ , která je dána maximální hodnotou hydrostatického tlaku  $p_w$  v dané hloubce, bobtnacího tlaku  $p_{sw} = 7\text{ MPa}$  pro  $\rho_d = 1\,600\text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  (dle Obr. 8, červená křivka) a součtu zvýšení všech tlaků  $p_t$  indukovaných termální expanzí všech materiálů. Rozvaha o vlivu jednotlivých parametru byla provedena v Kapitole 2. Proto jen krátce k této situaci. Příspěvek hydrostatického tlaku do celkového tlaku se zvyšuje ze saturací bentonitu a maximální hodnoty dosáhne při plné saturaci. V dané hloubce 500 m bude maximální hodnota v krystalické hornině přibližně  $5\text{ MPa}$ . Bobtnací tlak má značný rozptyl hodnot a závisí na mnoha jevech. Každopádně pro danou objemovou hmotnost bobtnací tlak nepřesáhne  $7\text{ MPa}$ . Situace se může změnit pro jiný bentonit, poté třeba odečíst správnou hodnotu z Obr. 8. Vliv termální expanze na celkový tlak bude klesat s klesající teplotou HÚ, ale dle Obr. 7 v době po tisíci letech bude značně zvýšená teplota v okolí HÚ. Proto je třeba tento zdroj tlaku zahrnout. Poznamenejme, že v Hasal 2017 bylo ukázáno, jak závisí celková teplota v okolí UOS a HÚ na typu uloženého paliva a způsobu uložení UOS.

 <b>SÚRAO</b>	<b>Provedení předběžného výpočtu tlaku na UOS – Závěrečná zpráva</b>	Evidenční označení:
		<b>SÚRAO TZ 388/2019</b>

Je důležité připomenout, že váha samotného kontejneru není uvažována ve výpočtu celkového tlaku. Vlivem gravitace dojde k nerovnoměrnému rozdělení celkového tlaku, jež je způsoben vlastní tíhou UOS. V Kapitole 3.1 byly představeny tři varianty UOS. Poznamenejme, že bez úhony na obecnosti výpočtu je v dalším textu uvažována varianta 1a a varianta 2. Varianta 1b uvažuje různá rozložení vnitřních nerezových pouzder, ke kterým nejsou známy detaily v nynější fázi vývoje. Výpočet hmotnosti samotného UOS pro jednotlivé varianty zobrazuje Tab. 5 a Tab. 6. Lze pozorovat, malé zvýšení tlaku na spodní polovině pláště (hodnoty od 0,0172 do 0,018 MPa) v obou případech horizontálního uložení oproti celkovému očekávanému tlaku. O jeden řád vyšší tlaky (hodnoty od 0,169 do 0,245 MPa) lze pozorovat na dno kontejneru v případě vertikálního uložení. Je důležité podotknout, že je počítáno s váhou UOS bez samotného odpadu, protože samotná váha uloženého odpadu není k dispozici. V Tab. 5 a Tab. 6 jsou k dispozici váhy a plochy jednotlivých částí UOS. Proto pro přesnější určení zvýšení celkového tlaku na specifické části UOS doporučujeme přičíst váhu samotného odpadu k váze UOS, případně porovnat hodnotu se stávající hodnotou.

V celkové hodnotě tlaku není započítán příspěvek daný přítomností atmosférického tlaku (0,101 MPa), který se projeví, pokud při uzavření UOS bude vnitřní prostor uveden do stavu blízkém vakuu. Nebo bude vnitřní prostor vyplněn jiným plynem než vzduchem o nízkém tlaku, např. z důvodu minimalizace zanesení bakterií do vnitřního prostoru.

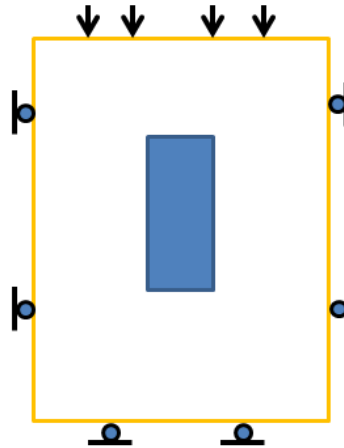
### 3.3 Částečně omezený objem

Částečně omezený objem reprezentuje situaci, kdy UOS s bentonitovým okolím má zamezeno jakékoliv rozpínání díky velké tuhosti horniny a UOS vyjma jedné ze stran. Na této straně je bentonitu umožněno se roztáhnout nebo naopak může být bentonit dodatečně stlačen z této strany. Schematicky je daná situace zobrazena na Obr. 14, který zobrazuje 2D řez uložení v nejširším místě kruhového vrtu. Na Obr. 14 je modře zobrazen UOS a bíle je zobrazen prostor inženýrské bariéry, tj. bentonitu. Na okrajích jsou zobrazeny okrajové podmínky.

Model částečně omezeného objemu reprezentuje z mechanického hlediska několik situací, jež mohou nastat v HÚ:

- Při horizontálním uložení tato situace reprezentuje stav, kdy jedna ze stran může být odlehčena nebo dodatečně zatížena. Levá a pravá strana na Obr. 14 reprezentuje horninový masiv, který je oproti bentonitu dostatečně tuhý a neumožňuje deformaci bentonitu ve směru kolmém na masiv. Dolní strana reprezentuje vyvážený stav bentonitu. Neboli hranu, jež se nachází přesně v polovině vzdálenosti mezi UOS v horizontálním uložení nebo horninový masiv. Horní strana reprezentuje okraj bentonitu, jež může být odlehčen nebo dodatečně stlačen. Odlehčení nastane v horizontálním uložení UOS případě, že za danou stranou bude bentonit o nižší objemové hmotnosti, buď účelně, nebo chybou při výstavbě. Dodatečné stlačení může nastat, pokud se při výstavbě použije bentonit o vyšší objemové hustotě.
- Pravděpodobnější je tento případ u vertikálního uložení. Uvažujeme stejné okrajové podmínky, jako v horizontálním případě. Rozdílem bude, že odlehčená/stlačená hranice bude nad horním víkem UOS. Odlehčení může nastat v případě, že tzv. buffer neboli výplň v pracovním tunelu nad UOS bude vyplněna bentonitem o nižší objemové hmotnosti než bentonit v okolí UOS. Poznamenejme, že neexistuje koncept HÚ, kde by došlo ke kompresi bentonitu ve vertikálním uložení UOS.





*Obr. 14 Schematické zobrazení modelu s částečně omezeným objemem.*

Tento případ velmi pravděpodobně nastane ve vertikálním způsobu uložení UOS. Ve studii Dixon 2000, je výčet států, jež uvažují vyplnit pracovní tunel nad UOS materiálem, jež bude směs bentonitu a původního masivu. Což zcela jistě povede k uvolnění horní hranice bentonitu a ke snížení objemové hustoty bentonitu a snížení celkového tlaku na UOS.

Je velmi obtížné hypotetický předpokládat, jak velké bude uvolnění, ke kterému dojde. K tomuto je třeba znát přesné rozměry úložiště, materiálové parametry všech materiálů v úložišti a technologii zaplnění chodby. Což jsou parametry, které v nynější fázi vývoje nejsou k dispozici. Hlavním cílem tohoto projektu je určit maximální tlak na UOS. V tomto případě uvolnění bude celkový tlak na kontejner zcela jistě menší než v Kapitole 3.2. Možnost, jak predikovat budoucí snížení bobtnacího tlaku je použít metodu výpočtu průměrné objemové hustoty, která bude představena v dalších kapitolách.

### **3.4 Proměnná objemová hustota bentonitu**

Následující modely studují situace, za kterých bentonitová vrstva nebude homogenní. Existují dva základní předpoklady nehomogenity bentonitové vrstvy jakožto inženýrské bariéry.

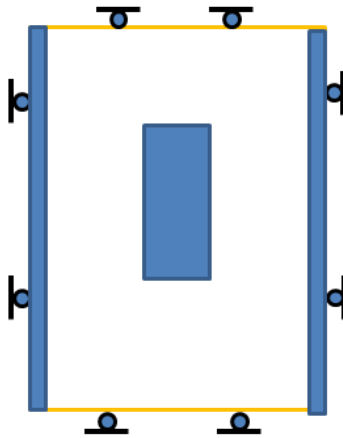
Prvním je přítomnost tzv. technologických mezer, což jsou mezery mezi bentonitovými bloky, mezery mezi peletami, mezera mezi UOS a bentonitem, mezera mezi bentonitem a masivem, mezera vzniklá odlomením masivu při vrtání nebo ražbě, případně další podobné technologické mezery. Platí, že bentonit při kontaktu s vodou či vzdušnou vlhkostí začne bobtnat. Cílem je, aby bentonit vyplnil všechny mezery a zároveň dostatečně plnil funkci inženýrské bariéry. Proto není uvažován případ, kdy bentonit nedokáže vyplnit všechny mezery.

Druhým případem nehomogenity je využití pelet v kombinaci s bentonitovými bloky a špatně technologicky zvládnutý postup tvorby bentonitových bloků, které mají různou objemovou hmotnost skrze bentonitový blok.

#### **3.4.1 Situace s volnou mezerou mezi bentonitem a horninou případně i bentonitem a UOS**

Situace velmi podobná modelu z Kapitoly 3.2. Reprezentuje tytéž modelové situace a podmínky. Rozdílem mezi oběma modely je přítomnost výše popsaných technologických

mezer, viz Obr. 15. Připomeňme, že bentonit se může rozpínat, ale celkový prostor, kam se může rozpínat je omezen.



Obr. 15 Schematické zobrazení modelu s přítomností technologických mezer.

Výpočet tlaku na UOS v tomto případě se řídí stejnými pravidly, jako byly popsány v Kapitole 3.2. Opět platí, že celkový tlak  $p_t = p_w + p_{sw} + p_t$  [MPa] na UOS bude součtem maximální hodnoty hydrostatického tlaku  $p_w$ , bobtnacího tlaku  $p_{sw}$  (dle Obr. 8) a součtu všech zvýšení tlaků  $p_t$  indukovaných termální expanzí.

Daná situace neovlivní velikost hydrostatického tlaku v době, která je definovaná pro tento projekt. Jediné předpokládané ovlivnění je, že bentonit bude rychleji saturován a dojde dřívějšímu zvýšení tlaku na UOS vlivem hydrostatického tlaku. Hodnota  $p_t$  jež představuje zvýšení tlaku na UOS vlivem termální expanze všech materiálů v HÚ zůstane téměř nezměněná oproti případu v Kapitole 3.2. Poznamenejme jen, že volná technologická mezera mezi UOS a bentonitem (dokud se nezaplní) bude působit jako izolant a dojde k nárůstu teploty na samotném UOS. Poté bude záležet na výsledné objemové hmotnosti bentonitu.

Hodnota bobtnacího tlaku  $p_{sw}$  bude změněna proporcionálně úbytku objemové hmotnosti bentonitu ve prospěch vyplněného prostoru. Výpočet může být proveden dle následujícího vzorce


$$\rho_d = \frac{V_1 \rho_{initial}}{V_1 + V_f}, \quad (3.1)$$

kde  $\rho_{initial}$  je počáteční objemová hustota bentonitu,  $V_1$  je objem bentonitu vloženého do vrtu,  $V_f$  je volný prostor. Musí platit, že celkový objem prostoru  $V$  bentonit-hornina je  $V_1 + V_f$ .

Například, vrt bude částečně vyplněn bentonitovými bloky o objemu  $V_1$  a o objemové hustotě  $\rho_{initial} = 1600 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , což odpovídá bobtnacímu tlaku  $p_{sw} = 7 \text{ MPa}$  dle Obr. 8. Dále předpokládejme, že proporcionálně 5% ( $V_2 = 0,05 V$ ) celkového objemu vrtu  $V$  nebylo vyplněno bentonitem a bentonit vyplnil tyto mezery. Příмым důsledkem je snížení celkové objemové hmotnosti bentonitu ve vrtu na hodnotu

$$\rho_d = \frac{V_1 \rho_{initial}}{V_1 + V_f} = \frac{0,95 \cdot V \cdot 1600}{V} = \frac{1520}{1} \approx 1520 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}.$$

Pro tuto hodnotu objemové hmotnosti bentonitu je maximální hodnota bobtnacího tlaku  $p_{sw} = 5,22 \text{ MP}$  (dle Obr. 8, červená křivka). Neboli dojde ke snížení celkového tlaku na kontejner o

 <b>SÚRAO</b>	<b>Provedení předběžného výpočtu tlaku na UOS – Závěrečná zpráva</b>	Evidenční označení:
		<b>SÚRAO TZ 388/2019</b>

1,78 MPa. Poznamenejme, že závislost bobtnacího tlaku na objemové hmotnosti je exponenciální závislost, proto 5% znamená přibližně čtvrtinový pokles tlaku.

Pokud by vrt v okolí UOS byl vyplněn peletami, pak technologické mezery lze pozorovat v prostoru mezi peletami. Pelety obecně bývají stlačeny na vyšší objemovou hmotnost než bloky, proto také bobtnací potenciál pelet je vyšší. V důsledku existence volného prostoru mezi peletami je celkový bobtnací tlak proporcionálně nižší, protože vlivem saturace dojde k vyplnění tohoto volného prostoru v důsledku rozpínání pelet. Důležité je, že srovnáním Obr. 1 a Obr. 2 plyne, že bobtnací síla bloků a pelet je stejná při stejné objemové hustotě.

### 3.4.2 Situace s mezerou zaplněnou bentonitem jiného typu

Následující modelová situace je rozšířením předcházející situace. Cílem je reflektovat předpokládané využití pelet nebo stříkaného bentonitu pro zaplnění technologických mezer.

Opět platí, že celkový tlak  $p_{total} = p_w + p_{sw} + p_t$  [MPa] na UOS bude součtem maximální hodnoty hydrostatického tlaku  $p_w$ , bobtnacího tlaku  $p_{sw}$  (dle Obr. 8) a součtu všech zvýšení tlaků  $p_t$  indukovaných termální expanzí. V souladu s předchozím modelem (viz Kapitola 3.4.1) tato modelová situace neovlivní tlak působící na UOS skrze hydrostatický tlak a termální expanzi materiálů v HÚ.

Velikost maximálního bobtnacího tlaku se odečte ze vzorce uvedeného na Obr. 8 pro danou objemovou hmotnost bentonitu, které se musí napočíst zprůměrováním všech objemových hmotností v dané oblasti. Za předpokladu, že všechen bentonitový materiál je plně saturovaný, pak výsledná  $\rho_{d_{stredni}}$  je

$$\rho_{d_{stredni}} = \frac{\sum_i^n V_i \rho_{b_i}}{\sum_i^n V_i + V_f} \quad (3.2)$$

kde  $\rho_{b_i}$  je počáteční objemová hustota bentonitu pro každý bentonitový materiál,  $V_i$  je objem bentonitového materiálu do vrtu,  $V_f$  je volný prostor. Musí platit, že celkový objem prostoru  $V$  je v sumě roven  $\sum_i^n V_i + V_f$ .

Poznamenejme, že velikost tlaku na UOS vlivem bobtnacího tlaku je nezávislá na rozměrech inženýrské bariéry. Neboli nezáleží na samotné tloušťce bentonitové vrstvy. Důležitá je finální objemová hmotnost bentonitu (po procesu stabilizace, tj. homogenizace) jež obklopuje UOS.

## 4 Dosavadní publikovaný výzkum v dané problematice

Tato kapitola sumarizuje poznatky, které byly získané ve výzkumu obdobné problematiky. Cílem není podat plnou rešeršní zprávu, ale poukázat na důležité momenty ve výzkumu dané problematiky, které podpoří poznatky uvedené v této zprávě nebo je rozšíří. Případně upozorní na momenty, které by měly být studovány v problematice hlubinného ukládání jaderného odpadu v České republice při znalosti přesné lokality.

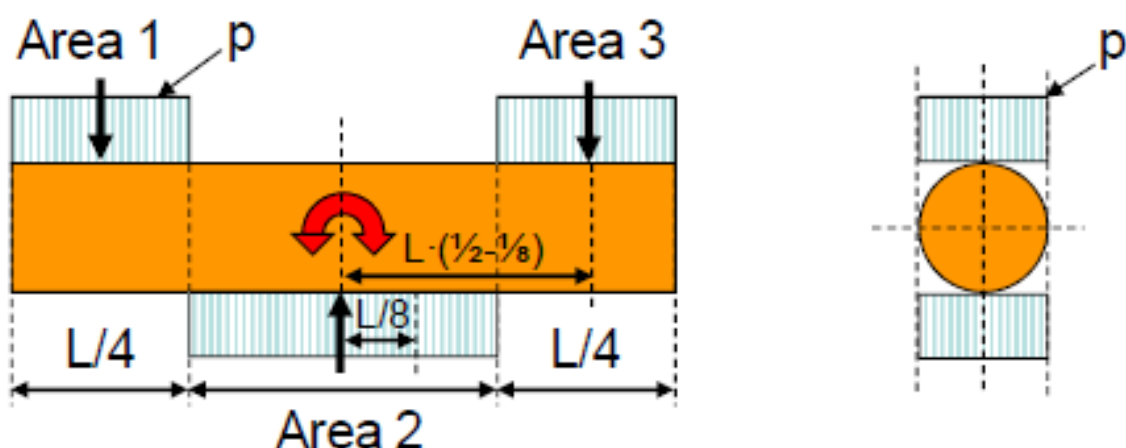
V této kapitole budeme využívat pouze výraz kontejner. Z důvodu, že UOS je vyhrazen pro studium v zájmu tohoto projektu s důrazem na český koncept UOS.

### 4.1 Situace při nerovnoměrném sycení bentonitu

V literatuře Börgesson 2009 je popsáno několik limitních případů, které mohou dočasně zvýšit tlak na kontejner. Tento projekt pracuje s kontejnerem, který má litinový vnitřní obal a měděný vnější obal. Cílem projektu nebylo vypočítat celkový tlak na kontejner, ale určit celkovou odolnost kontejneru. Projekt představuje dva podobné případy. Přičemž veškeré výpočty jsou uvedené v Börgesson 2009.

První z případů popisuje případné prohnutí kontejneru, které může nastat vlivem nerovnoměrného sycení bentonitu, viz Obr. 16. Jedná se o nejhorší případ, který může nastat dle literatury. Reprezentuje situaci, za které je potřeba, aby se vytvořily preferenční cesty, např. přítomností puklin v oblastech Area 1 a Area 3 na jedné straně a uprostřed kontejneru v oblasti Area 2 na protější straně. Neboli si lze představit kontejner jako nosník, u kterého může dojít k průhybu.

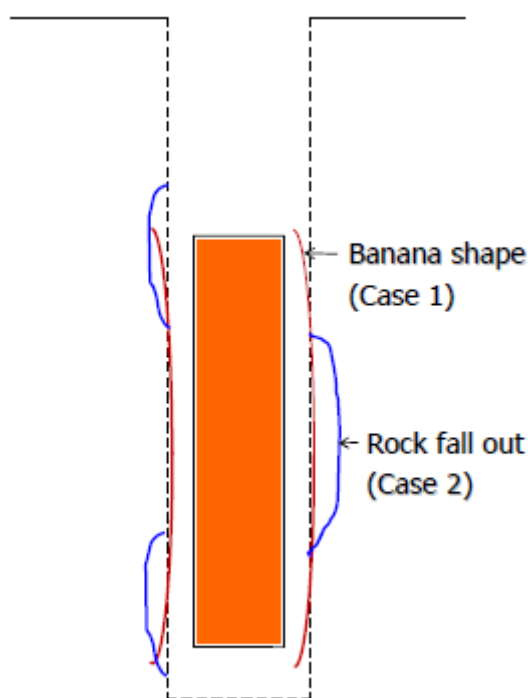
Ze zkušeností při modelování podobných jevů víme, že tato situace může v menší míře dočasně zvýšit tlak na kontejner, ale v době částečné saturace nepůsobí hydrostatický tlak vody, a proto nedojde k tak velkému tlaku na kontejner jako ve stabilním období.



Obr. 16 Schématické zobrazení nerovnoměrného sycení bentonitu, dle Börgesson 2009. Černé šipky znázorňují preferenční saturační cestu, respektive zvýšení tlaku v tomto směru.

Druhý případ reprezentuje z pohledu mechaniky podobnou situaci. Zde k průhybu kanystru může dojít za situace, že se vrt vyvrtá do tzv. banánového tvaru nebo pokud dojde k odlomení masivu, tak že se zopakuje silová situace z prvního případu. Neboli bentonit expanduje do mezer a ztratí tak bobtnací sílu, které by působila naproti z protější druhé strany kanystru a

může dojít k prohnutí kanystru, viz Obr. 17. Předpokládané nerovnoměrné počáteční rozložení objemové hustoty bentonitu podél kontejneru v důsledku banánového efektu se zřejmě vyrovná po dosažení plné saturace. Vycházíme ze zkušeností modelování EB experimentu (Gens 2017), kde tento rozdíl počátečních suchých hustot byl na začátku experimentu podstatně větší a při téměř plné saturaci se bentonit kolem kontejneru plně homogenizoval.



Obr. 17 Znárodnění dvou limitních případů při tvorbě ukládacího vrtu (Case 1 a Case 2) dle Börgesson 2009. Červená čerchovaná linie zobrazuje tzv. banánový vrt. Modře je zobrazena situace při odlomení masivu.

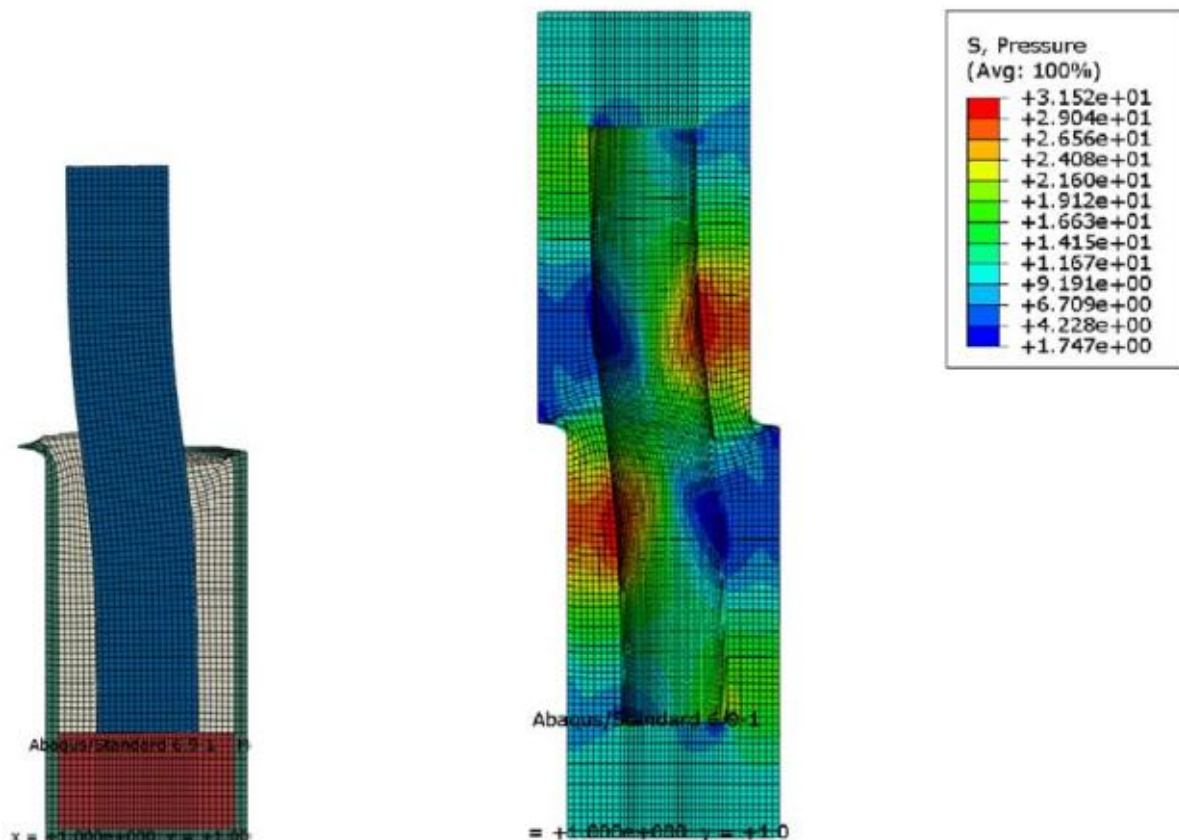
## 4.2 Situace při posunu na poruše jdoucí napříč úložným vrtem

V literaturách Börgesson L. et al. 1995, 2004, and 2010 je rozebrán fenomén poruchy jdoucí skrze úložný vrt. Při seismických otřesech či tektonických pohybech pak může dojít ke stříhu úložného vrtu s kontejnerem. Tato problematika dalece přesahuje tento ZL a k přesnému popsání tohoto fenoménu je třeba přesné znalosti vlastností kontejneru a HÚ. Proto jen okrajově je popsán jeden z experimentů, který ukazuje, o kolik se zvýší celkový tlak na kontejner během stříhu.

Jeden z výsledků Börgesson L. et al. 2004 je zobrazen na Obr. 18, který znázorňuje deformovanou síť na konci simulace pomocí jednoho z numerických modelů modelující laboratorní experiment. Laboratorní experiment je proveden v měřítku 1:10 oproti předpokládanému švédskému konceptu uložení kontejneru. Depoziční otvor měl průměr díry 15,8 cm o délce 62,2 cm. Měděná nádoba (kontejner) byla simulována tyčí z pevné mědi HPOF (vysoká čistota bez kyslíku) s délkou 45,0 cm a průměrem 8,0 cm. Poznamenejme, že mez kluzu u mědi je 50 MPa a u oceli je zhruba 5x větší, proto nastane prohnutí měděného válečku

Oba obrázky na Obr. 18 ukazují, že nádoba je ohnutá bez jakéhokoli naklonění. Ukazují také, že průměrné napětí se zvýšilo z 10 MPa na hodnotu nad 30 MPa v aktivních (pohyblivých) částech. V pasivních částech se napětí snížilo na méně než 2 MPa. Tato hodnota také

ukazuje, že bentonit ztratil kontakt s kanystrem v pasivní části (modrá oblast na Obr. 18). To mimo jiné znamená, že při zemětřesení může dojít ke zvýšení tlaku na kontejner o násobky původního tlaku. Pokud nedojde k porušení kontejneru a zaplnění vnitřních prostor kontejneru.

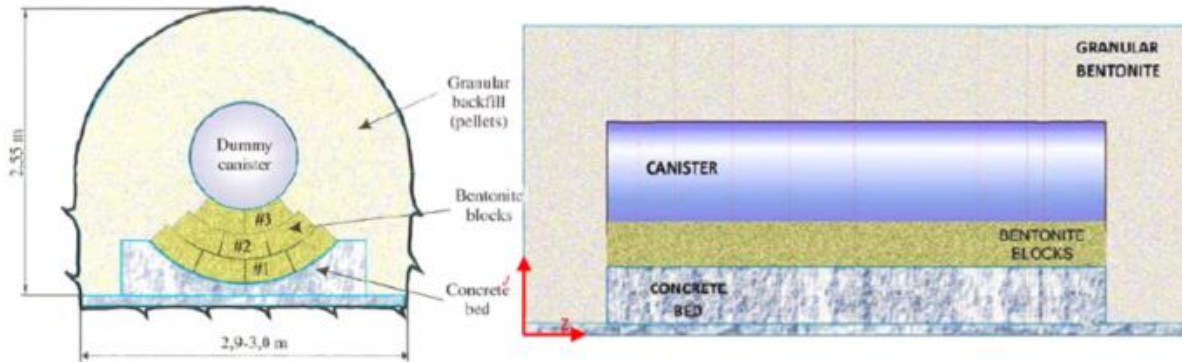


Obr. 18 Příklad výsledků z Börgesson L. et al. 2004. Deformovaná síť po 23 mm smykovém posuvu. (vlevo) Deformovaná konečně-prvková síť s odstraněnou horní částí. (vpravo) průměrné napětí v bentonitu (MPa).

### 4.3 DECOVALEX 2019 projekt – EB experiment

Jedním z cílů projektu DECOVALEX 2019 je modelovat vybrané experimenty a poté validovat vytvořené numerické modely oproti výsledkům z měření experimentů. Řešitelský tým tohoto projektu také modeluje Task D – EB experiment provedený v Mont Terri ve Švýcarsku v jílové hornině. Daný experiment je replikou španělského konceptu pro uložení jaderného odpadu. Ve stručnosti, kontejner bude uložen na bentonitové lůžko a zbytek prostoru bude vyplněn granulovaným bentonitem, viz Obr. 19. V tomto experimentu bylo bentonitové lůžko vystavěno na betonovém podstavci.





Obr. 19 Rozložení EB experimentu. Kanistr (Dummy canister), pelety (Granular backfill), bentonitové bloky (Bentonite blocks), betonové lůžko (Concrete bed).

Pro bližší představu o EB experimentu uvádíme několik konstrukčních parametrů:

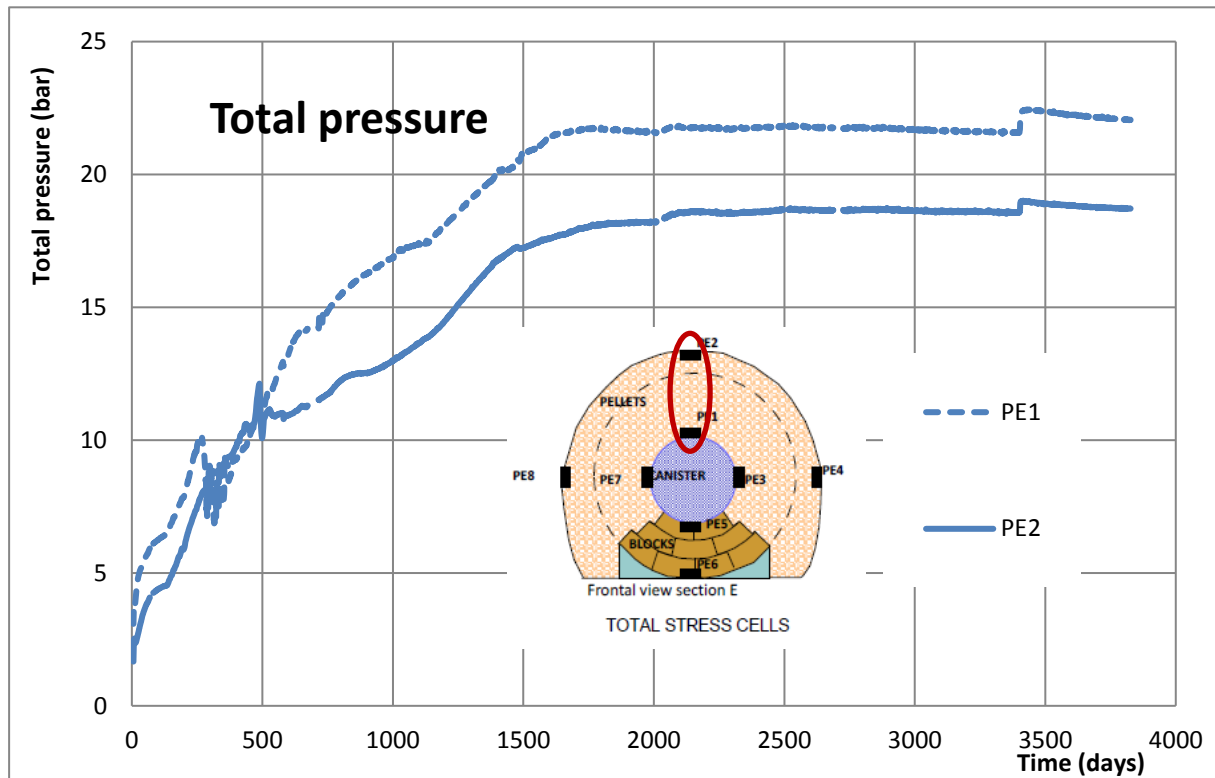
- Geometrie chodby - zadaná výška chodby 2,65 m-na počvě byl beton výšky 10 cm, světlá výška chodby = 2,65 – 0,1 = 2,55m, šířka chodby byla 2,9m, délka chodby byla 6m,
- Délka bentonitového lůžka a betonové vany byl 4,5m,
- Ocelový kanistr - průměr byl 0,97 m, délka 4,5 m a váha byla 11000 kg.
- Bentonitové bloky – počáteční objemová hmotnost  $\rho_d = 1.69 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$ . Uloženy ve třech řadách o výšce 21,4 cm a šířce 12,5 cm na jeden blok, tzn. na délku 4,5 m je  $450/12,5 = 36$  bloků. Mezi bloky bylo velké množství trhlin
- Bentonitové pelety - dopravené šnekovým dopravníkem, přičemž celková hmotnost umístěných pelet byla 40,2 t. Střední počáteční objemová hmotnost  $\rho_d = 1,36 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$  o počátečním množství vody 4,2%.

Poznamenejme, že váha na 1m kanystru =  $11000[t]/4.5[m] = 2\,444 \text{ kg} = 23,98 \text{ kN}$ . Na konci experimentu po 10,5 letech působí na kanistr tlak 2 MPa - vztaženo na 1m délky je to síla asi 2000 kN. Neboli, vliv samotné váhy válce na celkový tlak je i v tomto španělském konceptu minimální. Více detailů lze najít v Gens 2017.

Důležitým poznatkem je vývoj tlaku během 10,5 letého trvání experimentu. Bylo měřeno celkové napětí v několika bodech. Pro tento projekt je zajímavé měření PE1 z Obr. 20, měření PE7 z Obr. 21 a měření PE5 z Obr. 22. Lze pozorovat celkový nárůst tlaku na kontejner, který odpovídá pouze nárůstu vlivem bobtnacího tlaku, protože experiment byl izotermní a dosáhl téměř plné saturace. Při srovnání dat z čidla PE5 a čidel PE1, PE3 a PE7 lze pozorovat tlakový rozdíl je mezi oblastí pelet a bloků. Čidlo PE5 a PE2 se v letech ustálilo na hodnotě 2,5 MPa. Což demonstruje vytlačení kontejneru v horizontálním směru. A následnému srovnání sil vlivem hmotnosti kanystru a bobtnacích sil bloků a pelet, které jdou proti sobě. Čidla PE3 a PE7 měří podobné hodnoty okolo 1,8 MPa, ale rozdílné vůči čidlům PE5 a PE2. Toto demonstruje, jak bloky s vyšším bobtnacím tlakem vytlačily pelety, přičemž při bobtnání se roztáhly a snížily tak svůj bobtnací potenciál na úroveň pelet.

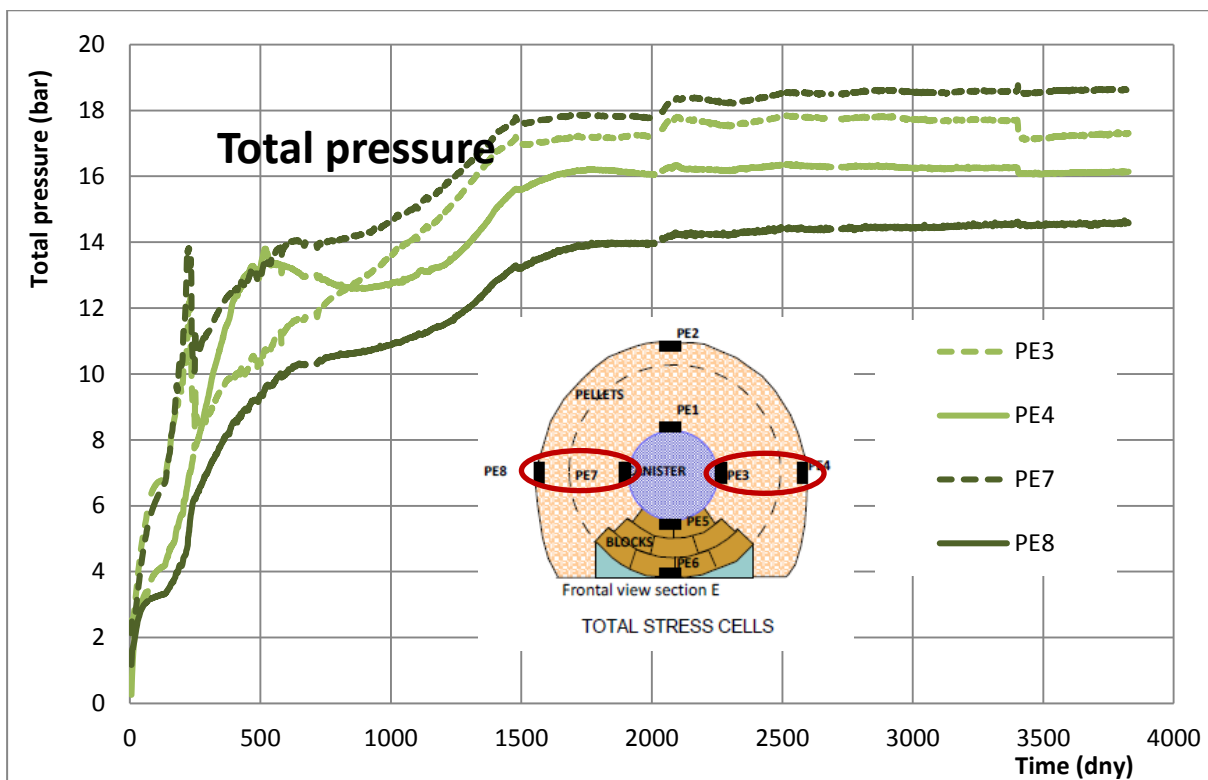
Z teorie homogenizace platí, že v delším časovém horizontu se bobtnací síly bentonitu srovnají a dojde k rovnoměrnému rozložení tlaku na kontejner. Tato problematika je, ale stále studována, protože vyžaduje dlouhodobé experimenty. Tento EB experiment potvrzuje, že při použití různých bentonitů o různých objemových hmotnostech dojde zejména v počátku uložení k nerovnoměrné distribuci tlaku na kontejner. Na konci experimentu se objemová hmotnost vyrovnala, viz Obr. 23, kde je ukázána distribuce objemové hmotnosti po rozebrání

EB experimentu. Toto mimo jiné znamená, že došlo k homogenizaci bentonitového materiálu uvnitř EB experimentu. Řešitelským týmem byl pro tento efekt homogenizace vytvořen matematický model, který byl validován oproti výsledkům EB experimentu a může být proto použit v predikci horizontálního uložení kontejneru s použitím granulovaného bentonitu.

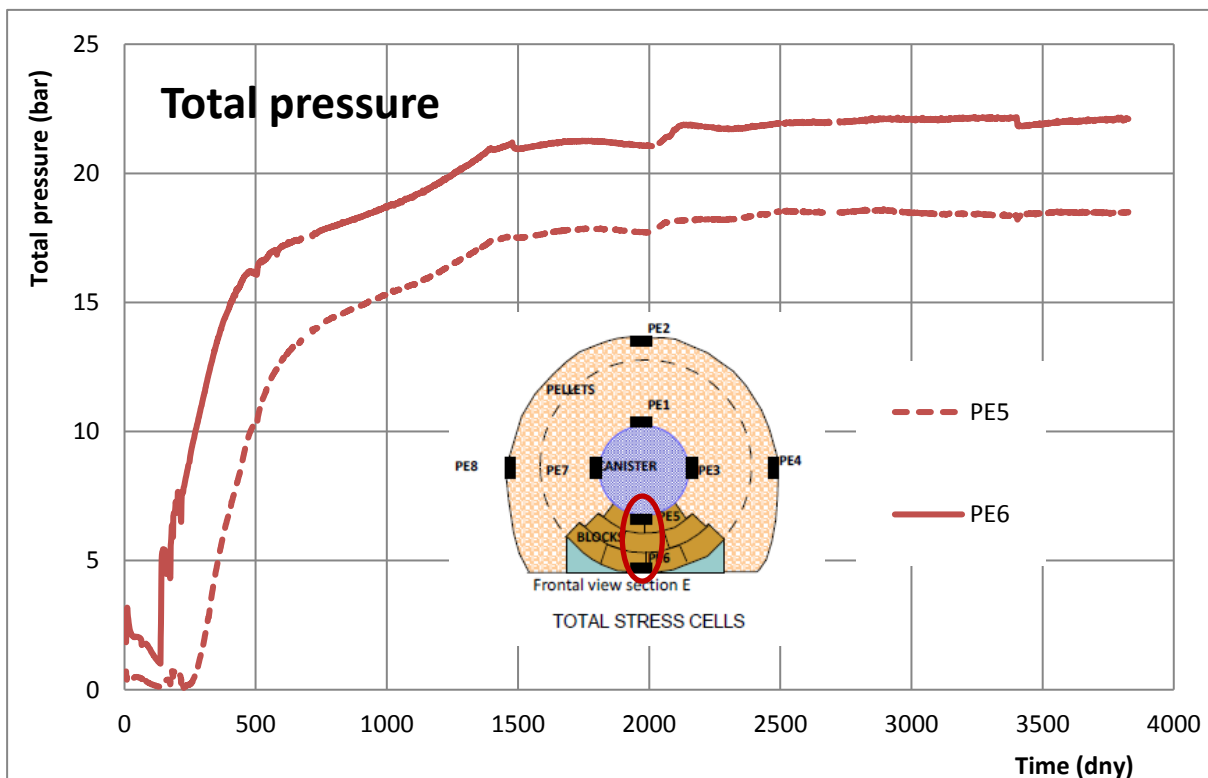


Obr. 20 Celkové napětí (Total pressure) [bar] v čase (Time) [dny] pro senzory PE1 a PE2.

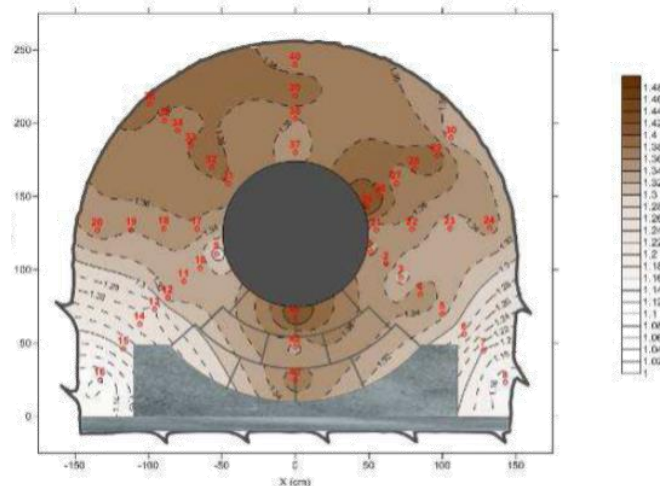




Obr. 21 Celkové napětí (Total pressure) [bar] v čase (Time) [dny] pro senzory PE3, PE4, PE7 a PE8.



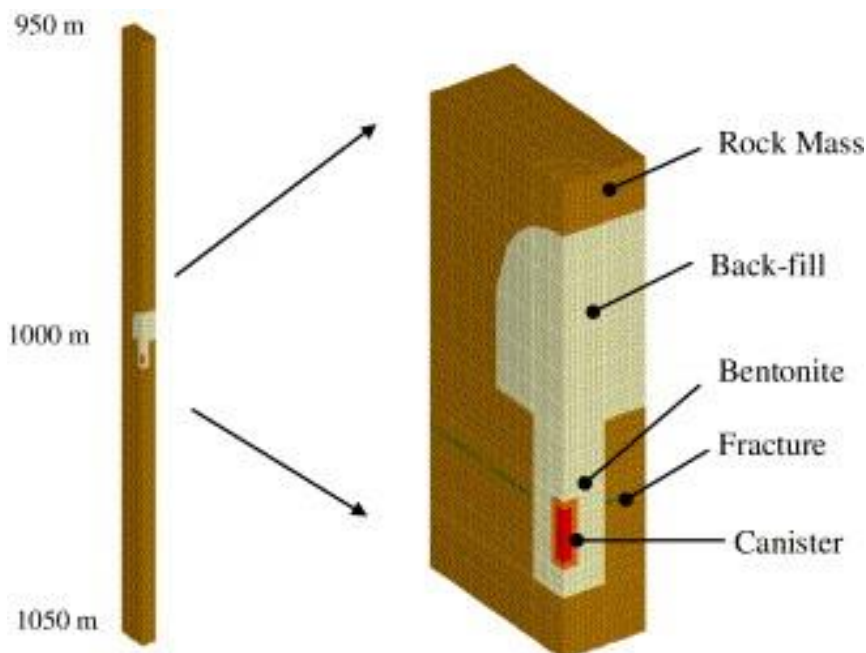
Obr. 22 Celkové napětí (Total pressure) [bar] v čase (Time) [dny] pro senzory PE5 a PE6.


**SECTION E**

Obr. 23 Ukázka homogenizace bentonitu na konci experimentu-téměř plná saturace


#### 4.4 Simulace úložiště dle švédského konceptu KSB-3

V mezinárodním projektu DECOVALEX-III byla řešena problematika hypotetického úložiště, bez jakéhokoliv experimentálního ověření. Modelová úloha byla v souladu s švédským konceptem KBS-3 pro hlubinné ukládání jaderného odpadu s využitím bentonitu z Kamaishi Mine v Japonsku, viz Obr. 24. Cílem bylo predikovat vývoj teploty v okolí úložiště, tlaku v různých bodech úložiště a vývoj saturace, více podrobností lze nalézt v Chijimatsu a kol. 2005, Millard a kol. 2015, Rutqvist a kol. 2015. Podobná problematika byla popsána v Nguyen 2007, který modeluje kanadské horizontální úložiště v granitu.



Obr. 24 Čtvrtina symetrického modelu hypotetického úložiště lokalizovaného v hloubce 1000m. Model prezentovaný Royal Institute of Technology, Chijimatsu a kol. 2005.

Hypotetický model KBS-3 konceptu úložiště se nachází v hloubce 1000 m pod zemským povrchem v granitické hornině. Vrt má hloubku otvoru 4,13 m a průměr je 2,22 m. Tlak vody

 <b>SÚRAO</b>	<b>Provedení předběžného výpočtu tlaku na UOS – Závěrečná zpráva</b>	Evidenční označení:
		<b>SÚRAO TZ 388/2019</b>

se rovná hydrostatickému tlaku, který v hloubce 1000 m a činí přibližně 10 MPa. Teplota v oblasti zkoumání je aproximována jednotnou hodnotou 45°C, způsobenou přírodním geotermálním gradientem. Vertikální napětí, způsobené zatížením nadloží, se rovná  $\sigma_v = -25,6$  MPa a vodorovné napětí se rovná  $1,5\sigma_v$ . Permeabilita masivu byla uvažována v rozmezí  $10^{-19}$  až  $10^{-17}$  [ $cm^2$ ] jako funkce efektivní porozity, tímto se vyjádřila míra porušení horniny.

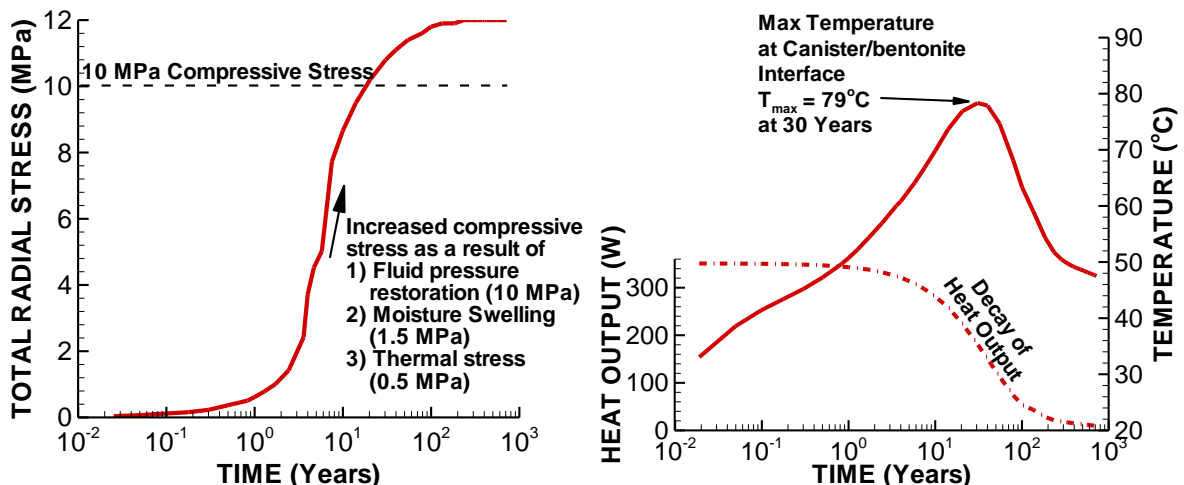
Zásyp (tzv. backfill) je vyroben ze směsi bentonitu (15%) a agregátů. V okolí kanystru byl použit bentonit ve směsi s pískem v poměru B:P=7:3. Počáteční saturace této směsi byla 65%. Efektivní (efektivní, protože se jedná o směs materiálů) objemová hmotnost směsi byla  $1\,368\,kg \cdot m^{-3}$ . Výsledný efektivní bobtnací tlak této směsi písku a bentonitu z Kamaishi Mine byl 1,5 MPa. Dále je třeba podotknout, že některé týmy v tomto projektu pracovaly s bobtnacím tlakem závislým na teplotě, proto bobtnací tlak může být snížen o závislost na teplotě. Ve zprávě Rutqvist a kol. 2015 je uvedeno snížení 0,001 MPa na každý stupeň Celsia. Při 90°C je bobtnací tlak dle japonského týmu snížen o 0,09 MPa, při zachování stejné efektivní objemové hmotnosti. Zadání modelové úlohy nepředpokládalo existenci technologických mezer, tj. snížení celkové efektivní objemové hmotnosti vlivem přítomnosti technologických mezer.

Bylo počítáno s mírně porušenou horninou a s postupným poklesem teploty dle logaritmické škály, více detailů lze nalézt v článku Rutqvist a kol. 2015.

Jedním z cílů tohoto projektu bylo vypočítat tlak na kontejner. Budeme zde prezentovat pouze výsledky týmu z Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL). Pozn. Jedním z cílů projektu DECOVALEX je nezávisle porovnat výsledky různých týmů kvůli bezpečnosti a jistotě v budoucí predikci HÚ dle vytvořených modelů.

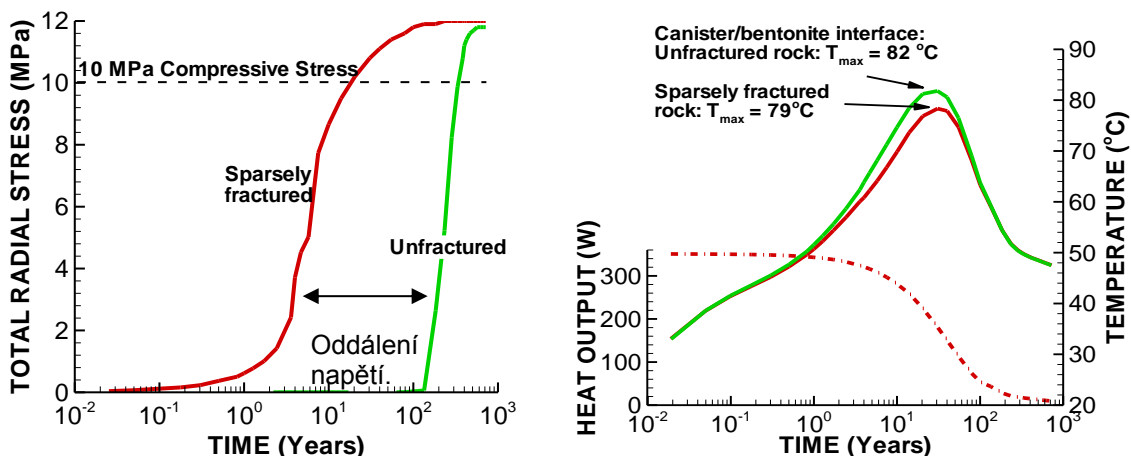
Na Obr. 25 (vlevo) lze pozorovat průběh tlaku působící na kontejner. V počátku je samotná teplota kanystru příčinou zvýšení tlaku na kanystr, o hodnotu přibližně 0,5 MPa. Tato hodnota je přímým důsledkem teplotní expanze vlastního topidla, horniny a bentonitu. Přímým laboratorním experimentem, byla zjištěna objemová termální expanze bentonitu v řádu  $1 \cdot 10^{-6}$  [ $^{\circ}C^{-1}$ ], horniny  $8,21 \cdot 10^{-6}$  [ $^{\circ}C^{-1}$ ] a oceli  $1,64 \cdot 10^{-6}$  [ $^{\circ}C^{-1}$ ]. Celková míra expanze je pak dána vlivem geometrie samotného modelu, resp. HÚ.

Poté dochází k saturaci, resp. bobtnání bentonitu ve směsi s pískem. Maximální hodnota bobtnacího tlaku při plné saturaci byla experimentálně změřena jako 1,5 MPa. Za největším nárůstem tlaku stojí hydrostatický tlak, který je v dané hloubce přibližně 10 MPa. Tyto výpočty jsou v souladu s teorií odvozenou v Kapitole 2.1. Přibližně po 100 letech, teplota v okolí kanystru začne klesat, viz Obr. 25. Lze pozorovat mírný pokles tlaku způsobeného teplotní expanzí materiálů.



Obr. 25 (vlevo) Vývoj tlaku na kontejner dle týmu z LBNL. (vpravo) Průběh teploty na povrchu kontejneru dle LBNL, Rutqvist a kol. 2015.

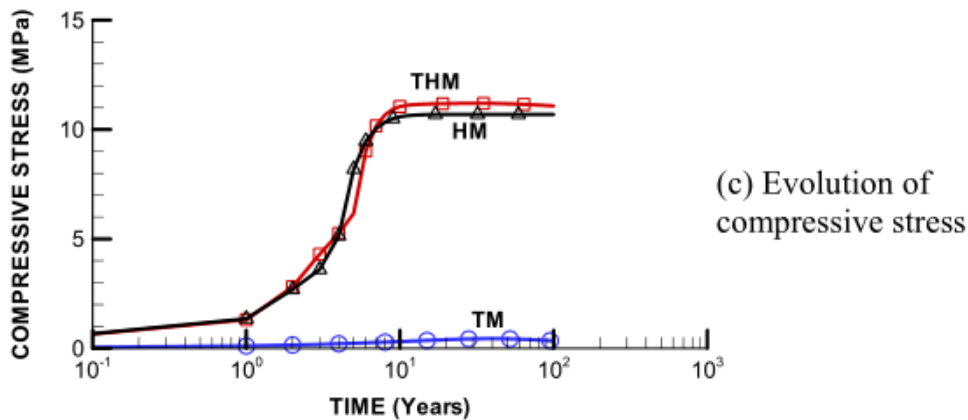
Poznamenejme (na základě zkušeností řešitelského týmu z jiných projektu), že situace v české provenienci bude odlišná i přesto, že koncept je v souladu s českým konceptem hlubinného ukládání jaderného dopadu, Pospíšková 2015. Umístění HÚ bude přibližně v hloubce 500 m, přesná hloubka záleží na lokalitě. Proto hydrostatický tlak bude nižší, stejně jako v Kapitole 2.1. Dále se nepředpokládá použití bentonitu ve směsi okolo UOS, proto bobtnací tlak bude vyšší. Dále na základě výsledku Hasal a kol. 2017 (výsledek byl spočítán pro švédské palivo, křivka poklesu tepelného výkonu pro české palivo není dostupná) bude maximální hodnoty teploty na UOS dosaženo v pozdějším čase než v tomto projektu. Proto pokles teploty v rámci teplotní expanze bude pomalejší.



Obr. 26 (vlevo) Srovnání vývoj tlaku na kontejner dle týmu z LBNL. (vpravo) Průběh teploty na povrchu kontejneru dle LBNL. Červená křivka reprezentuje mírně porušenou horninu (sparsely fractured) a zelená reprezentuje neporušenou horninu (unfractured), obě jsou výstupem z modelu LBNL, Rutqvist a kol. 2015.

Důležitým poznatkem z výsledků projektu DECOVALEX III je srovnání výsledků mezi homogenním horninovým masivem a mírně porušeným masivem. Details o porušení lze nalézt v Rutqvist a kol. 2015. Na Obr. 26 (vlevo) lze pozorovat oddálení působení účinků tlaku na kontejner, protože saturace bentonitu probíhá značně pomaleji vlivem snížení přítoků do oblasti bentonitu. Maximální hodnoty teploty na Obr. 26 (vpravo) na kontejneru je snížena, protože rozštěpený masiv lépe odvádí teplotu z okolí HÚ. Prokázalo se, že časový interval

působení tlaku na kontejner záleží na materiálových parametrech a konfiguraci samotného úložiště. Celkový pohled na vliv jednotlivých fyzikálních závislostí a jejich vlivu na působící tlak na kontejner, lze pozorovat na Obr. 27 – THM – Termo-Hydro-Mechanické jevy.

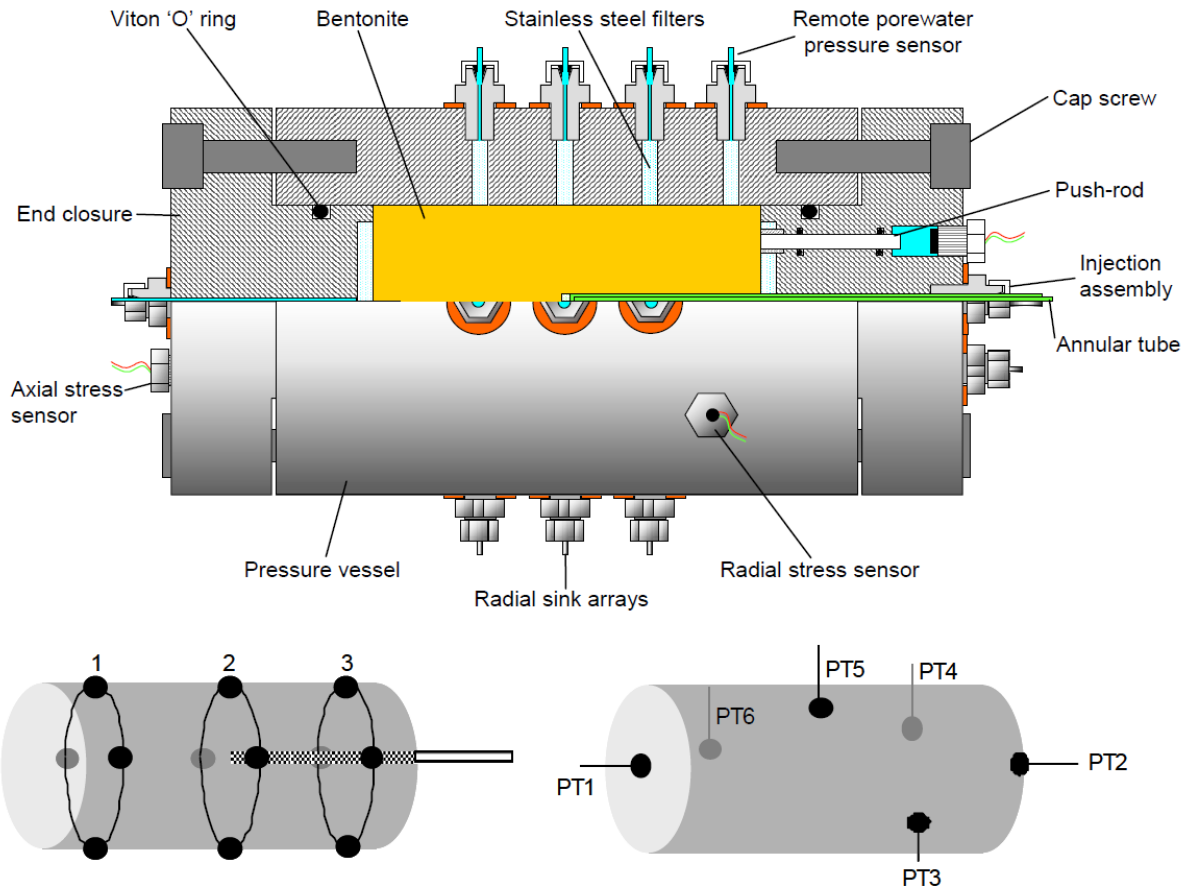


Obr. 27 Vývoj celkového tlaku (Evolution of compressive stress) v jednom bodě na kontejneru při zapojení různých modelů, Rutqvist a kol. 2015.

## 4.5 Vývoj celkového tlaku v bentonitu při změnách vody/plynu

### 4.5.1 Vliv Injektované vody

Literatura Harrington 2003 a 2007 popisuje experiment na zjištění Biotova parametru a posouzení jeho chování za zvýšeného tlaku injektované vody. Tento experiment měřil vliv tlaku injektované vody na celkový tlak v bentonitu, potažmo stěny experimentálního zařízení. Motivací pro tento experiment je posouzení vlivu tlaku vody na celkový tlak na kontejner a jeho vývoj při dočasně zvýšeném a sníženém tlaku. Experimentálně bylo zjištěno že, plně saturovaný bentonit plně nepřenáší vnější tlak skrze sebe. Neboli, například v námi uvažovaném konceptu HÚ, pokud je hydrostatický tlak vody 5 *Mpa* na bentonitovou inženýrskou bariéru o bobtnacím tlaku 2 *Mpa*, pak tlak působící na stěny zařízení (kontejner) je nižší než 7 *Mpa*. Protože dojde ke snížení vlivu hydrostatického tlaku. Pro posouzení tohoto jevu byl navržen experiment, jehož řez včetně umístění senzorů je zobrazeno na Obr. 28 z Harrington 2003.



### Sink configuration

### Stress sensor locations

Obr. 28 Řez zařízením pro migraci plynu za konstantního objemu bentonitu a radiálním průtokem plynu. Snímače jsou následující: [PT1] - celkové axiální napětí na koncovém uzavření zpětného tlaku, [PT2] - celkové axiální napětí na koncovém uzavěru vstřikování, [PT3] - celkové radiální napětí v blízkosti zavádění koncového vstřikování, [PT4] – pórový tlak v blízkosti koncového uzavěru pro injektáž, [PT5] - celkové radiální napětí v střední rovině a [PT6] - celkové radiální napětí blízko koncového uzavření zpětného tlaku. Hodnoty 1, 2 a 3 označují umístění senzorů pro měření průtoku plynu. Části zařízení jsou Vitonův těsnící kroužek (Viton 'O' ring), Bentonit (Bentonite), Filtry z nerezové oceli (Stainless steel filters), Dálkový snímač tlakové vody (Remote porewater pressure sensor), Šroub s uzávěrem (Cap screw), Tlaková tyč pro přenos hraničního napětí (Push-rod), Vstřikovací sestava (Injection assembly), Tlaková tyč (Annular tube), Snímač radiálního napětí (Radial stress sensor), Radial sink arrays (Radiální pole pro měření průtoku plynu), Tlaková nádoba (Pressure vessel), Snímač axiálního napětí (Axial stress sensor), Koncová část (End closure).

Experiment byl proveden s bentonitem Mx80 vzorek 10 o hustotě  $2770 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . Velikost bentonitového válečku byla 6 cm v průměru a 12 cm do výšky. Parametry bentonitu jsou uvedeny v Tab. 7.



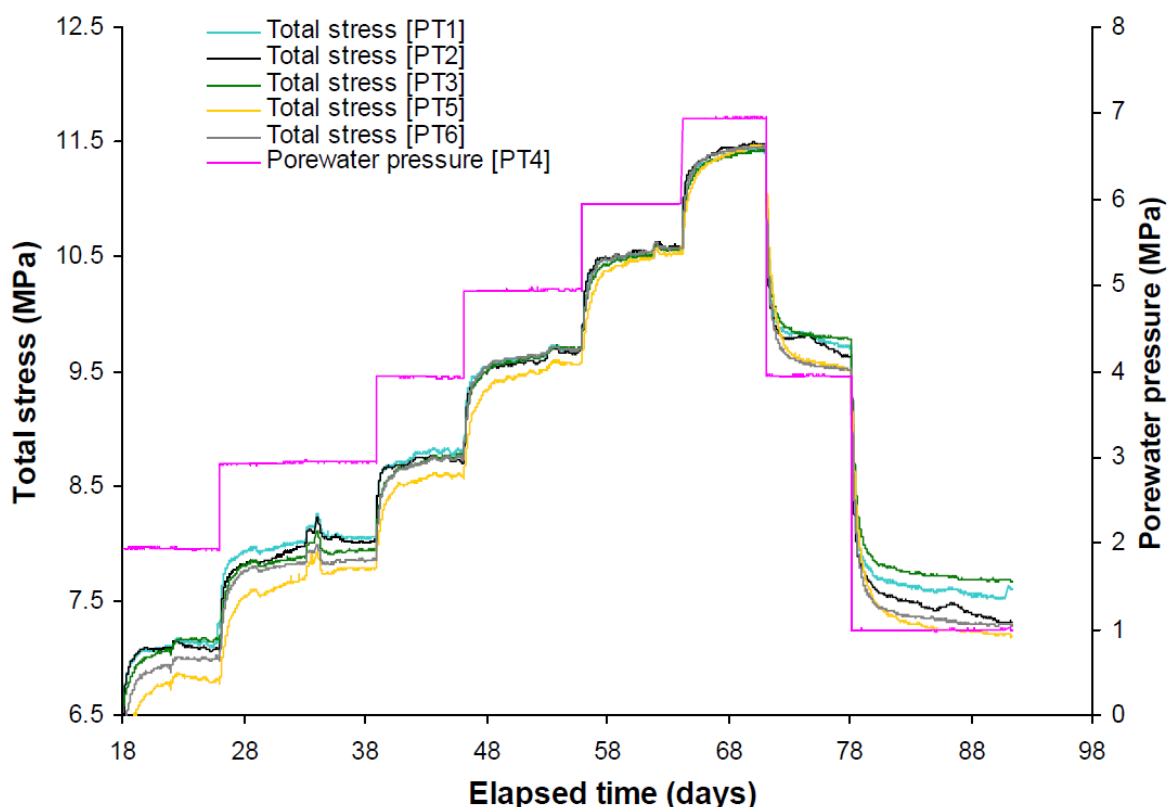
Tab. 7 Základní fyzikální vlastnosti zkušebních vzorků, Harrington 2007. Číslo vzorku (Specimen number), objemový obsah vody (Water content), Sytná hustota (Bulk density), Objemová hmotnost (Dry density), Poměr prázdné a vyplněné části (Void ratio), Počáteční saturace (Initial saturation).

Specimen number	Block number	Water content (wt %)	Bulk density (Mg m <sup>-3</sup> )	Dry density (Mg m <sup>-3</sup> )	Void ratio	Initial saturation (%)
Mx80-10	BGS99	26.7	2.005	1.582	0.751	98.6
Mx80-11	–	25.6	2.016	1.605	0.726	97.6

Váleček byl umístěn do aparatury pod tlakem 1 MPa. V rovnovážném stavu (před injektáží vody) se celkové napětí zaznamenané čidly pohybovalo od 6,6 MPa v blízkosti konce vzorku až po 6,0 MPa ve středu vzorku. Průměrné napětí působící na pět snímačů bylo 6,4 MPa.


Literatura Harrington 2003 popisuje výsledný tlak a stěny tlakové nádoby jako součet bobtnacího tlaku a pórového tlaku násobeného koeficientem  $\alpha$ . Toto je v souladu s rovnicí (2.3) vyjma termálního členu  $p_t$ , protože experiment byl proveden za konstantní teploty. Koeficientu  $\alpha$  se budeme věnovat v textu po popisu experimentu, zatím poznamenejme, že v jejich případě  $\alpha = 0,86$ , poté bobtnací tlak vychází 5,5 MPa.

Průběh tlakování vzorku a tlakové odezvy na jednotlivých čidlech, lze pozorovat na Obr. 29. Na začátku 18. dne byl vzorek stabilizovaný. Poté se začal tlakovat až do hodnoty 7 MPa, injektovaný tlak reprezentuje růžová křivka na Obr. 29. Po dosažení hodnoty 7 MPa se injektovaný tlak snížil na 4,0 MPa a nakonec zpět na 1,0 MPa. Průběh monitorovaného tlaku z jednotlivých senzorů je zobrazen na Obr. 29.



Obr. 29 Monitorované změny celkového tlaku v MX-80-10 vzorku ve dnech (Elapsed time (days)). Růžová křivka reprezentuje injektovaný tlak (Porewater pressure) a ostatní čáry reprezentují tlakovou odezvu v jednotlivých čidlech (Total stress).



 <b>SÚRAO</b>	<b>Provedení předběžného výpočtu tlaku na UOS – Závěrečná zpráva</b>	Evidenční označení:
		<b>SÚRAO TZ 388/2019</b>

Časový průběh monitorovaného tlaku z jednotlivých senzorů z Obr. 29 je zobrazen v Tab. 8. Lze pozorovat, že při zvyšování tlaku se celkové napětí působící na vzorek postupně více přibližuje injektovanému tlaku. Při zpětném vrácení na hodnotu tlaku 1,0 MPa je variace v hodnotě jednotlivých senzorů napětí napříč zkušebním vzorkem přibližně 0,6 MPa. Což může naznačovat tvorbu preferenčních cest v některých částech vzorku. Pro nejvyšší tlak 7,0 MPa je variace mezi senzory menší než 0,1 MPa, což poukazuje na rovnoměrnou distribuci plynu ve vzorku. Všechny senzory používané k měření celkového tlaku ukazovaly podobné hodnoty a měření ze žádného senzoru se významně nelišilo od ostatních.


Tab. 8 Výsledky celkového axiální a radiální napětí v průběhu historie proměnlivého injektovaného tlaku, Harrington 2003. Injektovaný tlak (Back-pressure), Průměr (Average), pozice senzorů jsou zobrazeny na Obr. 28.

Back-Pressure (MPa)	Axial backpressure end-cap [PT1]	Axial injection end-cap [PT2]	Total stress (MPa)		Radial backpressure end [PT6]	Average
			Radial injection end [PT3]	Radial middle [PT5]		
1.0	6.56	6.41	6.57	5.98	6.21	<b>6.35</b>
2.0	7.27	7.07	7.12	6.76	6.97	<b>7.04</b>
3.0	8.06	8.02	7.94	7.79	7.86	<b>7.93</b>
4.0	8.77	8.70	8.75	8.57	8.73	<b>8.70</b>
5.0	9.71	9.70	9.71	9.57	9.69	<b>9.68</b>
6.0	10.56	10.58	10.56	10.53	10.57	<b>10.56</b>
7.0	11.42	11.48	11.44	11.48	11.46	<b>11.46</b>
4.0	9.72	9.64	9.78	9.50	9.51	<b>9.63</b>
1.0	7.59	7.31	7.67	7.19	7.29	<b>7.41</b>

Porovnáním hodnoty průměrného tlaku v prvním a posledním řádku z tabulky na Tab. 8 lze pozorovat, že došlo k nárůstu celkového tlaku o hodnotu 1,06 MPa. Dle Harrington 2003 toto chování může být spojeno se zbytkovými vzduchovými bublinami, které se vytlačí z bentonitu, když vzrůstá injektovaný tlak. Nebo mohlo dojít ke změnám tření na bočních stěnách při zvyšování celkového napětí. Velmi pomalý nárůst napětí na snímači radiálního stresu v polovině vzorku [PT5] také naznačuje, že může dojít k časovému zpoždění při dosažení úplné hydratace v částech jílu vzdáleném od filtrů použitých pro zpětné potlačení.

Toto snížení vlivu injektovaného tlaku na tlakové senzory je vyjádřeno tzv. proporcionální konstantou neboli v souladu s touto prací Biotovým parametrem  $\alpha$ . Jinými slovy parametr  $\alpha$ , proporcionálně snižuje vliv externího pórového tlaku kapaliny, která prochází bentonitem. Důsledkem čehož dojde ke snížení účinku hydrostatického tlaku, resp. snížení tlaku na kontejner.

Na začátku experimentu byl parametr  $\alpha = 0,86$ . Tento parametr zůstával stejný po dobu postupného zvyšování tlaku v bentonitového vzorku. Ale při srovnání výsledků během uvolnění došlo ke změně parametru na  $\alpha = 0,74$ . Neboli po dočasném zvýšení tlaku, se parametr změní. Obecně vzato, pro  $\alpha \neq 1$  jsou možné důvody - hysteretické chování zahrnují tření

 <b>SÚRAO</b>	<b>Provedení předběžného výpočtu tlaku na UOS – Závěrečná zpráva</b>	Evidenční označení:
		<b>SÚRAO TZ 388/2019</b>


bočních stěn mezi bentonitem a ocelovou nádobou a dále možná přítomnost zbytkových vzduchových bublin v bentonitu. Navzdory tomuto snížení parametru  $\alpha$  došlo ke zvýšení celkového tlaku při vrácení na původní hodnotu injektovaného tlaku 1 MPa.

Ve zprávě Harrington 2007 je popsán velmi podobný experiment jen s využitím vyššího injektovaného tlaku až k hodnotě 46 MPa na bentonitu MX-80 vzorek 11, viz Obr. 29. Výsledky tohoto experimentu jsou zobrazeny na Obr. 32.

Tab. 9 Výsledky celkového axiální a radiální napětí v průběhu historie proměnlivého injektovaného tlaku, Harrington 2007. Injektovaný tlak (Back-pressure), Průměr (Average), pozice senzorů jsou zobrazeny na Obr. 28.

Test	Stage no.	Back-pressure (MPa)	Total stress (MPa)					Average
			Axial back-pressure end-cap [PT1]	Axial injection end-cap [PT2]	Radial injection end [PT3]	Radial middle [PT5]	Radial back-pressure end [PT6]	
Mx80-10	1	1.0	6.56	6.41	6.57	5.98	6.21	6.35
	2	2.0	7.27	7.07	7.12	6.76	6.97	7.04
	3	3.0	8.06	8.02	7.94	7.79	7.86	7.93
	4	4.0	8.77	8.70	8.75	8.57	8.73	8.70
	5	5.0	9.71	9.70	9.71	9.57	9.69	9.68
	6	6.0	10.56	10.58	10.56	10.53	10.57	10.56
	7	7.0	11.42	11.48	11.44	11.48	11.46	11.46
	8	4.0	9.72	9.64	9.78	9.50	9.51	9.63
	9	1.0	7.59	7.31	7.67	7.19	7.29	7.41
Mx80-11	1	1.0 [0.0]	8.46	7.42	7.93	8.42	8.69	8.19
	2	6.0 [6.0]	12.82	11.70	12.26	12.75	12.78	12.46
	3	11.0 [10.9]	17.37	16.31	16.92	17.43	17.24	17.05
	4	16.0 [15.9]	21.63	20.60	21.27	21.60	21.42	21.30
	5	21.0 [20.8]	26.32	25.22	25.92	26.32	26.05	25.97
	6	26.0 [25.8]	30.87	29.78	30.48	30.65	30.66	30.49
	7	31.0 [30.8]	35.65	34.64	35.44	34.70	35.54	35.20
	8	36.0 [35.8]	40.25	39.36	40.05	39.58	40.22	39.89
	9	41.0 [40.8]	45.18	44.52	45.26	43.75	45.22	44.78
	10	46.0 [45.7]	49.82	49.33	49.81	48.26	49.84	49.41
	11	31.0 [30.8]	39.19	38.55	38.74	37.76	39.21	38.69
	12	16.0 [15.8]	27.23	26.27	26.36	25.47	27.00	26.47
	13	46.0 [45.7]	50.69	50.94	50.46	48.80	51.27	50.43
	14	31.0 [30.7]	40.38	39.92	39.70	38.26	40.50	39.75
	15	46.0 [45.6]	50.90	50.92	50.40	49.12	51.01	50.47
	16	16.0 [15.9]	28.39	27.47	26.94	27.02	27.77	27.52
	17	1.0 [1.0]	16.77	15.15	14.55	14.99	15.26	15.34

Závěry tohoto zpřesňujícího experimentu s vyšším tlakem ukazují, že pod vysokým tlakem je parametr  $\alpha$  blízký hodnotě 1. Neboli injektovaný tlak není snížen přechodem přes bentonit a hodnota tlaku je přenesena na senzory.

 <b>SÚRAO</b>	<b>Provedení předběžného výpočtu tlaku na UOS – Závěrečná zpráva</b>	Evidenční označení:
		<b>SÚRAO TZ 388/2019</b>

Porovnáním hodnoty průměrného tlaku v prvním a posledním řádku z Tab. 9 lze pozorovat, že došlo k nárůstu celkového tlaku na téměř dvojnásobek původní hodnoty (z 8,19 MPa na 15,34 MPa). Tento experiment posloužil k určení Biotova koeficientu  $\alpha$ , který je nižší než hodnota 1. Cílem tohoto projektu bylo ukázat maximální hodnotu tlaku působícího na UOS. V této ZZ je počítáno s hodnotou  $\alpha = 1$ , neboli hodnotou, jež přímo přenáší hydrostatický tlak na UOS, proto reálná hodnota tlaku působícího na UOS může být nižší. Nejsou známy výsledky chování pro český bentonit, ale předpokládáme podobné chování.

Experimentální měření ukázalo, že pokud dojde k výraznému zvýšení tlaku v bentonitu, může dojít ke zvýšení původní hodnoty bobtnacího tlaku o hodnotu úměrnou injektovanému tlaku. Obě zprávy Harrington 2003 a 2007 se zabývají měřením tohoto jevu. Harrington 2007 neudává reálný základ pro zvýšení tlaku do hodnot 46 MPa. Možnou domněnkou, je že dojde k zalednění nad HÚ. Nejsme schopni vysvětlit příčiny, takto vysokého zvýšení tlaku a následného uvolnění, proto nebudeme výsledky těchto zpráv zahrnovat do výsledků. Zvýšení tlaku v bentonitu o úroveň hydrostatického tlaku je přímým důsledkem lokalizace HÚ v podzemí. Proto můžeme dle Harrington 2003 uvažovat, že výsledný tlak působící na UOS bude nižší, než je hydrostatický tlak vody.

Musíme, ale podotknout, že experimentální měření pro český bentonit nejsou k dispozici. Z tohoto důvodu budeme pro výpočet maximální hodnoty tlaku působícího na UOS uvažovat, že Biotovo číslo je rovno 1. Za předpokladu, že se nenajde rozumný důvod pro dočasné zvýšení tlaku v bentonitu na úroveň 40 MPa a vyšší, může být, ale v reálném HÚ Biotův parametr  $\alpha < 1$ .

Pokud by byl podobný experiment proveden pro český bentonit doporučujeme experimentální měření rozšířit o cyklický nárůst/snížení tlaku injektovaného tlaku (Harrington 2003 a 2007 s tímto nepracují). Tímto by se dal sledovat vývoj tlaku, případně jeho změna, pokud by docházelo k vytvoření opakovanému zvýšení/uvolnění tlaku (např. vlivem prací v okolí HÚ). Poté bychom doporučili experiment sledovat, zda se tlak vrátí na původní hodnoty před samotnou injektáží plynu.

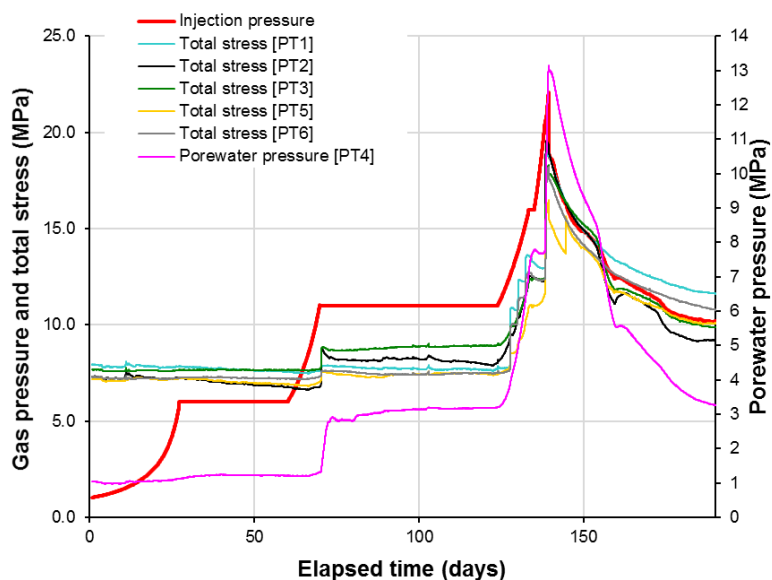
#### 4.5.2 Vliv injektovaného plynu

Stejně experimentální zařízení z Obr. 28 bylo využito ke zkoumání velmi složité problematiky propustnosti plynů v bentonitu Mx80-10. Motivací pro tento experiment je domněnka, že plyny uvolňované během životnosti HÚ mohou vytvořit preferenční cesty, tzv. fraktury nebo zlomy, které mohou lokálně změnit tlak na kontejner. Nebo se plyny mohou lokálně hromadit a zvýšit tak tlak na kontejner. Cílem tohoto projektu není zabývat se migrací plynu skrze bentonitovou bariéru. Proto jen sumarizujeme výsledky s přímou souvislostí ke tlaku na kontejner.

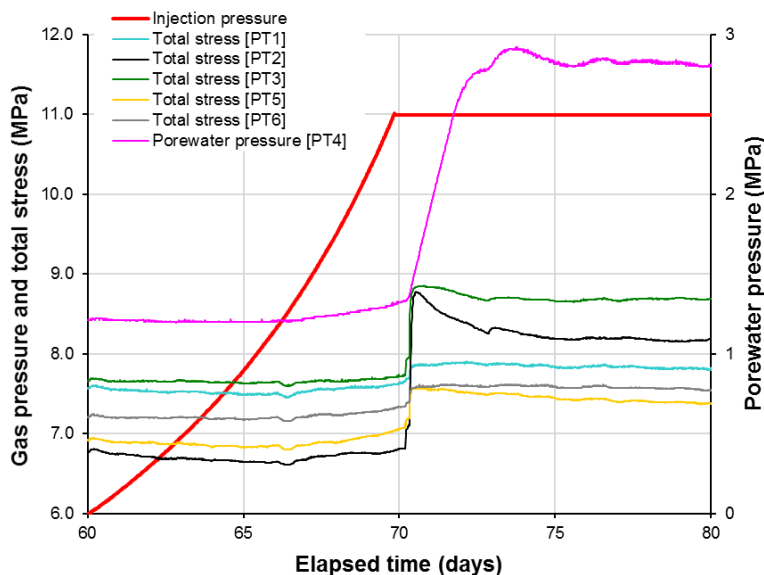
Experimentální cela (Obr. 28) obsahovala tlaková čidla, jež umožnili měřit vztah mezi tlakem injektovaného plynu a tlakovou odezvou na tlakových čidlech. Doprostřed bentonitového válečku se skrze tlakovou tyč injektoval plyn a kontinuálně bylo sledováno axiální a radiální celkové napětí a vnitřní tlak pórové vody.

Průběh injektovaného tlaku (červená křivka) a celkového napětí (čáry senzorů PT1-6) lze pozorovat na Obr. 31. V prvních 25 dnech došlo k nárůstu tlaku plynu na hodnotu 6 MPa. Tento nárůst neměl vliv na celkové napětí na jednotlivých senzorech. Pravděpodobným vysvětlením je pomalý nárůst a nízký tlak, jež umožnil plynu difundovat do celého objemu vzorku. Na začátku 60 dne tlak během 10 dní zvýšil z 6 MPa na 11 MPa, viz Obr. 30. Lze pozorovat, že půl dne po zastavení zvýšení injektáže plynu se celkové napětí skokově zvýšilo ve všech

senzorech. Pravděpodobnou příčinou je tvorba pukliny (nebo puklin), jež rozevřela bentonit, který zatlačil na senzory. Senzory PT2 a PT3 poté ukázaly pokles v napětí, což lze vysvětlit následným uzavřením pukliny v tomto směru. Poté se opakoval stejně krátký nárůst tlaku ve 124 dnu na 16 MPa, kdy senzory reagovali s dvoudenním zpožděním. Při maximálním zvýšení tlaku na 23 MPa zareagovaly tlakové senzory za stejnou dobu o stejnou hodnotu nárůstu. Rychlý pokles tlaku v PT5, nelze vysvětlit.



Obr. 31 Časový průběh injektáže plynu do tlakové nádoby. Tlak injektovaného plynu a celkové napětí (Gas pressure and total stress), Pórový tlak (Porewater pressure), uplynulý čas – dny (Elapsed time (days)).



Obr. 30 Detail intervalu 60 až 80 dne z Obr. 31.

Problematika migrace plynu je velmi složitá a bez dostatečných experimentů těžko predikovatelná. Záleží na mnoha faktorech, jako objemové hmotnosti bentonitu, saturaci, difuzivitě plynu, homogenitě vzorku, množství plynu atd. Ukázalo se, že za určitých podmínek může plyn zvýšit tlak na kontejner, ale tento jev potřebuje podrobnější vstupy a zkoumání. Také při vývoji působícího tlaku na UOS bude záviset na množství vytvořeného plynu.

## 5 Závěr

V předložené zprávě jsme odvodili hodnotu maximálního tlaku působícího na UOS za různých modelových situací, které mohou nastat v HÚ. Byl diskutován vliv všech proměnných faktorů, jako počáteční objemová hmotnost, vliv tepla, přítomnost technologických mezer, hloubka uložení atd. Studován byl pouze ustálený stav, kdy teplota na povrchu UOS dále neroste a došlo k plné (nebo téměř plné) saturaci bentonitové bariéry.

Celkový tlak  $p_{total} = p_w + p_{sw} + p_t$  [MPa] na UOS bude zejména součtem maximální hodnoty hydrostatického tlaku  $p_w$ , bobtnacího tlaku  $p_{sw}$  (dle Obr. 8) a součtu všech zvýšení tlaků  $p_t$  indukovaných termální expanzí. Ostatní zdroje tlaku (Kapitola 2.1) tvoří minoritní zdroje a do celkového tlaku působícího na UOS přispějí minimálně.


Podrobněji k jednotlivým zdrojům. **Hydrostatický tlak**  $p_w$  roste s hloubkou a maximální hodnota je 5 MPa v hloubce 500 m. Jde o tlak odpovídající situaci, kdy pórovitost a puklinovitost masivu vytvářejí propojení k zemskému povrchu. Tento tlak se může lišit při geologii zahrnující nepropustné vrstvy. Jedná se o výrazný zdroj tlaku, který ale může být snadno experimentálně změřen při stavbě HÚ nebo vypočítán při znalosti geologie masivu.

Hodnota **bobtnacího tlaku**  $p_{sw}$  je určena proporcionálně úbytku objemové hmotnosti bentonitu po vyplnění volného prostoru. Předpokladem je, že dané okolí UOS je vyplněno bloky, peletami, stříkaným bentonitem nebo kombinací. Je důležité vypočítat objem v okolí UOS a znát objemovou hustotu a objem bentonitu uloženého v tomto okolí. Bentonit při kontaktu s vodou nebo vodní parou zaplní veškerý volný prostor a tím se sníží jeho objemová hmotnost na novou hladinu. Poté stačí odečíst maximální hodnotu bobtnacího tlaku z Obr. 8, která reprezentuje maximální tlak na kontejner vlivem bobtnacího tlaku. V realitě tato hodnota bude nižší, protože Obr. 8 je vytvořen pro destilovanou vodu za konstantní teploty. Minerální voda a vyšší teplota snižují bobtnací tlak bentonitu, ale měření pro český bentonit nejsou k dispozici. Platí, že bobtnací účinky bentonitu ve formě bloků, pelet, stříkaného nebo kombinací jsou stejné při stejné průměrné objemové hmotnosti a plné saturaci.

Tlak  $p_t$  je součtem všech příspěvků **termální expanze** všech materiálů v HÚ. Její vliv na celkový tlak bude klesat s klesající teplotou HÚ, ale dle Obr. 7 v době po tisíci letech bude značně zvýšená teplota v okolí HÚ. Proto je třeba tento zdroj tlaku zahrnout. Poznamenejme, že tato hodnota 0,5 MPa představuje horní mez a její přesné určení vyžaduje přesný THM model se znalostí dat, které nyní nejsou k dispozici.

Byla vytvořena metodika, která rigorózně definuje celkový tlak působící na UOS. Dále bylo navrženo několik směrů výzkumů, které by dále zpřesnily předpokládanou hodnotu tlaku na UOS.

V této zprávě bylo poukázáno na zahraniční výzkum v dané problematice. Cílem bylo ukázat důležité momenty ve výzkumu dané problematiky, které podpoří poznatky uvedené v této zprávě nebo je rozšíří. Případně upozorní na momenty, které by případně mohly být studovány v problematice hlubinného ukládání jaderného odpadu v České republice při znalosti přesné lokality.

 <b>SÚRAO</b>	<b>Provedení předběžného výpočtu tlaku na UOS – Závěrečná zpráva</b>	Evidenční označení:
		<b>SÚRAO TZ 388/2019</b>

## **Diskuze výsledků a přínosů pro rozvoj výzkumu hlubinného úložiště v České Republice**

Maximální hodnota tlaku působícího na UOS představuje důležitou veličinu, jež je důležitá z dlouhodobého pohledu hodnocení bezpečnostních funkcí UOS. Její znalost pomůže navrhnout bezpečný kontejner, ve smyslu mechanických vlastností, rychlosti koroze, odolnosti atd.


Tento projekt vytvořil metodiku výpočtu a upozorňuje na důležité body při tvorbě konceptu HÚ a použitých UOS.

V této práci bylo uvedeno několik návrhů experimentů, které by zpřesnily výpočet tlaku na kontejner. Doporučujeme provést přepočet odhadovaného celkového tlaku působícího na UOS při znalosti přesné lokality HÚ v ČR a s vodou odebranou z této lokality, protože bobtnací tlak závisí na druhu vody, viz Obr. 5.

Seznam experimentů, jež by zpřesnily výpočet tlaku působící na UOS:

1. Provedení série edometrických testů při dané objemové hmotnosti na získání rozptylu hodnot bobtnacího tlaku. Toto opakovat pro pravděpodobné spektrum objemové hmotnosti bentonitu v HÚ.
2. Experiment na zjištění snížení bobtnacího tlaku za zvýšené teploty.
3. Při znalosti lokality a provedení hloubkových vrtů změřit pórový tlak vody v dané hloubce.
4. Provést plně propojený TMC model dle Kapitoly 4.4 s přesnými rozměrovými parametry reálného HÚ. Pro získání předběžných informací, které by dále sloužily ke zpřesnění výpočtu tlaku působící na UOS.
5. Provedení experimentu na cyklické šíření plynu/tlaku vody v bentonitu a jeho vliv na celkový tlak dle Harrington 2003.



 <b>SÚRAO</b>	<b>Provedení předběžného výpočtu tlaku na UOS – Závěrečná zpráva</b>	Evidenční označení:
		<b>SÚRAO TZ 388/2019</b>

## 6 Seznam literatury

- BÖRGESSON L., JOHANNESSON L.-E., RAIKO H. Uneven swelling pressure on the canister simplified load cases derived from uneven wetting, rock contours and buffer density distribution. SKB Public report 2009.
- BÖRGESSON L., JOHANNESSON L.-E., SANDÉN T., HERNELIND J., Modelling of the physical behavior of water saturated clay barriers. Laboratory tests, material models and finite element application, 1995. SKB TR-95-20.
- BÖRGESSON L., JOHANNESSON L.-E., HERNELIND J., Earthquake induced rock shear through a deposition hole. Effect on the canister and the buffer, 2004. SKB TR-04-02.
- BÖRGESSON L., DUECK A., JOHANNESSON L.-E., Material model for shear of the buffer – evaluation of laboratory test results, 2010. SKB TR-10-31.
- CHIJIMATSU M., NGUYEN T.S., JING L., DE JONGE J., KOHLMEIER M., MILLARD A., REJEB A., RUTQVIST J., SOULEY M., SUGITA Y., Numerical study of the THM effects on the near-field safety of a hypothetical nuclear waste repository-BMT1 of the DECOVALEX III project. Part 1: Conceptualization and characterization of the problems and summary of results, International Journal of Rock Mechanics and Mining, 2005.
- DIXON A.D., Porewater salinity and the development of swelling pressure in bentonite-based buffer and backfill materials, POSIVA 2000-04, June 2000
- ENRESA FEBEX II Project Final report on thermo-hydro-mechanical laboratory tests. ENRESA 2014, Madrid.
- GENS, A. (2016), INBEB Task, prezentace DECOVALEX-2019 1st Workshop & Steering Committee Meeting, 18-20 May 2016, Berkeley USA
- GENS, A. (2017), HM and THM Interactions in Bentonite Engineered Barriers (INBEB). STAGE 1: OPERATIONAL PERIOD OF THE EB EXPERIMENT. DECOVALEX report, 2017
- GRAY M. N., (1993): OECD/NEA International Stripa Project 1980–1992. Overview Volume III, Engineered barriers. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- HARRINGTON J.F., HORSEMAN S.T., Gas migration in KBS-3 buffer bentonite - Sensitivity of test parameters to experimental boundary conditions, British Geological Survey, January 2003.
- HARRINGTON J.F., BIRCHALL D.J., Sensitivity of total stress to changes in externally applied water pressure in KBS-3 buffer bentonite, British Geological Survey, Chemical & Biological Hazards Programme, Kingsley Dunham Centre, April 2007
- HASAL M., MICHALEC Z., BLAHETA R., Ověřovací numerický výpočet analytického modelu šíření tepla v HÚ, SÚRAO 2017-2190.
- HUANG W.-H. CHEN W.-CH., Swelling Behavior of a Potential Buffer Material under Simulated Near Field Environment, Journal of NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY, Vol. 41, No. 12, p. 1271–1279 (December 2004).
- LUDVIGSON J.-E., NORDQVIST R., EKMAN L., HANSSON K. (1999): Äspö Hard Rock Laboratory. Backfill and Plug Test. Hydraulic testing of core drilled boreholes in the ZEDEX drift. SKB IPR-09-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- NGUYEN S., JING L., Task A: Influence of near field coupled THM phenomena on the performance of a spent fuel repository Report of Task A1, DECOVALEX-THMC Project, February 2007.
- MILLARD A., REJEB A., CHIJIMATSU M., JING L., DE JONGE J., KOHLMEIER M., NGUYEN T.S., RUTQVIST J., SOULEY M., SUGITA Y., Numerical study of the THM effects on the near-field safety of a hypothetical nuclear waste repository-BMT1 of the DECOVALEX III project. Part 2: Effects of THM coupling in continuous and homogeneous rocks, International Journal of Rock Mechanics and Mining, 2005.



- POSPÍŠKOVÁ I, VOKÁL A., VONDROVIC L. A KOL., Střednědobý plán výzkumu a vývoje pro potřeby umístění hlubinného úložiště v ČR 2015 – 2025, Praha, červenec 2015.
- PUSH R., YONG R., NAKANO M., High Level Radioactive Waste (HLW) Disposal: A Global Challenge, WIT Press, 2011.
- RODWELL, W. R; HORSEMAN, S. T. ET AL; HARRIS, A. W, Gas migration and two-phase flow through engineered and geological barriers for a deep repository for radioactive waste, A joint EC/NEA status Report, 1999.
- RUTQVIST J., CHIJIMATSU M., JING L., MILLARD A., NGUYEN T.S., REJEB A., SUGITA Y., TSANG C.F., Numerical study of the THM effects on the near-field safety of a hypothetical nuclear waste repository-BMT1 of the DECOVALEX III project. Part 3: Effects of THM coupling in sparsely fractured rocks, International Journal of Rock Mechanics and Mining, 2005.
- SAEGUSA H., GAUTAM, M.R., WATANABE K. (2003): Analysis of hydraulic pressure fluctuation in deep geologic formations in Tono area, Japan using artificial neural networks. Journal of Hydrology, 284, 174-192.
- ŠTÁSTKA J., DEMONSTRAČNÍ EXPERIMENT MOCK-UP JOSEF, Tunel č.2/2014,
- ŠTÁSTKA J., 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.
- VASCONCELOS R., PINYOL N., ALONSO E., GENS A., Long-term Performance of Engineered Barrier Systems. PEBS report 06/06/14
- VAŠÍČEK R., LEVOROVÁ M., HAUSMANNOVÁ L., ŠTÁSTKA J., CTU IN PRAGUE; VEČERNÍK P., TRPKOŠOVÁ D., GONDOLLI J., ÚJV ŘEŽ, A. S.; Interim results of EPSP laboratory testing DOPAS D3.17, Interim report 2014
- VILLAR M.V., CAMPOS, L. GUTIÉRREZ- EB experiment: Laboratory post-mortem analyses report, CIEMAT Technical Report CIEMAT/DMA/2G210/01/2014
- VILLAR M.V., GÓMEZ-ESPINA R., Report on Thermo-Hydro-Mechanical Laboratory Tests Performed by CIEMAT on Febex Bentonite 2004-2008, Ciemat Agosto, Departamento de Medio Ambiente, 2009.
- WANG Q., CUI Y.-J., TANG A. M., DELAGE P., GATMIRI B., YE W.-M., Long-term effect of water chemistry on the swelling pressure of a bentonite-based material, Applied Clay Science, Volume 87, 2014.

# NAŠE BEZPEČNÁ BUDOUCNOST



**SÚRAO**

Správa úložišť radioaktivních odpadů

Dlážděná 6, 110 00 Praha 1

Tel.: 221 421 511, E-mail: [info@surao.cz](mailto:info@surao.cz)

[www.surao.cz](http://www.surao.cz)