

# Analýza FEPs úložiště VJP

Autoři: Pospíšková I., Vašíček R.,  
Havlová V. a kolektiv

Praha, 2022

**Tato zpráva byla zpracována v projektu financovaném SÚRAO. Presentovaná stanoviska a dosažené závěry jsou názory autora (autorů) a nemusí nutně představovat názory SÚRAO.**

**NÁZEV ZPRÁVY:** Analýza FEPs úložiště VJP

**NÁZEV PROJEKTU:** Výzkumná podpora pro bezpečnostní hodnocení technického řešení hlubinného úložiště – analýza FEPs

**IDENTIFIKACE V RÁMCI PROJEKTU:**

Dílčí zpráva

**ČÍSLO SMLOUVY:** SO 2021-007-02

Bibliografický zápis:

Pospíšková I., Vašíček R., Havlová V., Kobyłka D., Polák M., Vozár M., Fiedler F., Svoboda J., Kučerová M., Šťástka J., Černochová K., Večerník P., Dobrev D., Hofmanová E., Frýbort J., Bílý T., Rataj J., Frýbortová L, Milický M. (2022): Analýza FEPs úložiště VJP. MS SÚRAO 618/2022, Praha.

**ŘEŠITELÉ:**

AFRY CZ<sup>1</sup>, ČVUT Fakulta stavební<sup>2</sup>, ÚJV Řež<sup>3</sup>, ČVUT Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská<sup>4</sup>, Progeo<sup>5</sup>

**AUTORSKÝ KOLEKTIV:**

Pospíšková I.<sup>1</sup>, Vozár M. <sup>1</sup>, Fiedler F. <sup>1</sup>

Vašíček R.<sup>2</sup>, Svoboda J. <sup>2</sup>, Kučerová M. <sup>2</sup>, Šťástka J. <sup>2</sup>, Černochová K. <sup>2</sup>

Havlová V. <sup>3</sup>, Večerník P. <sup>3</sup>, Dobrev D.<sup>3</sup>, Hofmanová E.<sup>3</sup>

Kobyłka D.<sup>4</sup>, Frýbort J. <sup>4</sup>, Rataj J. <sup>4</sup>, Bílý T. <sup>4</sup>, Frýbortová L. <sup>4</sup>

Polák M.<sup>5</sup>, Milický M. <sup>5</sup>

**Antonín Vokál**

Manažer projektu SÚRAO

30.6.2022

**Ilona Pospíšková**

Manažer projektu AFRY CZ s.r.o.

30.6.2022

## Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>Přístup k nalezení a popisu FEP</b>	<b>14</b>
<b>3</b>	<b>Bezpečnostní funkce</b>	<b>17</b>
3.1	Legislativní požadavky a mezinárodní doporučení	17
3.2	Bezpečnostní funkce komponent úložiště	18
<b>4</b>	<b>Výchozí informace o referenčním technickém řešení úložiště VJP</b>	<b>21</b>
4.1	Koncepční řešení	21
4.2	Variantní řešení ukládání UOS s VJP	21
4.2.1	Vertikální způsob ukládání UOS s VJP	22
4.2.2	Horizontální způsob ukládání UOS s VJP	26
<b>5</b>	<b>Vstupní podmínky pro specifikaci FEP</b>	<b>29</b>
5.1	Specifikace systémových okrajových podmínek	29
5.2	Specifikace okrajových podmínek pro definici počátečního stavu	29
5.3	Možné externí ovlivnění inženýrských bariér z předprovozní a provozní fáze	30
<b>6</b>	<b>Vlastnosti úložiště VJP – počáteční stav</b>	<b>32</b>
6.1	Systém úložiště VJP	32
6.1.1	Hloubka ukládacího horizontu	32
6.1.2	Dispozice úložiště a využitelnost horninového bloku	36
6.2	Systém podzemních děl	38
6.2.1	Ukládací vrty a jejich orientace podle způsobu ukládání	39
6.2.2	Vlastnosti horniny ovlivněné ražbou	41
6.3	Tlumicí materiál /buffer (bentonit)	44
6.3.1	Výplň ukládacího vrtu (koncepční řešení)	44
6.3.2	Termofyzikální vlastnosti	46
6.3.3	Mechanické vlastnosti	48
6.3.4	Hydraulické vlastnosti	54
6.3.5	Chemické, mineralogické a strukturní vlastnosti	61
6.3.6	Charakteristiky bentonitu významné pro migraci radionuklidů	73
6.3.7	Charakter pórů	74
6.4	Výplňový materiál /backfill (bentonit)	76
6.4.1	Výplň přístupových prostor (konstrukční řešení)	76
6.4.2	Termofyzikální vlastnosti	78
6.4.3	Mechanické vlastnosti	78

6.4.4	Hydraulické vlastnosti.....	78
6.4.5	Chemické, mineralogické a strukturní vlastnosti .....	79
6.4.6	Charakteristiky bentonitu významné pro migraci radionuklidů .....	79
6.4.7	Charakter pórů .....	79
6.5	Konstrukční prvky úložiště.....	79
6.5.1	Konstrukční prvky úložiště (technické řešení).....	79
6.5.2	Materiálové a chemické složení .....	83
6.6	Rozhraní mezi jednotlivými komponentami .....	84
6.6.1	Rozhraní bentonit / hornina .....	84
6.6.2	Rozhraní buffer/backfill.....	85
6.6.3	Rozhraní zátka/ hornina .....	86
6.6.4	Rozhraní zátka/ backfill .....	87
<b>7</b>	<b>Procesy v úložišti VJP .....</b>	<b>88</b>
7.1	Tepelné procesy.....	88
7.1.1	Transport tepla (bentonitem/ bufferem) .....	88
7.2	Hydraulické procesy .....	90
7.2.1	Transport vody v bentonitu.....	90
7.2.2	Transport plynu v bentonitu .....	93
7.3	Mechanické procesy.....	96
7.3.1	Eroze bentonitu mechanická (sufoze) .....	96
7.3.2	Bobtnání bentonitu .....	97
7.3.3	Pohyb UOS v bufferu .....	100
7.4	Chemické procesy.....	101
7.4.1	Chemické a mineralogické změny (bentonit).....	102
7.4.2	Chemické rovnováhy a kinetiky .....	115
7.4.3	Chemická interakce a degradace (betonové konstrukce) .....	121
7.4.4	Změna fyzikálních vlastností (betonové konstrukce) .....	135
7.5	Mikrobiální procesy .....	137
7.6	Radiační procesy .....	139
7.7	Transportní procesy .....	140
7.7.1	Změna speciace radionuklidu v pórové vodě.....	142
7.7.2	Transport radionuklidů v kapalně fázi .....	144
7.7.3	Transport radionuklidů v plynné fázi.....	152
7.7.4	Transport koloidů v kapalně fázi.....	153
7.7.5	Transport korozních produktů.....	157

7.8	Procesy probíhající v celém systému úložiště .....	158
7.8.1	Tepelný vývoj úložiště .....	158
7.8.2	Proudění v EDZ.....	161
7.8.3	Transport radionuklidů.....	164
7.8.4	Ovlivnění dlouhodobými přírodními procesy.....	169
<b>8</b>	<b>Události.....</b>	<b>173</b>
8.1	Důsledky přírodních událostí .....	173
8.2	Důsledky činnosti člověka .....	174
<b>9</b>	<b>Zastoupení procesů v jednotlivých fázích vývoje úložiště.....</b>	<b>176</b>
<b>10</b>	<b>Dostupnost a relevance stávajících modelů pro predikci modelování HÚ</b>	<b>182</b>
<b>11</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>200</b>

## Seznam příloh:

Příloha 1 – Základní parametry a popisné vlastnosti bentonitu

Příloha 2 – Lokality testovaných českých bentonitů

## Seznam tabulek:

Tab. 1	Požadavky na inženýrské bariéry úložiště (s výjimkou UOS) k zajištění vrcholových bezpečnostních funkcí.....	19
Tab. 2:	Přehled výsledků swell indexu studovaných materiálů (ml/2 g) a výchozího bentonitu. (Vašíček a kol., 2019).....	52
Tab. 3	Výsledky silikátové analýzy pro české bentonity. Reference: Rokle – Křížová et al. (2010), B75 – Červinka a Hanuláková (2013), BAM – Červinka a Vejsadů (2015), BCV – Červinka et al. (2018) Hodnoty v závorce byly stanoveny samostatně a nejsou započítány do sumy silikátové analýzy. ....	62
Tab. 4	Výběr českých a zahraničních zpráv týkajících se modelování pórové vody v kompaktovaném bentonitu.....	66
Tab. 5	Zastoupení procesů v jednotlivých fázích vývoje úložiště – bentonit (buffer a backfill) .....	179
Tab. 6	Zastoupení procesů v jednotlivých fázích vývoje úložiště –konstrukční materiály ....	180
Tab. 7	Zastoupení procesů v jednotlivých fázích vývoje úložiště – transportní procesy .....	181
Tab. 8	Zastoupení procesů v jednotlivých fázích vývoje úložiště – procesy probíhající v celém systému.....	181
Tab. 9	Modelování procesů v bentonitu – dostupnost modelovacích nástrojů .....	183

Tab. 10 Modelování procesů v konstrukčních materiálech – dostupnost modelovacích nástrojů .....	191
Tab. 11 Modelování transportních procesů– dostupnost modelovacích nástrojů .....	193
Tab. 12 Modelování procesů v systému HÚ – dostupnost modelovacích nástrojů.....	197
Tab. 13: Specifické hmotnosti českých bentonitů. ....	205

## Seznam obrázků:

Obr. 1 Vertikální ukládání, mechanizovaná ražba stroji TBM – půdorysný pohled (zdroj: Špinka et al. 2018a) .....	23
Obr. 2 Vertikální ukládání UOS (VVER 440), mechanizovaná ražba stroji TBM – řez. (zdroj: Špinka et al. 2018a) .....	24
Obr. 3 Vertikální ukládání, konvenční způsob ražby – půdorysný pohled (zdroj: Špinka et al. 2018a).....	25
Obr. 4 Vertikální ukládání UOS (VVER 440), konvenční způsob ražby – řez. (zdroj: Špinka et al. 2018a) .....	26
Obr. 5 Horizontální ukládání, mechanizovaná ražba TBM, půdorys (zdroj: Špinka et al. 2018a) .....	27
Obr. 6 Projektové a bezpečnostní požadavky pro stanovení hloubky úložiště. Zdroj: (SKB 2009).....	34
Obr. 7 Švédský koncept KBS-3V (vlevo) a KBS-3H (vpravo). Zdroj: Posiva 2010. ....	39
Obr. 8 Procesy změn vlastností hornin s narušením masivu ražbou (Saiang 2008).....	42
Obr. 9 Mikrostruktura jílu ze skupiny smektitu (2:1) s vyznačeným mezivrstvím (Červinka et al. 2015).....	63
Obr. 10 Porovnání hodnot CEC u českých bentonitů a MX-80. Reference: B75 - Červinka a Hanuláková (2013), BAM - Červinka a Vejsadů (2015), BCV - Červinka et al. (2018) a MX-80 – Meier & Kahr (1999) .....	69
Obr. 11 Korelace mezi CEC a obsahem smektitu ve smíšených illit-smektitových jílech (Przelaskowska et al. 2015) .....	70
Obr. 12 Porovnání hodnot specifického povrchu českých bentonitů a MX-80. Reference: BAM, B75 – Červinka et al (2015), BCV - Červinka et al. (2018), MX-80 – Hausmannová et al. (2018) .....	72
Obr. 13 Schématické znázornění tortuozity (vlevo) a konstrikitivity póru (vpravo).....	75
Obr. 14 Klasifikace transportních procesů pro materiály s nízkou propustností s příkladem pro Opalinus Clay (Marshall 2008) .....	93
Obr. 15 Mechanismy bobtnání jílových minerálů ze skupiny smektitů. Vlevo je zobrazeno osmotické bobtnání, vpravo je zobrazeno bobtnání vlivem hydratace výměnných kationtů neboli krystalické bobtnání (Madsen a Müller-Vonmoos, 1989). ....	98
Obr. 16 Schématické shrnutí možných korozních procesů na rozhraní kov/bentonit (upraveno z Kaufhold et al. 2019).....	101

Obr. 17 Koncepční model vedoucí k destabilizaci dioktaedrických smektitů jako výsledek jejich interakce s kovovým Fe. Převzato z Lantenois et al. (2005) .....	105
Obr. 18 Schéma geochemických interakcí na rozhraní beton – bentonit v betonové zátce v horninovém prostředí.....	108
Obr. 19 Schéma vzniku minerálů na rozhraní cement – bentonit (Savage et al.2007) .....	109
Obr. 20 Schéma procesu koprecitace.....	116
Obr. 21 Porovnání hodnot pH v jednotlivých vrtech v čase. V roce 2017 bylo provedeno měření dvěma přístroji Gryf a Portavo a v následujících letech přístroji WTW a Portavo (Dobrev et al. 2020).....	119
Obr. 22: Schematické zobrazení vývoje pH v pórové vodě a rozpouštění minerálních fází při degradaci cementu. Hodnoty na osách pH a cykly výměny vody v pórech (respektive čas) jsou orientační a závisí na mnoha faktorech, jako je rychlost výměny pórů, agresivita prostředí a teplota (Ochs et al., 2015) .....	124
Obr. 23: Schéma interakce cementových materiálů a bentonitu – změny mineralogických, chemických a fyzikálních vlastností .....	127
Obr. 24 Rozdělení radionuklidů podle rozpustnosti v podmínkách, podmíněných interakcí cementu s vodou. (Červeně jsou uvedeny rozpustnosti nuklidů v mírně oxidačních podmínkách, modře v redukčních podmínkách, pokud se od oxidačních liší. Data jsou vybrána z tabulek uvedených ve studii (Čubová et al 2017). Použity byly PHREEQC a The Geochemist's Workbench®.).....	143
Obr. 25 Migrace radiokoloidů Sr (85-Srov.BC, nejvíce vpravo) drceným granitem v kolonovém uspořádání .....	154
Obr. 26: limitní teplota HB pro vertikální ukládání UOS .....	159
Obr. 27: limitní teplota HB pro horizontální ukládání UOS .....	160
Obr. 28 Vývoj teploty a saturace bentonitu v čase (Zdroj: Landold et al. 2009).....	176
Obr. 29 Porovnání hodnot meze tekutosti BCV 2017 s BaM 2014, B75 2010 a S65 2010. (Vašíček a kol., 2013; Červinka a kol., 2019).....	207
Obr. 30 Katalogový materiálový list Keramost a.s. pro BCV_PM_2020 0-8“ .....	209
Obr. 31 Hlavní ložiskové oblasti bentonitu (1 - České středohoří, 2 - Doupovské hory, 3 - Sokolovská pánev) a ložiska bentonitu ležící mimo ně (4 - Maršov u Tábora, 5 - Dněšice – Plzeňsko jih, 6 - Ivančice – Réna, 7 – Poštorná, 8 - Rybova Lhota; Dle Červinka et al. (2015) .....	210



## Seznam použitých zkratk:

BaM	bentonit a montmorillonit (pracovní název druhu bentonitu)
BCV	bentonit Černý vrch (pracovní název druhu bentonitu)
CEC	kationtová výměnná kapacita
ČR	Česká republika
DOPAS	Full Scale Demonstration of Plugs and Seals
EDZ/EdZ	Excavation Damaged Zone (EdZ, zóna narušení ražbou) a Excavation Disturbed Zone (EDZ, zóna poškození ražbou)
EPSP	Experimental pressure and sealing plug
EURAD	European Joint Programme on Radioactive Waste Management
FEP	Feature/vlastnost, Event/událost, Process/proces
IAEA	International Atomic Energy Agency
HÚ	hlubinné úložiště
JE	jaderná elektrárna
LPC	low pH cement/concrete
MPO	Ministerstvo průmyslu a obchodu
TBM	tunnel boring machine
RAO	radioaktivní odpad
SÚRAO	Správa úložišť radioaktivních odpadů
UOS	ukládací obalový soubor
VJP	vyhořelé jaderné palivo
WENRA	Western European Nuclear Regulators Association

## Vysvětlení pojmů:

### Analýza FEP

Identifikace a posouzení FEP (Feature/vlastnost, Event/událost, Process/proces), které mohou ovlivnit bezpečnost úložiště, a to jak v období jeho provozu, tak po uzavření úložiště.

### Bezpečnostní funkce

Bezpečnostní funkce je činnost systému, konstrukce, komponenty nebo jiné součásti jaderného zařízení, která je významná pro zajišťování jaderné bezpečnosti jaderného zařízení.

### Hlubinné úložiště

Úložiště radioaktivního odpadu umístěné stovky metrů pod zemským povrchem a určené pro ukládání vysokoaktivního odpadu (vyhl. 378/2016 Sb., § 2).

### Inženýrská bariéra

Člověkem vytvořená bariéra bránící transportu radionuklidů. Inženýrskou bariérou jsou například ukládací obalové soubory, na bázi bentonitu těsnící materiály, aj.

### Jaderná bezpečnost

Stav a schopnost jaderného zařízení a fyzických osob obsluhujících jaderné zařízení zabránit nekontrolovatelnému rozvoji štěpné řetězové reakce nebo úniku radioaktivních látek anebo ionizujícího záření do životního prostředí a omezit následky nehod.

**Komponenta**

Část systému tvořená obvykle fyzickými prvky se stejnými, nebo velmi blízkými vlastnostmi (fyzikálními, chemickými, konstrukčními aj.), které je zároveň odlišují od jiných částí systému. Jedná se např. o konstrukční prvky úložiště nebo o horninové prostředí.

**Proces (Process)**

Přírodní nebo člověkem způsobený dlouhodobý vliv, který způsobuje postupnou změnu vlastností komponent a/nebo úložného systému. Jedná se např. o chemické procesy v materiálech inženýrských bariér.

**Radioaktivní odpad**

Věc, která je radioaktivní látkou nebo předmětem nebo zařízením ji obsahujícím nebo jí kontaminovaným, pro kterou se nepředpokládá další využití a která nesplňuje podmínky stanovené zákonem č. 263/2016 Sb. pro uvolňování radioaktivní látky z pracoviště.

**Událost (Event)**

Přírodní nebo člověkem způsobený krátkodobý vliv nebo jev, který může ovlivnit vlastnosti komponent a/nebo úložného systému. Jedná se např. o zemětřesení nebo pád obalového souboru.

**Ukládání RAO**

Trvalé umístění RAO do prostorů, objektů nebo zařízení bez úmyslu jejich dalšího přemístění.

**Vlastnost (Feature)**

Část úložného systému, její stav nebo charakteristika, která má potenciál ovlivnit chování systému z pohledu zajištění bezpečnostních funkcí. Jedná se např. konstrukční prvky úložiště, jejich materiálové složení nebo horninové prostředí a charakteristické vlastnosti, teplotu horninového prostředí.

## Abstrakt

Práce je zaměřena na specifikaci FEPs hlubinného úložiště. Pro hlubší pochopení vlastností, událostí a procesů byl systém úložiště rozdělen na čtyři dílčí celky, rozpracované v samostatných zprávách:

- UOS s VJP;
- Úložiště VJP (důlní dílo a systém inženýrských bariér bez UOS s VJP);
- Horninové prostředí;
- Biosféra.

Tento dokument je zaměřen na identifikaci a popsání vlastností, událostí a procesů pro úložiště VJP z pohledu inženýrské stavby – důlního díla, včetně ukládacích prostor, a inženýrských bariér, které jsou použity při konstrukci hlubinného úložiště, při ukládání UOS s VJP, a při uzavírání jednotlivých ukládacích prostor a následně celého úložiště.

Nalezené vlastnosti, události a procesy (FEP) a jejich znalost budou využity pro specifikaci scénáře normálního vývoje úložiště a možné alternativní scénáře. Tyto scénáře budou využity pro hodnocení dlouhodobé bezpečnosti.

Analýza je provedena pro období vývoje úložiště do 1 miliónu let.

## Klíčová slova

Hlubinné úložiště, FEP, vlastnost, událost proces, inženýrské bariéry, tlumící a výplňový materiál (buffer, backfill).

## Abstract

FEPs of the DGR system are specified and developed. For a deeper understanding of features, events and processes, the repository system was divided into four sub-units, developed in separate reports:

- disposal waste package with SNF;
- SNF repository (mining work and engineering barrier system excluding waste package with SNF);
- Rock environment;
- Biosphere.

This document is focused on the identification and description of features, events and processes of the DGR from the point of view of civil engineering – openings (access and operation tunnels, disposal shafts and areas), and engineering barriers, which are used during the DGR construction, disposing of waste packages with SNF, and closure of individual disposal area and subsequently the operational and access tunnels.

The features, events, and processes (FEP) identified, and their knowledge will be used to specify the normal scenarios and possible alternative scenarios of the DGR evolution in time. These scenarios will be used for long-term safety assessment.

## Keywords

Deep geological repository, FEP, feature, event, process, engineered barrier system, buffer, backfill.

# 1 Úvod

Uzavření hlubinného úložiště a jeho stav v době uzavření je důležitým mezníkem pro hodnocení dlouhodobé bezpečnosti. Budoucí stav úložiště závisí na

- počátečním stavu inženýrských i přírodních bariér,
- procesech probíhajících v úložišti v závislosti na podmínkách, a jejich vývoji v čase,
- externích vlivech, které mohou ovlivnit normální (předpokládaný) vývoj úložiště.

Proto je důležité nalézt vlastnosti, které jsou důležité pro zajištění bezpečnostních funkcí úložiště, popsat jejich vstupní charakteristiky a jejich vývoj v čase; nalézt procesy, které mohou iniciovat změny vlastností nebo být jejich důsledkem; a identifikovat události, které jsou příčinou nebo následkem změny podmínek v úložišti.

Vlastnosti, události a procesy je třeba nalézt pro celý systém úložiště. Nicméně k jejich hlubšímu pochopení je účelné rozdělit systém na části, které budou tvořit logické celky. Následně je možné tyto celky sesadit a vyhodnotit chování celého systému.

Systém úložiště rozdělen na čtyři dílčí celky, rozpracované v samostatných zprávách:

- UOS s VJP (TZ 617/2022)
- Úložiště VJP – důlní dílo a systém inženýrských bariér bez UOS s VJP (TZ 618/2022);
- Horninové prostředí (TZ 619/2022);
- Biosféra (TZ 620/2022).

**Specifikace a popis vlastností, událostí a procesů se v této zprávě týká inženýrské stavby – důlního díla, včetně ukládacích prostor, a inženýrských bariér, které jsou použity při konstrukci hlubinného úložiště.**

S ohledem na to, že informace jsou zpracovány v samostatných zprávách, může dojít k přesahu informací. Zprávy jsou zpracovány tak, aby pro danou oblast byly samonosné. Až budou informace kompilovány do jedné zprávy, musí být tato okolnost při práci zohledněna.

Nalezené vlastnosti, události a procesy (FEP) a jejich znalost budou využity pro specifikaci scénáře normálního vývoje úložiště a možné alternativní scénáře. Tyto scénáře budou využity pro hodnocení dlouhodobé bezpečnosti.

Analýza je provedena pro FEP relevantní pro úložiště VJP pro období vývoje úložiště do 1 miliónu let.

## 2 Přístup k nalezení a popisu FEP

Vyhláška č. 377/2016 Sb., § 9, odst.6 říká, že pro zpracování bezpečnostního hodnocení je třeba identifikovat vlastnosti, události a procesy, které mohou narušit normální vývoj úložiště radioaktivního odpadu a mohou mít vliv na jeho bezpečnost.

Pro definici pojmů vlastností, událostí a procesů lze využít dokumenty OECD/NEA (2019), případně NRC (2003).

V souladu s definicemi z těchto dokumentů se

- **vlastností (Feature)** rozumí komponenta nebo její část, stav nebo charakteristika, která má potenciál ovlivnit chování systému z pohledu zajištění bezpečnostních funkcí. Jedná se např. konstrukční prvky úložiště, jejich materiálové složení nebo horninové prostředí a charakteristické vlastnosti;
- **událostí (Event)** rozumí přírodní nebo člověkem způsobený krátkodobý vliv nebo jev, který může ovlivnit vlastnosti komponent a/nebo úložného systému. Jedná se např. o zemětřesení nebo pád obalového souboru;
- **procesem (Process)** rozumí přírodní nebo člověkem způsobený dlouhodobý vliv, který způsobuje postupnou změnu vlastností komponent a/nebo úložného systému. Jedná se např. o chemické procesy v materiálech inženýrských bariér.

Pro nalezení a specifikaci možných FEP je tedy třeba postupovat v několika krocích:

- Definovat bezpečnostní funkce a specifikovat způsob, jak jsou plněny.
- Definovat komponenty úložiště důležité z pohledu zajištění bezpečnostních funkcí.
- Identifikovat a specifikovat množinu všech možných FEP:
  - Vlastnosti komponent úložiště důležitých z pohledu zajištění bezpečnostních funkcí.
  - Iniciační vlivy (procesy, události).
  - Změny vlastností vlivem působících iniciačních vlivů a procesů v úložišti (události, procesy).
  - Mechanismus uvolnění radionuklidů a transport radionuklidů do životního prostředí (procesy).
- Screening – posouzení úplnosti.

Tímto postupem jsou nalezeny všechny možné FEP, které je třeba vzít v úvahu pro hodnocení bezpečnosti úložiště, ale které samy o sobě ještě nevytvářejí o hodnocení bezpečnosti úložiště.

FEP jsou základem pro definici a popis scénářů pro hodnocení bezpečnosti. Pro nalezení a specifikaci scénářů je třeba s FEP ještě dále pracovat:

- Je třeba vyhodnotit relevanci FEP pro bezpečnostní hodnocení HÚ, tedy zda FEP může vstupovat do hodnocení úložiště; především zda v místních podmínkách může dojít k posuzované události (např. zalednění v České republice v časovém horizontu bezpečnostního hodnocení). Nerelevantní FEP je možné pro další práci vyloučit.
- Existuje-li možnost, že FEP může nastat, je třeba zhodnotit pravděpodobnost, s jakou FEP nastane. Důležité je předběžně posoudit i možný důsledek FEP.

Kritériem pro vyloučení FEP ze sestavování scénářů pro bezpečnostní hodnocení může být například velmi nízká pravděpodobnost výskytu jevu během sledovaného období, nebo velmi malý (podlimitní) důsledek při nastalém jevu.

- Vyhodnotit vzájemné vazby relevantních FEP a na jejich základě popsat možné scénáře pro bezpečnostní hodnocení.

Velmi důležitým krokem je screening a posouzení úplnosti, a to především s pracemi zahraničních organizací, které jsou v procesu přípravy hlubinného úložiště dále než Česká republika. Jde především o práce IAEA (2019), SKB nebo Posiva, především (SKB 2010a, b, c, d, 2014 a, b, 2015 a 2019 a, b, c), (Posiva 2014, 2017a, b).

Ačkoliv byla provedena poměrně podrobná rešerše zahraničního přístupu a identifikovaných FEP, vždy byla hodnocena i jejich relevance pro český koncept. Konečný výčet FEP a jejich popis v této zprávě je vztažen na technické řešení a podmínky českého referenčního projektu (Holub a kol 1999, Pospíšková a kol. 2011), který je založen na několika základních předpokladech:

- Úložiště bude vybudováno v krystalinických horninách;
- Ukládací horizont je umístěn cca 500 m pod úroveň terénu;
- Úložiště bude důlní dílo se systémem přístupových chodeb a úložných vrtů;
- Tlumicí materiál (buffer) i výplňový materiál (backfill) bude bentonit české provenience;
- Ukládací obalový soubor pro VJP bude dvouplášťový, s vnějším obalem z uhlíkové oceli a vnitřním z nerezové oceli;
- Uložený inventář bude nepřepřacované VJP.

#### Reference:

HOLUB J. A KOL (1999): Referenční projekt povrchových i podzemních systémů HÚ v hostitelském prostředí granitových hornin v dohodnuté skladbě úvodního projektu a hloubce projektové studie, EGP Invest spol. s r.o., Praha.

NRC (2003): Yucca Mountain Review Plan, Final Report. NUREG-1804, Revision 2. Washington, D.C.: U.S. Nuclear Regulatory Commission, 2003.

OECD/NEA (2019): International Features, Events and Processes (IFEP) List for the Geological Disposal of Radioactive Waste. Version 3.0. NEA/RWM/R(2019)1. OECD Nuclear Energy Agency, Paris, France, 2019.

POSIVA (2014): Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto – FEP Screening and Processing. Posiva 2014-03. Posiva Oy. Finland.

POSIVA (2017A): Safety Evaluation for a KBS-3H Spent Nuclear Fuel Repository at Olkiluoto – Description of the Disposal System. Posiva 2016-04. Posiva Oy. Finland. ISBN: 978-951-652-251-0, ISSN: 2343-4740

POSIVA (2017B): Safety Evaluation for a KBS-3H Spent Nuclear Fuel Repository at Olkiluoto – Features, Events, Processes. Posiva 2016-03. Posiva Oy. Finland.

POSPÍŠKOVÁ, I. A KOL. (2011): Aktualizace referenčního projektu hlubinného úložiště radioaktivních odpadů v hypotetické lokalitě, Závěrečná zpráva. ÚJV Řež a.s. -Divize Energoprojekt. Praha.

- SKB (2010A): FEP report for the safety assessment SR-Site, SKB TR-10-45, Svensk Kärnbränslehantering AB. Sweden.
- SKB (2010B): Fuel canister process report for the safety assessment SR-Site, SKB TR-10-46 Svensk Kärnbränslehantering AB. Sweden.
- SKB (2010C): Buffer, backfill and closure process report for the safety assessment SR-Site, SKB TR-10-47 Svensk Kärnbränslehantering AB. Sweden.
- SKB (2010D): Data report for the safety assessment SR-Site, SKB TR-10-52, Svensk Kärnbränslehantering AB. Sweden.
- SKB (2014A): Waste form and packaging process report for the safety assessment SR-PSU, SKB TR-14-03 Svensk Kärnbränslehantering AB. Sweden.
- SKB (2014B): Engineered Barrier Process Report for the Safety Assessment SR-PSU, SKB TR-14-04 Svensk Kärnbränslehantering AB. Sweden.
- SKB (2014C): FEP report for the safety assessment SR-PSU, SKB TR-14-07, Svensk Kärnbränslehantering AB. Sweden.
- SKB (2015): Safety analysis for SFR Long-term safety. Main report for the safety assessment SR-PSU, SKB TR-14-01, Svensk Kärnbränslehantering AB. Sweden.
- SKB (2019A): Post-closure safety for a proposed repository concept for SFL. Main report for the safety assessment SE-FSL, SKB TR-19-01, Svensk Kärnbränslehantering AB. Sweden.
- SKB (2019B): FEP report for the safety assessment SE-FSL, SKB TR-19-02, Svensk Kärnbränslehantering AB. Sweden.
- SKB (2019C): Initial state for the repository for the safety evaluation SE-SFL, SKB TR-19-03, Svensk Kärnbränslehantering AB. Sweden.



## 3 Bezpečnostní funkce

### 3.1 Legislativní požadavky a mezinárodní doporučení

Úložiště radioaktivního odpadu podléhá dikci zákona č.263/2016 Sb. V § 5, odst. 1 je uvedeno, že *Každý, kdo využívá jadernou energii nebo vykonává činnosti v rámci expozičních situací, je povinen a) předcházet radiační mimořádné události, a nastane-li, zajistit dodržení postupů pro zvládnutí radiační mimořádné události a omezit její následky, b) zajistit bezpečné vykonávání těchto činností a ochranu fyzické osoby a životního prostředí před účinky ionizujícího záření a c) postupovat tak, aby riziko ohrožení fyzické osoby a životního prostředí bylo tak nízké, jakého lze rozumně dosáhnout při zohlednění současné úrovně vědy a techniky a všech hospodářských a společenských hledisek.*

Paragraf 45, bod (3) zákona č.263/2016 Sb. říká, že: *Jaderné zařízení bez jaderného reaktoru musí od zahájení výstavby až do vyřazení z provozu nebo do doby stanovené v dokumentaci pro povolenou činnost v případě úložiště radioaktivního odpadu: a) fyzikálně znemožnit vznik kritického a nadkritického stavu, b) zajišťovat odvod vytvářeného tepla a c) zajistit stínění a zabránit úniku radioaktivní látky a šíření ionizujícího záření do životního prostředí.*

Bezpečnostní funkce úložiště a jeho jednotlivých komponent pro zajištění dlouhodobé bezpečnosti po uzavření úložiště vychází z požadavku § 18, odst. 1 vyhlášky č. 378/2016 Sb.: *Izolační a zadržné vlastnosti horninového prostředí v kombinaci s uměle vytvořenými překážkami zajišťují, že uložený radioaktivní odpad nezpůsobí při očekávaném vývoji hlubinného úložiště větší ozáření reprezentativní osoby, než je dáno dávkovou optimalizační mezí. Pro obyvatelstvo je optimalizační mez specifikována v § 82 odst. 1) atomového zákona na 0,25 mSv za rok.*

Definici uměle vytvořených překážek pak lze nalézt v § 5, bodu (3) vyhl. č. 329/2017 Sb.: *Funkci fyzických bezpečnostních bariér musí v případě jaderných zařízení bez jaderného reaktoru zajišťovat a) obalové soubory, nebo b) jiné systémy, konstrukce a komponenty pro 1. výrobu, zpracování a skladování jaderného materiálu nebo jiné radioaktivní látky a manipulaci s nimi, nebo 2. zpracování a ukládání radioaktivního odpadu.*

Z výše uvedeného lze vyvodit, že základní bezpečnostní funkce úložiště radioaktivního odpadu jsou definovány následujícími požadavky:

- fyzikálně znemožnit vznik kritického a nadkritického stavu;
- zajišťovat odvod vytvářeného tepla;
- zajistit stínění a zabránit úniku radioaktivní látky a šíření ionizujícího záření do životního prostředí;
- izolovat a zadržet radioaktivní odpad tak, aby nezpůsobil větší ozáření reprezentativní osoby, než je dáno optimalizační mezí.

Bezpečnostní funkce byly rovněž formulovány v dokumentech WENRA a IAEA, ze kterých vychází evropská i česká legislativa. Bezpečnostní funkce určené přímo pro úložiště radioaktivních odpadů byly formulovány v dokumentu (WENRA 2014):

- Control of the exposure of people and the environment (Kontrola expozice osob a životního prostředí);

- Containment and isolation of the radioactive material (Zadržení a izolace radioaktivního materiálu);
- Control of subcriticality (Kontrola podkritičnosti);
- Heat or gas removal, if applicable (Odvod tepla nebo plynu, pokud je to relevantní).

V dokumentu (IAEA 2011) jsou bezpečnostní funkce pro úložiště formulovány následovně:

- To contain the waste (Zadržet odpad);
- To isolate the waste from the accessible biosphere and to reduce substantially the likelihood of, and all possible consequences of, inadvertent human intrusion into the waste (Izolovat odpad od okolního životního prostředí a podstatně snížit pravděpodobnost a důsledky neúmyslného vniknutí člověka k radioaktivnímu odpadu);
- To inhibit, reduce and delay the migration of radionuclide at any time from the waste to the accessible biosphere (Zabránit, omezit a zpomalit migraci radionuklidů z odpadu do okolního životního prostředí);
- To ensure that the amounts of radionuclides reaching the accessible biosphere due to any migration from the disposal facility are such that possible radiological consequences are acceptably low at all times. (Zajistit, aby množství radionuklidů, které se dostanou do okolního životního prostředí, bylo vždy přijatelně malé).

Na základě této analýzy českých legislativních předpisů a mezinárodních doporučení (WENRA, IAEA) je možno vrcholové bezpečnostní funkce a požadavky pro úložiště radioaktivního odpadu shrnout následovně:

- 1) Fyzikálně znemožnit vznik kritického a nadkritického stavu;
- 2) Zajišťovat odvod vytvářeného tepla;
- 3) Zajišťovat odvod vytvářených plynů;
- 4) Zadržet radioaktivní odpad v obalovém souboru;
- 5) Zpomalit migraci radionuklidů od radioaktivního odpadu do životního prostředí;
- 6) Izolovat odpad od okolního životního prostředí, událostí a procesů probíhajících na povrchu, a podstatně snížit pravděpodobnost a důsledky neúmyslného vniknutí člověka k radioaktivnímu odpadu;
- 7) Kontrolovat expozici člověka a životního prostředí.

### 3.2 Bezpečnostní funkce komponent úložiště

Zajistit bezpečnost (tedy plnění výše definovaných bezpečnostních funkcí) musí celý systém úložiště, tedy celý soubor přírodních a inženýrských bariér (obalové soubory, tlumící a výplňový materiál, konstrukční prvky a horninové prostředí).

Ačkoliv bezpečnostní funkci plní celý systém, je dobré si pro jednotlivé komponenty definovat požadavky, kterými má komponenta přispět k zajištění bezpečnostních funkcí. Tyto požadavky jsou vodítkem pro specifikaci technických parametrů jednotlivých komponent.

Tato dílčí zpráva se věnuje nejdůležitější inženýrské bariéře, ukládacímu obalovému souboru.

V následující tabulce jsou uvedeny předběžné podpůrné požadavky k zajištění vrcholových bezpečnostních funkcí. Tyto požadavky jsou uvedeny pouze pro obalový soubor, neboť jen ten je předmětem zprávy.

Bezpečnostní funkce jsou důležitým vstupem pro identifikaci a popis FEP, V daný moment nemusí být výčet úplný, neboť z popisu FEP mohou vyplynout další, které mohou být po zvážení doplněny nebo přeformulovány.

Tab. 1 Požadavky na inženýrské bariéry úložiště (s výjimkou UOS) k zajištění vrcholových bezpečnostních funkcí

1. Fyzikálně znemožnit vznik kritického a nadkritického stavu	
2. Zajišťovat odvod vytvářeného tepla	
	Materiálové vlastnosti tlumícího a výplňového materiálu a ostatních konstrukčních prvků musí zabránit kumulaci generovaného tepla a negativnímu ovlivnění uloženého VJP a retardačních schopností inženýrských bariér.
3. Zajišťovat odvod vytvářených plynů	
	Tlumící a výplňový materiál i musí dostatečně umožnit odvod vznikajících plynů a zamezit nárůstu tlaku v systému inženýrských bariér
4. Zadržet radioaktivní odpad v obalovém souboru	
	Tlumící materiál musí bránit mechanickému poškození UOS
	Tlumící materiál musí omezit přístup vody a agresivních látek a zpomalit degradaci UOS
	Tlumící materiál musí být chemicky kompatibilní s materiálem UOS a nesmí urychlit degradaci materiálu UOS
	Tlumící materiál musí tlumit chemické změny v okolí UOS
	Tlumící materiál musí zamezit rozvoji mikrobiální koroze na minimální možnou míru (zabránit mikrobiální korozi na nejvyšší možnou míru)
5. Zpomalit migraci radionuklidů od radioaktivního odpadu do životního prostředí	
	Tlumící a výplňový materiál musí tlumit chemické změny a zachovávat retardační vlastnosti po dostatečně dlouhou dobu
	Tlumící a výplňový materiál musí svými vlastnostmi zajistit difúzní transport radionuklidů po dostatečně dlouhou dobu
	Nesmí dojít ke ztrátě retardačních vlastností použitého tlumícího materiálu vlivem působení korozních produktů UOS nebo tepelnou degradací
6. Izolovat odpad od okolního životního prostředí, událostí a procesů probíhajících na povrchu, a podstatně snížit pravděpodobnost a důsledky neúmyslného vniknutí člověka k radioaktivnímu odpadu	
	Použitý materiál inženýrských bariér musí omezit přístup vody a agresivních látek
	Použitý materiál inženýrských bariér musí dostatečně odolávat chemické a mechanické erozi v hlubinném úložišti
	Použitý materiál musí zamezit vzniku preferenčních cest

7. Kontrolovat expozici člověka a životního prostředí	
	<i>Uvedená funkce je kontrolou zajištění vrcholových bezpečnostních funkcí 1-6.</i>

**Reference:**

IAEA (2011): Disposal of radioactive waste, specific safety requirements, SSR-5, Vienna 2011.

WENRA (2014): WGWD Report: Waste And Spent Fuel Storage Safety Reference Levels, SRL DI-38, 28 April 2014.

## 4 Výchozí informace o referenčním technickém řešení úložiště VJP

### 4.1 Koncepční řešení

Základní strategií ČR pro zneškodnění VJP dle státní platné Koncepce nakládání s VJP a RAO (MPO 2015) je **přímé uložení do hlubinného úložiště**, které bude připraveno k provozu do roku 2065. Do zprovoznění hlubinného úložiště budou nepřepracované VJP a RAO nepřijatelné do přípovrchových úložišť skladovány u původců nebo v zařízeních SÚRAO.

Bezpečnost hlubinného úložiště je založeno na multibariérovém principu, který je tvořen systémem inženýrských bariér a hostitelskou horninou.

Inženýrské bariéry jsou tvořeny ukládacími obalovými soubory, tlumící bariérou v úložných vrtech, výplňovým materiálem přístupových chodeb a ostatními konstrukčními prvky.

**Ukládací obalový soubor** (UOS) se v referenčním řešení uvažuje jako dvouplášťový, který se skládá z vnějšího obalu (uhlíková ocel) a vnitřního pouzdra (nerezová ocel), ve variantách pro jeden nebo více palivových souborů.

**Tlumící bariéra** (buffer) je materiál v ukládacím vrtu okolo UOS. Předpokládá se použít bentonit.

**Výplňový materiál** (backfill) je materiál použitý pro zaplnění volných prostor úložiště. Na úložném horizontu se předpokládá použít bentonit.

Bentonity jsou dominantně typu Na či Ca/Mg. V ČR jsou těženy pouze Mg-Ca bentonity. Referenční řešení blíže nespecifikuje typ či další požadavky na bentonit.

Mezi **konstrukční prvky** lze zařadit mechanické zátky, kterými budou uzavřeny ukládací vrty, sekce, přístupové chodby. Jejich konstrukce bude odpovídat místu, kde budou instalovány a požadované funkci. Dále lze mezi konstrukční prvky zařadit injektáže, svorníky, ostění, výztuže, drenáže, počvy. Konstrukční prvky zastávají svou funkci především v období provozu, a nelze je zahrnout mezi bariéry důležité z hlediska dlouhodobé bezpečnosti. Pokud nebudou s ukončením provozu odstraněny, je však nutné dbát na jejich materiálové složení a jeho kompatibilitu s materiály, které bezpečnostní funkci mají.

Betonové konstrukce na ukládacím horizontu se předpokládají z betonu se sníženým pH.

### 4.2 Variantní řešení ukládání UOS s VJP

Koncepční, referenční projekt je rozpracován pro dva možné způsoby uložení UOS s VJP – vertikální (Holub a kol. 1999) a horizontální (Pospíšková a kol. 2011). O preferovaném způsobu nebylo prozatím rozhodnuto.

Studie proveditelnosti pro oba způsoby ukládání byly zpracovány variantně nejen z pohledu ukládání UOS s VJP, ale i z pohledu přípravy přístupových chodeb a ukládacích prostor. Zvažována byla mechanizovaná ražba stroji TBM a konvenční způsob ražby.

Ukládací vrty jsou vždy zrealizovány mechanizovanou ražbou, rozdílné jsou způsoby konstrukce zavážecích a přístupových chodeb. Jeden i druhý způsob má své výhody i nevýhody, zpracování mělo posloužit k jejich porovnání. (Bureš et al. 2018, Špinka et al. 2018a, Špinka et al 2018b)

#### 4.2.1 Vertikální způsob ukládání UOS s VJP

UOS s VJP se předpokládají uložit do svislých vrtů realizovaných ze zavážecích chodeb. V každém svislém vrtu bude uložen jeden UOS. Ukládací vertikální vrty průměru 1,8 m jsou raženy svisle z horizontální pracovní roviny ze zavážecí chodby.

Délka ukládacího vrtu je dána rozměry jednotlivých UOS, velikostmi jednotlivých prvků inženýrské bariéry a velikosti zóny ovlivnění ražbou zavážecí chodby.

Volný prostor ve svislém vrtu, který vznikne po uložení UOS je vyplněn tlumícím materiálem (bufferem). Pro své vlastnosti je navržen bentonit. Může být ve formě bloků nebo pelet.

Zaplněné ukládací vrty budou u jeho ústí opatřeny zátkou. Zátkou je vyplněná část vertikálního vrtu od ukládaného UOS s VJP po zpevněné dno zavážecí chodby. Doposud se pracovalo s předpokladem, že zátky budou betonové. Nicméně s ohledem na zkušenosti z jiných projektů lze předpokládat, že tento koncept bude opuštěn, a vrty budou uzavírány pouze bentonitem. Popis FEP již vychází z tohoto předpokladu.

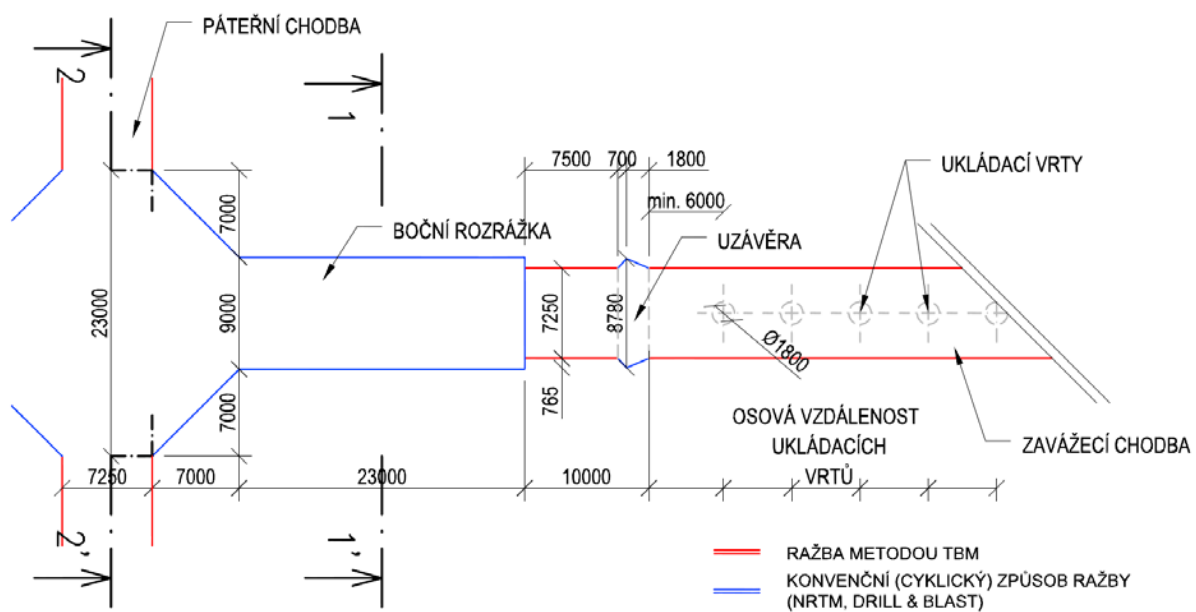
Po zaplnění všech vrtů v zavážecí chodbě bude chodba zavezena výplňovým materiálem (backfillem), použit bude bentonit. Na koncích chodeb se předpokládá vybudovat uzávěry – betonové příčky.

#### **Mechanizovaná ražba stroji TBM**

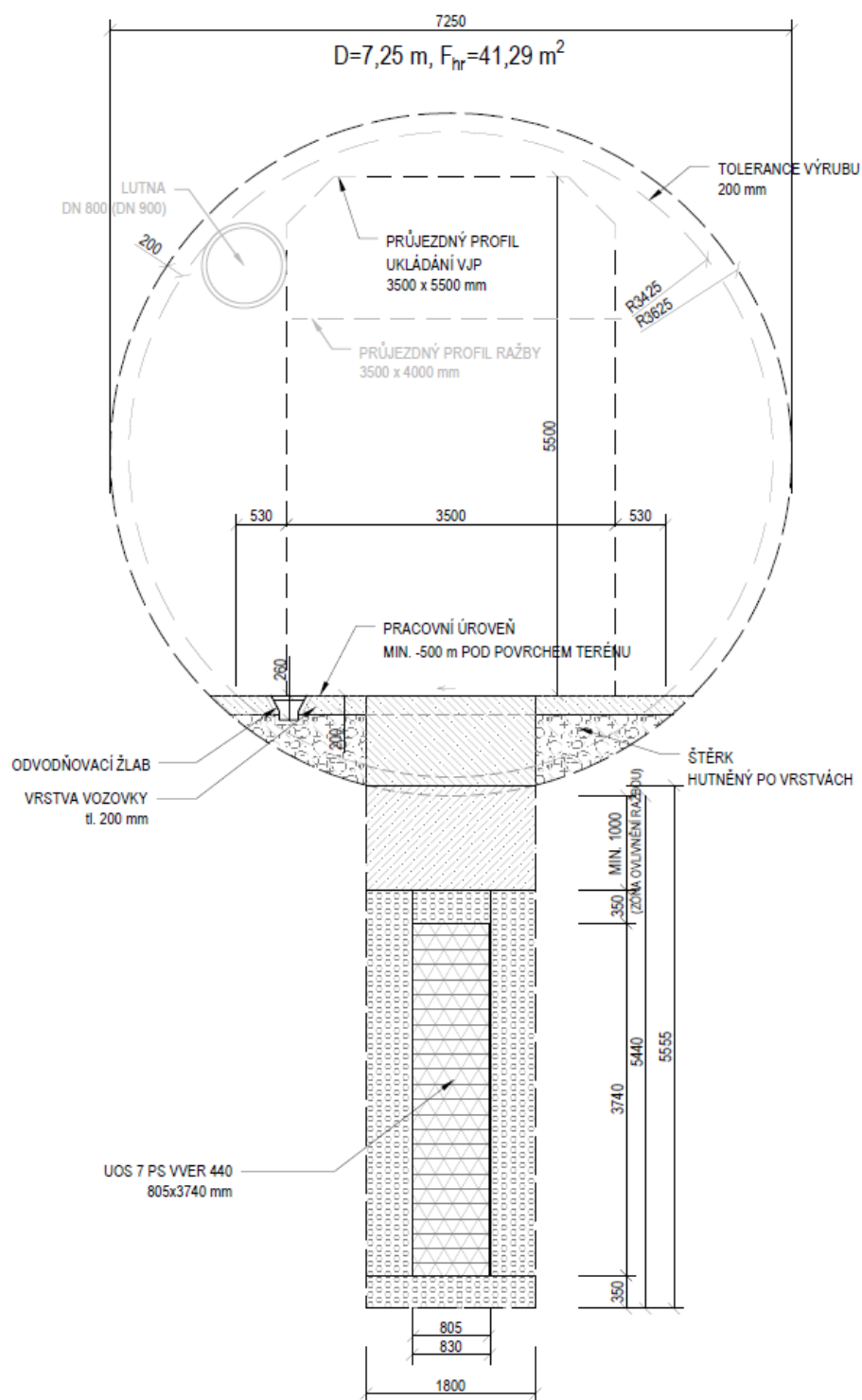
Zavážecí chodba bude ražena plnoprofilovými razicími stroji TBM a bude realizována převážně v kolmém směru od páteřních chodeb z tzv. bočních rozrážek. Tyto prostory slouží k osazení razicího stroje TBM, instalaci přidružené technologie a umožňují bezproblémovou manipulaci.

Zavážecí chodba má kruhový průřez o raženém průměru 7,25m. Vertikální ukládací vrt má v příčném řezu kruhový průřez o průměru 1,8m.

Osová vzdálenost mezi UOS je 5,0 m (VVER-440), 7,5 m (VVER-1000) a 13,25 m pro palivo z NJZ. Uvedené osově vzdálenosti mezi UOS jsou stanoveny s ohledem na tepelné výpočty a ražbou ovlivněné zóny v okolí důlních děl (zavážecí chodby, ukládací vrty). Zavážecí chodba je ukončena uzávěrou.



Obr. 1 Vertikální ukládání, mechanizovaná ražba stroji TBM – půdorysný pohled (zdroj: Špinka et al. 2018a)



Obr. 2 Vertikální ukládání UOS (VVER 440), mechanizovaná ražba stroji TBM – řez. (zdroj: Špinka et al. 2018a)

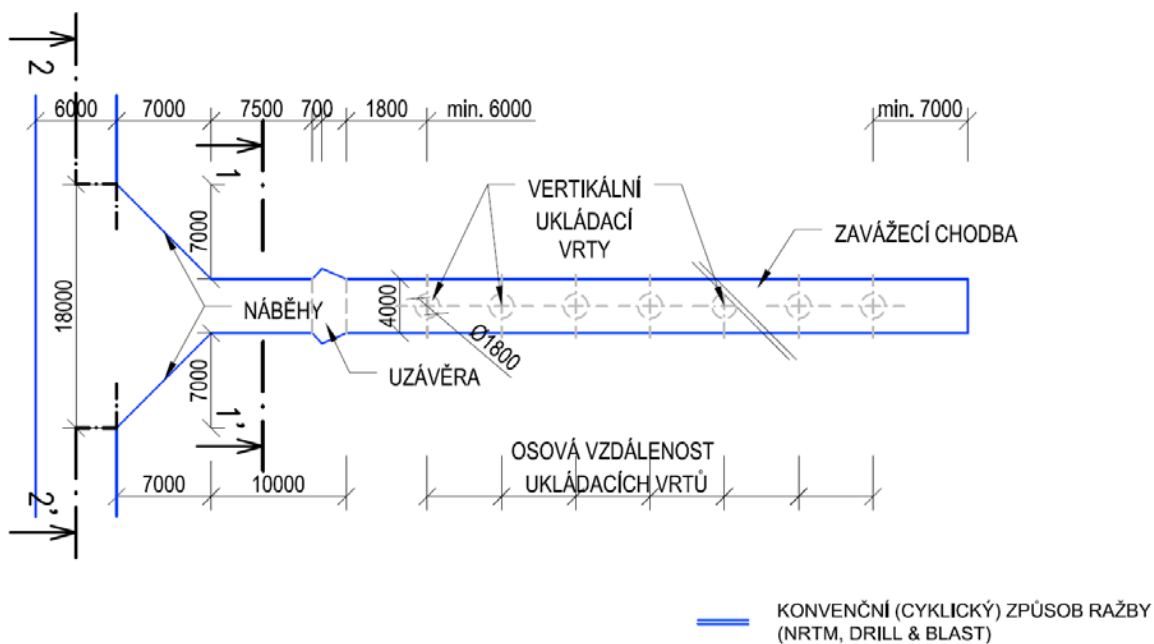


### Konvenční způsob ražby

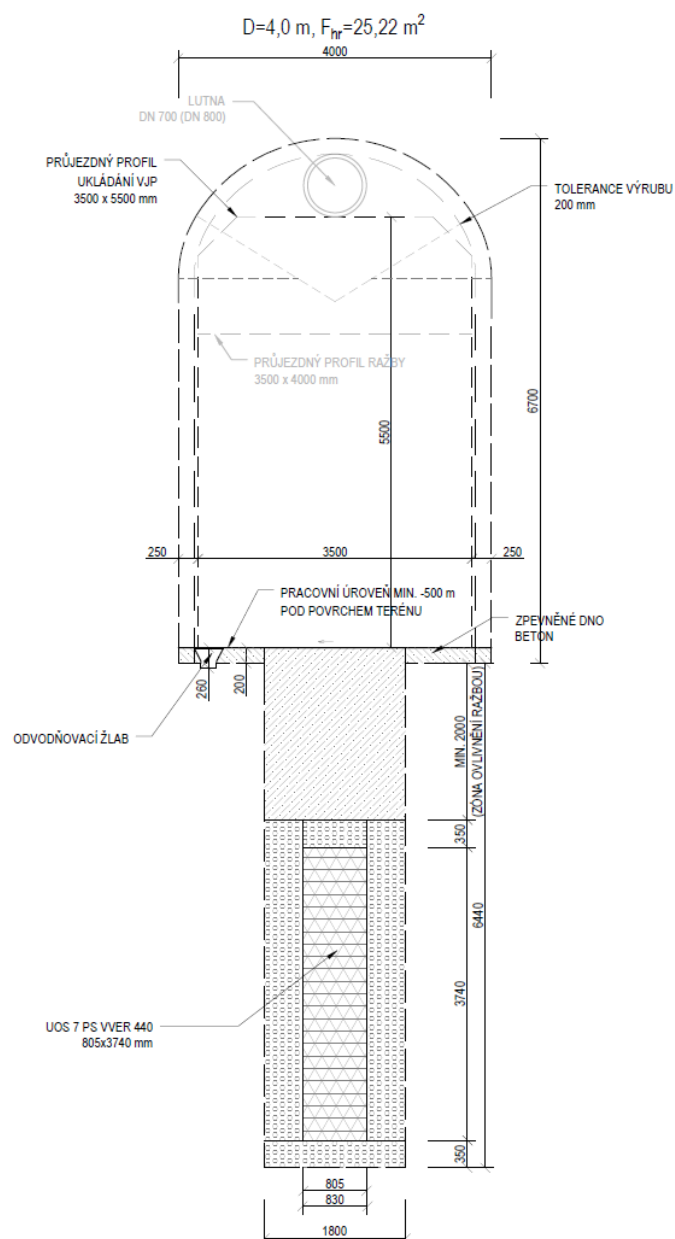
Zavážecí chodba je ražena konvenčním způsobem. Zavážecí chodba má klenutý průřez se svislými stěnami, raženou šířku 4,0 m a výšku 6,7 m.

Ražený průměr a tvar příčného profilu vertikálního ukládacího vrtu je stejný jako ve variantě ražbou TBM. Není nutno realizovat boční rozrážku.

Osové vzdálenosti vertikálních ukládacích vrtů jsou stejné jako u mechanizované ražby stroji TBM.



Obr. 3 Vertikální ukládání, konvenční způsob ražby – půdorysný pohled (zdroj: Špinka et al. 2018a)



Obr. 4 Vertikální ukládání UOS (VVER 440), konvenční způsob ražby – řez. (zdroj: Špínka et al. 2018a)

## 4.2.2 Horizontální způsob ukládání UOS s VJP

UOS s VJP se předpokládá uložit do subhorizontálních vrtů, realizovaných z páteřních chodeb. UOS budou uloženy za sebou po celé délce vrtu. Délka ukládacího vrtu je dána možnostmi horninového bloku.

Volný prostor ve vrtu, který po uložení UOS bude vyplňován tlumícím materiálem (bufferem) postupně, po zavedení každého UOS. Jako tlumící materiál se předpokládá použít bentonit ve formě pelet.

Po zavezení celého vrtu bude vrt uzavřen zátkou. Zátka je navržena betonová, zaklíněná do horniny v podobě prstence. Bude umístěna cca 7,5 m od ústí vrtu. Samotná zátka má uvažovanou tloušťku 2,5 m.

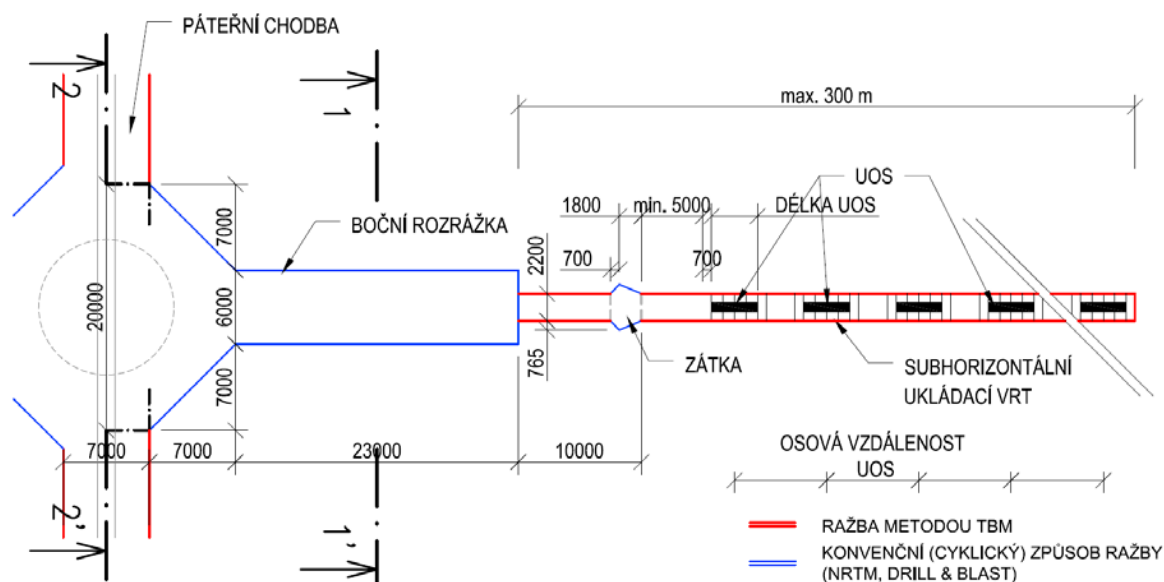
Po zaplnění všech vrtů v páteřní chodbě bude chodba, včetně nik před vrtů a bočních rozrážek zavezena výplňovým materiálem (backfillem), předpokládá se použít bude bentonit. Na koncích chodeb budou vybudovány uzávěry – betonové příčky.

Ukládací vrtů budou vždy realizovány mechanizovanou ražbou stroji TBM. Páteřní (přístupové) chodby mohou být vyraženy buď mechanizovanou ražbou stroji TBM nebo konvenční ražbou.

### Mechanizovaná ražba ukládacích vrtů stroji TBM

Subhorizontální ukládací vrtů budou raženy kolmo k páteřním dopravním chodbám z tzv. bočních rozrážek. Boční rozrážka bude ražena konvenční metodou za pomoci trhacích prací.

Průměr subhorizontálního ukládacího vrtu bude 2,2m. Jeho maximální délka vč. části vrtu před zátkou bude 300 m. Subhorizontální ukládací vrt bude ukončen zátkou. Projektovaná osová vzdálenost mezi UOS je 7,0 m (VVER-440), 15,5 m (VVER-1000 a NJZ).



Obr. 5 Horizontální ukládání, mechanizovaná ražba TBM, půdorys (zdroj: Špinka et al. 2018a)

### Konvenční způsob ražby

Ražený průměr a tvar příčného profilu subhorizontálního ukládacího vrtu se oproti metodě TBM nemění.

### Reference:

BUREŠ P., GRÜNWARD L., POŘÍZEK J., ZAHRADNÍK O., VEVERKA A., FIEDLER F., NOHEJL J., BAUDIS J., KOBYLKA D., MAREK P. (2018): Studie umístitelnosti HÚ v lokalitě Horka. MS SURAO TZ 137/2017, SÚRAO, Praha.

HOLUB J. A KOL (1999): Referenční projekt povrchových i podzemních systémů HÚ v hostitelském prostředí granitových hornin v dohodnuté skladbě úvodního projektu a hloubce projektové studie, EGP Invest spol. s r.o., Praha.

MPO (2015): Aktualizace státní energetické koncepce, schválená 26.8.2019, Ministerstvo průmyslu a obchodu, Praha.

POSPÍŠKOVÁ, I. A KOL. (2011): Aktualizace referenčního projektu hlubinného úložiště radioaktivních odpadů v hypotetické lokalitě, ÚJV Řež a.s. -Divize Energoprojekt. Praha.

ŠPINKA O., GRÜNWARD, L. ZAHRADNÍK O., VEVERKA A., FIEDLER F., NOHEJL J., POŘÍZEK J. A KOBYLKA D (2018a): Studie umístitelnosti HÚ v lokalitě Hrádek. MS SURAO TZ 138/2017, SÚRAO, Praha.

ŠPINKA O., GRÜNWARD, L. ZAHRADNÍK O., VEVERKA A., FIEDLER F., NOHEJL J., POŘÍZEK J. A KOBYLKA D. (2018b). Studie umístitelnosti HÚ v lokalitě Březový potok. MS SURAO TZ 139/2017, SÚRAO, Praha.

## 5 Vstupní podmínky pro specifikaci FEP

### 5.1 Specifikace systémových okrajových podmínek

Hlubinné úložiště tvoří systém inženýrských a přírodních bariér přírodních a inženýrských bariér (obalové soubory, tlumící a výplňový materiál, konstrukční prvky a horninové prostředí), jejichž vlastnosti ve vzájemné kombinaci zajistí izolaci uloženého odpadu od okolního životního prostředí a omezí i v dlouhodobém horizontu riziko ovlivnění okolního životního prostředí na akceptovatelnou úroveň.

Tento systém prochází vývojem, který je ovlivněn především lokalizací úložiště a prováděnými činnostmi, jako je například ovlivnění přírodních bariér průzkumnými pracemi, výstavbou úložiště a délkou provozního období nebo předprovozními a provozními činnostmi.

Český referenční projekt (Holub a kol 1999, Pospíšková a kol. 2011) je založen na několika základních předpokladech:

- Hostitelskou horninou budou krystalinické horniny, sledovanými lokalitami jsou Březový potok, Horka, Hrádek, Janoch (Vondrovic et al. 2020);
- Ukládací horizont je umístěn cca 500 m pod úroveň terénu;
- Úložiště bude důlní dílo se systémem přístupových chodeb a úložných vrtů;
- Tlumící materiál (buffer) i výplňový materiál (backfill) bude bentonit;
- Ukládací obalový soubor pro VJP bude dvouplášťový, s vnějším obalem z uhlíkové oceli a vnitřním z nerezové oceli, případně s s vnějším obalem z uhlíkové oceli a nerezovými pouzdra pro samostatné palivové soubory z nerezové oceli;
- Uložený inventář bude nepřepracované VJP.

### 5.2 Specifikace okrajových podmínek pro definici počátečního stavu

Výchozím stavem pro specifikaci FEP je důležitý počáteční stav (Initial state), ke kterému je možné vztáhnout vlastnosti jednotlivých komponent a vůči kterému pak mohou být popsány nastalé změny.

Pro nalezení a hodnocení dlouhodobé bezpečnosti je okamžik, kdy zavezený UOS je uložen v HÚ a je uzavřen přístup k němu. To znamená, že

- v UOS je zavezeno neporušené VJP, které bylo před zavezením skladováno cca 65 let (v bazénech vyhořelého paliva na JE a ve Skladu vyhořelého jaderného paliva);
- uzavřený a zkontrolovaný UOS je zavezen na ukládací horizont –500 m, je uložen v ukládacím vrtu (subhorizontální, vertikální). Volný prostor v ukládacím vrtu je vyplněn a utěsněn tlumícím materiálem /bufferem (bentonitem);
- jsou instalovány zátky ukládacích vrtů, uzávěry – betonové příčky na koncích ukládacích chodeb v případě vertikálního ukládání, volný prostor (manipulační niky, boční rozrážky a prostor před zátkou) a ukládací chodba jsou vyplněny výplňovým materiálem/backfillem – bentonitem.

FEP vztahující se k UOS s VJP jsou popsány v samostatné zprávě (Pospíšková et al. 2022). Činnosti, uvedené v prvních dvou odrážkách jsou však výchozím stavem nejen pro komponentu UOS s VJP, ale i pro systém ostatních inženýrských bariér.

### 5.3 Možné externí ovlivnění inženýrských bariér z předprovozní a provozní fáze

Jak bylo definováno v předcházející kapitole, tzv. „bodem 0“ je tedy okamžik, kdy zavezený UOS je uložen v HÚ a je uzavřen přístup k němu.

Nicméně tomuto okamžiku předchází v přípravné a provozní fázi mnoho činností, které mohou mít vliv na následující vývoj v čase. Jedná se především o

- technologii skladování v SVJP a zajištění kvality procesu skladování,
- technologii výroby UOS a možnost skrytých materiálových vad UOS,
- způsob manipulace s UOS, zavážení VJP, uzavírání a kontroly zavezeného UOS,
- způsob manipulace se zaplněným UOS vč. zavezení do vrtu (vertikální, subhorizontální ukládací vrt),
- způsob uzavření ukládacího vrtu (buffer – bentonit, betonová zátka, backfill – bentonit),
- způsob uzavření ukládací chodby (platí pro vertikální ukládání), uzavření volného prostoru (manipulační niky, boční rozrážky a prostor před zátkou),

Musí být především velmi pečlivě nastaveny **systém řízení a systém kvality**, které umožní nastavit a sledovat důležité parametry a postupy.

- stav a charakteristiky VJP zavezeného v UOS,
- stav UOS – z výroby, po zavezení VJP,
- technologii výroby bentonitu a dosažení požadovaných parametrů,
- technologii výroby materiálu konstrukčních prvků a dosažení požadovaných parametrů,
- geometrii, rozměry a způsob technické přípravy ukládacího vrtu (zajištění kruhového profilu a rozměrů, injektáže apod.),
- způsob manipulace se zaplněným UOS vč. zavezení do vrtu (vertikální, subhorizontální ukládací vrt),
- způsob uzavření ukládacího vrtu (buffer – bentonit, betonová zátka, backfill – bentonit),
- technologický postup instalace tlumícího a stabilizačního materiálu (buffer a backfill),
- technologický postup instalace konstrukčních prvků, včetně zátek a uzávěrů,
- rozhodnutí o vyjmutí/nevymutí vnesených materiálů některých konstrukčních prvků HÚ (ostění, podlaha).

Musí být především velmi pečlivě nastaveny **systém řízení a systém kvality**, které umožní nastavit a sledovat důležité parametry a postupy.

FEP vztahující se k UOS s VJP jsou popsány v samostatné zprávě (Pospíšková et al. 2022). Činnosti, uvedené v prvních dvou odrážkách jsou však výchozím stavem nejen pro komponentu UOS s VJP, ale i pro systém ostatních inženýrských bariér.

**Reference:**

HOLUB J. A KOL (1999): Referenční projekt povrchových i podzemních systémů HÚ v hostitelském prostředí granitových hornin v dohodnuté skladbě úvodního projektu a hloubce projektové studie, EGP Invest spol. s r.o., Praha.

POSPÍŠKOVÁ, I. A KOL. (2011): Aktualizace referenčního projektu hlubinného úložiště radioaktivních odpadů v hypotetické lokalitě, Závěrečná zpráva. ÚJV Řež a.s. -Divize Energoprojekt. Praha.

POSPÍŠKOVÁ I., DOBREV D., FRÝBORT J., HAVLOVÁ V., VAŠÍČEK R., KOBYLKA D., BÍLÝ T., RATAJ J., FRÝBORTOVÁ L., HOFFMANOVÁ E., VEČERNÍK P., VOZÁR M., FIEDLER F., SVOBODA J. (2022): Analýza FEPs UOS s VJP. MS SÚRAO 617/2022.

VONDROVIC L., AUGUSTA J., VOKÁL A., HAVLOVÁ V., KONOPÁČOVÁ K., LAHODOVÁ Z., POPELOVÁ E., URÍK J., BUKOVSKÁ Z., BUTOVIČ A., FRANĚK J., HROCH T., JELÍNEK J., KOBYLKA D., KRAJÍČEK J., MILICKÝ M., MIXA P., PERTOLDOVÁ J., SKOŘEPA Z., ŠTĚDRÁ V., ŠVAGERA J., UHLÍK J., ZAHRADNÍK O. (2020): Výběr potenciálních lokalit hlubinného úložiště v ČR pro navazující etapu prací po roce 2020. – MS SÚRAO TZ 465/2020, Praha.

## 6 Vlastnosti úložiště VJP – počáteční stav

Zpráva se zabývá touto částí úložiště, která je důsledkem lidské činnosti (s výjimkou UOS s VJP). Jedná se o:

- Podzemní prostory úložiště
  - Ukládací vrty
  - Přístupové a zavážecí chodby;
- Ostatní inženýrské bariéry
  - Buffer
  - Backfill
  - Konstrukční prvky úložiště.

Vlastnosti jsou popsány nejprve z makroměřítká, tedy z pohledu systému úložiště. V kap 6.1 jsou hodnoceny vlastnosti systému (např. hloubky ukládacího horizontu nebo velikost horninového bloku) a pak jeho v kap. 6.2 důležité vlastnosti podzemní části úložiště (např. ukládací vrty a orientace ukládání UOS s VJP atd.)

Následně jsou vlastnosti komponent inženýrských bariér (buffer kap. 6.3, backfill kap. 6.4 a konstrukční prvky kap.6.5) popsány z mikroměřítká, jsou popsány jejich specifické vlastnosti.

Specifickým, ale důležitým prvkem jsou rozhraní komponent, kde dochází ke vzájemnému ovlivnění (viz kap. 6.6).

### 6.1 Systém úložiště VJP

#### 6.1.1 Hloubka ukládacího horizontu

##### Popis:

Základním předpokladem pro nalezení optimální hloubky ukládacího horizontu je nalezení takových podmínek horninového prostředí, které znásobí funkci inženýrských bariér pro bezpečné uložení radioaktivního odpadu.

Pro stanovení optimální hloubky je nutné vzít v úvahu jak projektové, tak bezpečnostní požadavky, a najít optimální hodnotu. Jako příklad je uveden přístup SKB, z jehož projektového řešení český koncept vychází.



Engineering factors	Safety factors
<b>Initial temperature:</b> Up – lower in-situ temperature favorable for canister spacing.	<b>Initial temperature:</b> Considered in design, no direct effect.
<b>Water inflow, grouting efforts:</b> Up – lower groundwater pressure favorable. Down – if hydraulic conductivity decreases with depth.	<b>Salinity and upconing:</b> Up – possibly lower inflow to facility.
<b>Rock stability, rock stress:</b> Above a tentative triggering depth were stress conditions may be unfavorable for tunneling.	<b>Groundwater pressure:</b> Up – marginal importance.
<b>Available space, layout adaptation – 3D structural model:</b> Undecided, site specific.	<b>Rock stress:</b> Above a tentative triggering depth were stress conditions may be unfavorable for long term effects around the deposition holes.
<b>Degree of utilization – fracturing, thermal properties, inflow, stability:</b> Site specific.	<b>3D structural model – layout adaptation, degree of utilization:</b> Site specific – fracturing, thermal properties, hydraulic properties, stability.
<b>Environment (short term):</b> Up, less excavated rock volume, possibly less inflow (drawdown), but if hydraulic conductivity decreases with depth inflow may also decrease with a deeper repository.	<b>Length and transport resistance of travel paths:</b> Down, longer paths generally favorable.
<b>Time and cost:</b> Up, shorter access shafts and ramp.	<b>Fracture frequency and Transmissivity:</b> Undecided, site specific.
<b>Design of underground openings:</b> Not affected.	<b>Inadvertent human intrusion:</b> Down, lower risk of intrusion, difficult to quantify.
	<b>Freezing:</b> Down – reduces risk associated to permafrost.
	<b>Surface erosion:</b> No importance.

*Note: Engineering and safety factors considered for the recommendation of repository depth. “Up” implies that a shallow depth is preferable for this aspect, “down” implies that a deep depth is preferable for this aspect.*

S ohledem na důležitost informací přeloženo:

Technicko-ekonomické aspekty	Bezpečnostní aspekty
<b>Okolní teplota:</b> Výše – nižší okolní teplota je lepší pro rozteče ukládacích míst	<b>Okolní teplota:</b> uvažováno v projektu, nepřímý dopad
<b>Přítok podzemní vody, injektáže:</b> Výše – výhodnější je nižší tlak podzemní vody. Níže – pokud hydraulická konduktivita klesá s hloubkou	<b>Salinita a vzestupný přítok slané vody v depresním kuželu<sup>*)</sup>:</b> Výše – možný nižší přítok do úložiště <b>Tlak podzemní vody:</b> Výše – marginální vliv
<b>Stabilita horninového masivu, napětí v hornině:</b> nad určitou hloubkou mohou být napěťové podmínky nepříznivé pro realizaci podzemního díla	<b>Napětí v hornině:</b> nad určitou hloubkou mohou být napěťové podmínky okolo ukládacích vrtů z dlouhodobého hlediska nepříznivé
<b>Dostupná velikost, dispozice úložiště – 3D model:</b> Specifické pro lokalitu	<b>3D strukturní model – dispozice úložiště, využitelnost:</b> Specifické pro lokalitu - porušení horniny, tepelné vlastnosti, přítok podzemní vody, stabilita
<b>Využitelnost – porušení horniny, tepelné vlastnosti, přítok podzemní vody, stabilita:</b> Specifické pro lokalitu	Délka asložitost transportních cest: Níže, delší cesty jsou obecně výhodnější
<b>Okolní prostředí (krátkodobé hledisko):</b> Výše – méně vyrubané horniny, možný menší přítok podzemní vody (čerpání podzemní vody), ale pokud hydraulická vodivost klesá s hloubkou,	<b>Stupeň porušení a transmisivita:</b> Specifické pro lokalitu

Technicko-ekonomické aspekty	Bezpečnostní aspekty
přítok vody může být nižší i ve větší hloubce úložiště	
<b>Čas a náklady:</b> Výše – kratší přístupové šashty a tunely	<b>Intruze člověka:</b> Nižší – menší riziko intruze, obtížné kvantifikovat
<b>Projekt podzemních prostor:</b> neovlivňuje	<b>Zalednění:</b> Nižší – redukuje dopady spojené s permafrostem <b>Eroze:</b> Není důležitá

*Poznámka: Technicko-ekonomické a bezpečnostní aspekty pro doporučení hloubky úložiště. „Výše“ znamená, že z pohledu tohoto aspektu je preferované umístění v menší hloubce; „nižší“ znamená preferenci umístění ve větší hloubce.*

*\*) jde o mísení slané a sladké vody, kdy při čerpání sladké vody se tlačí slaná na její místo. V ČR k tomuto jevu nedochází, solanky jsou zde jen ve velkých hloubkách.*

*Obr. 6 Projektové a bezpečnostní požadavky pro stanovení hloubky úložiště. Zdroj: (SKB 2009)*

Český koncept pro hlubinné úložiště předpokládá umístění ukládacího horizontu cca 500 m pod úrovní terénu v krystalinických horninách (Pospíšková et al. 2011; Holub et al. 1993)

S ohledem na předpokládanou rozlohu ukládacího horizontu a potřeby zajištění podélného sklonu pro gravitační odvodnění ukládacích sekcí se hodnoty mohou pohybovat v rozmezí desítek metrů, s tím, že hodnota -500 m pod povrchem představuje nejvyšší polohu ukládacího místa pro VJP.

#### **Vliv na dlouhodobou bezpečnost:**

Multibariérový systém úložiště musí zajistit, aby uložený radioaktivní odpad nezpůsobil při očekávaném vývoji úložiště větší ozáření reprezentativní osoby, než je dáno dávkovou optimalizační mezí (0,25 mSv/rok).

Hloubka ukládacího horizontu je jednou z charakteristik, kterými lze ovlivnit dosažení výše uvedeného požadavku. Obecně lze říci, že stanovení hloubky z pohledu potřeb zajištění dlouhodobé bezpečnosti je ovlivněno několika faktory (SKB 2009):

Dostatečně velký vyhovující horninový masiv;

- Četnost a charakter křehkých struktur;
- Napětí v horninovém masivu;
- Tlak a chemické složení podzemní vody;
- Délka transportních cest;
- Teplotní podmínky;
- Minimalizace možnosti intruze.

#### **Dostupná data:**

Český referenční koncept převzal doporučenou hodnotu -500 m ze švédského konceptu KBS-3 (Pospíšková et al. 2012; Holub et al. 1993).

Ve zpracovaných studiích umístitelnosti pro lokality Březový potok (Špínka et al 2018b), Hrádek (Špínka et al 2018a), Horka (Bureš et al 2018) a Janoch (Zahradník et al. 2020) bylo umístění úložiště zpracováno tak, že hodnota -500 m pod povrchem představuje nejvyšší

polohu ukládacího místa pro VJP. Tyto studie byly zpracovány variantně pro horizontální a vertikální způsob uložení UOS s VJP a dva různé způsoby ražby, s využitím TBM a konvenční metodou. S ohledem na předpokládanou rozlohu ukládacího horizontu a potřeby zajištění podélného sklonu pro gravitační odvodnění ukládacích sekcí se hodnoty pohybovaly v rozmezí desítek metrů: Březový potok, Hrádek a Janoch -500 m až -530 m, Horka -500 m až -548 m (uvedené hodnoty se týkají pouze ukládacích sekcí, technické zázemí se nachází o několik desítek metrů níže).

Pro hloubku úložiště 500 m pod úroveň terénu byly zpracovány 3D modely:

- Geologické (Mixa et al 2019; Franěk et al. 2018)
- Hydrogeologické (Uhlík et al. 2018; Baier et al. 2020a; Baier et al 2020b, Jankovec et al. 2020; Uhlík et al. 2020)
- Transportní (Říha et al 2018).

### Nejistoty:

Český koncept převzal doporučenou hodnotu – 500 m ze švédského konceptu KBS-3, vlastní analýzy pro stanovení hloubky úložiště provedeny nebyly.

Reálná data z této hloubky na uvažovaných lokalitách nejsou k dispozici. Pro zpracování geologických modelů byla využita především archivní data, aproximace jiných dostupných informací a informace z provedených geofyzikálních prací.

### Reference:

BAIER J., JANKOVEC J., ČERNÝ M., GVOŽDÍK L., MILICKÝ M., POLÁK M., UHLÍK J. (2020A): Pasport aktualizovaného detailního hydraulického modelu, Lokalita Březový potok. – MS SÚRAO, TZ 470/2020, Praha.

BAIER J., JANKOVEC J., ČERNÝ M., GVOŽDÍK L., MILICKÝ M., POLÁK M., UHLÍK J. (2020B): Pasport aktualizovaného detailního hydraulického modelu, Lokalita Hrádek. – MS SÚRAO, TZ 469/2020, Praha.

BUREŠ P., GRÜNWARD L., POŘÍZEK J., ZAHRADNÍK O., VEVERKA A., FIEDLER F., NOHEJL J., BAUDIS J., KOBYLKA D., MAREK P. (2018): Studie umístitelnosti HÚ v lokalitě Horka. MS SÚRAO TZ 137/2017, SÚRAO, Praha.

FRANĚK J., BUKOVSKÁ Z., BURIÁNEK D., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ B., GRUNDLOCH J., HOLEČEK J., JELÉNEK J., JELÍNEK J., KLOMÍNSKÝ J., KRYŠTOFOVÁ E., KUČERA R., KUNCEOVÁ E., KÚRKOVÁ I., NAHODILOVÁ R., PACHEROVÁ P., PERTOLDOVÁ J., PEŘESTÝ V., RUKAVIČKOVÁ L., SOEJONO I., ŠVAGERA O., VERNER K., ŽÁČEK V. (2018): Závěrečná zpráva 3D strukturněgeologické modely potenciálních lokalit HÚ. MS SÚRAO, ZZ 229/2018, Praha.

HOLUB J. A KOL (1999): Referenční projekt povrchových i podzemních systémů HÚ v hostitelském prostředí granitových hornin v dohodnuté skladbě úvodního projektu a hloubce projektové studie, EGP Invest spol. s r.o., Praha.

JANKOVEC J., UHLÍK J., ČERNÝ, M. (2020): Pasport aktualizovaného detailního hydraulického modelu. Lokalita ETE-jih. – MS SÚRAO, TZ 474/2020, Praha.

MIXA P., SKÁCELOVÁ Z., PERTOLDOVÁ J., BUKOVSKÁ Z., BURIÁNEK D., DUDÍKOVÁ B., FRANĚK J., HRDLIČKOVÁ K., JELÍNEK J., NAHODILOVÁ R., SOEJONO I., VERNER K., ŽÁČEK V. (2019):

Shrnutí výsledků geologických a geofyzikálních výzkumných prací provedených v období 9/2017–6/2019 pro aktualizaci hodnocení potenciálních lokalit hlubinného úložiště RAO. – MS SÚRAO, TZ 412/2019, Praha.

POSPÍŠKOVÁ, I. A KOL. (2011): Aktualizace referenčního projektu hlubinného úložiště radioaktivních odpadů v hypotetické lokalitě, ÚJV Řež a.s. -Divize Energoprojekt. Praha.

ŘÍHA J., UHLÍK J., GRECKÁ M., MARYŠKA J., KRÁLOVCOVÁ J., ČERNÝ M., GVOŽDÍK L., POLÁK M., MILICKÝ M., BAIER J., TRPKOŠOVÁ D., HAVLOVÁ V. (2018): Transportní modely – závěrečná zpráva. – MS SÚRAO, TZ 324/2018, Praha.

SKB (2009): Design premises for a KBS-3V repository based on results from the safety assessment SR-Can and some subsequent analyses. TR-09-22. Svensk Kärnbränslehantering AB. Stockholm.

ŠPINKA O., GRÜNWARD, L. ZAHRADNÍK O., VEVERKA A., FIEDLER F., NOHEJL J., POŘÍZEK J. A KOBYLKA D (2018a): Studie umístitelnosti HÚ v lokalitě Hrádek. MS SURAO TZ 138/2017, SÚRAO, Praha.

ŠPINKA O., GRÜNWARD, L. ZAHRADNÍK O., VEVERKA A., FIEDLER F., NOHEJL J., POŘÍZEK J. A KOBYLKA D. (2018b). Studie umístitelnosti HÚ v lokalitě Březový potok. MS SURAO TZ 139/2017, SÚRAO, Praha.

UHLÍK J., JANKOVEC J., GVOŽDÍK L., MILICKÝ M. (2020): Pasport aktualizovaného detailního hydraulického modelu. Lokalita Horka. – MS SÚRAO TZ 476/2020, Praha

ZAHRADNÍK O., PÖPPERLE J., MAKÁSEK P., BUTOVIČ A., GRÜNWARD L., BUREŠ P., ŠPINKA O., MARTINČÍK J., KOBYLKA D. (2020): Studie umístitelnosti Janoch – aktualizace2020. MS SURAO TZ 518/2020, SÚRAO, Praha.

## 6.1.2 Dispozice úložiště a využitelnost horninového bloku

### Popis:

Základním předpokladem pro umístění hlubinného úložiště je nalezení dostatečně velkého a kompaktního horninového bloku, jehož velikost s dostatečnou rezervou umožní uložit předpokládané množství odpadu.

Potřebná velikost horninového bloku je tak z jedné strany definovaná geologickými podmínkami v lokalitě a z druhé strany technickou proveditelností, která je určena množstvím a vlastnostmi inventáře k uložení a technickými podmínkami. Při tom je třeba zohlednit potřeby technologií pro realizaci ražky (použité metody).

Z hlediska proveditelnosti je třeba počítat s tím, že ukládací prostory se mohou křížit s řadou křehkých deformací (zlomů a puklin), poruchových pásem a dalších litologických a strukturních nehomogenit. Jednodušší poruchy mohou být zřejmě sanovány již v průběhu vrtání pomocí injektážních směsí. Prostory s přítomností nehomogenit vyšší závažnosti je třeba vyloučit.

Za využitelné plochy pro ukládání se potom považují ty části perspektivního území, do kterých nezasahují zlomy 1. a 2. kategorie. Za zlom je považována oblast vymezená osou zlomu s ochrannou obálkou 100 m na každou stranu pro zlom 1. kategorie a 50 m na každou stranu u zlomů 2. kategorie. (Havlová et al. 2020).

Zadání pro potřebnou velikost horninového bloku tak vychází z projektového návrhu, který zohledňuje celkový uložený inventář a vzdálenosti mezi jednotlivými UOS, definované v českém konceptu tak, tak, aby nebyla v hloubce 500 m po celou dobu životnosti HÚ překročena limitní teplota 95 °C na povrchu UOS. Pro kandidátní lokality byl tento přístup použit ve Studiích umístitelnosti (Špínka et al. 2020a; Butovič et al. 2020; Špínka et al. 2020b; Zahradník et al. 2020),

#### **Vliv na dlouhodobou bezpečnost:**

Umístění hlubinného úložiště v horninovém bloku musí především respektovat strukturní a tektonické poměry hostitelského masivu, a musí být v dostatečné vzdálenosti od zvodnělých poruchových zón, aby se omezilo ovlivnění úložiště procesy probíhajícími na povrchu a zabránilo rychlé migraci radionuklidů ke zvodnělým poruchovým zónám.

#### **Dostupná data:**

Porovnání velikosti ukládacích ploch pro jednotlivé varianty lze nalézt v projektovém návrhu zpracovaných studií umístitelnosti lokalit Březový potok (Špínka et al 2018a), Hrádek (Špínka et al 2018b), Horka (Bureš et al 2018) a Janoch (Navrátilová et al. 2018) a jejich následné aktualizaci z roku 2020 (Špínka et al. 2020a; Butovič et al. 2020; Špínka et al. 2020b; Zahradník et al. 2020).

Návrhy jednotlivých variant vycházely z teplotních a termomechanických výpočtů (Kobylka 2019). Na základě mechanických parametrů hornin byly provedeny stabilitní výpočty, na kterých závisí, vedle tepelných vlastností, velikost projektovaného úložiště (Bureš et al. 2018; Špínka et al. 2018a, b; Zahradník et al. 2020).

Zpráva (Zahradník et al, 2019) obsahuje sumarizaci o plošném využití horninových bloků. Je zpracována pro variantu vertikálního ukládání, způsob ražby TBM. Tato varianta je nejméně příznivá z pohledu vytěžených objemů.

#### **Nejistoty:**

Hodnocení využitelnosti horninových bloků byla zpracována na základě současně dostupných informací, které jsou ovšem poznamenány velkou mírou nejistot:

- nejistoty plynoucích z nedostatečnosti informací o ukládaném inventáři z nových jaderných zdrojů (generované teplo),
- nejistoty technického řešení inženýrských bariér, např. tloušťka bufferu v ukládacích vrtech,
- nejistoty plynoucí z nedostatku reálných informací o horninovém bloku a jeho vlastnostech v úrovni ukládacího horizontu.

#### **Reference:**

BUREŠ P., GRÜNWARD L., POŘÍZEK J., ZAHRADNÍK O., VEVERKA A., FIEDLER F., NOHEJL J., BAUDIS J., KOBYLKA D., MAREK P. (2018): Studie umístitelnosti HÚ v lokalitě Horka. MS SÚRAO TZ 137/2017, SÚRAO, Praha.

BUTOVIČ A., GRÜNWARD L., BUREŠ P., POŘÍZEK J., ŠPÍNKA O., SOURAL J., ZAHRADNÍK O., MARTINČÍK J., KOBYLKA D. (2020): Studie umístitelnosti – aktualizace. Horka. ČVUT-SATRA-Mott MacDonald CZ, MS SÚRAO, TZ 512/2020

HAVLOVÁ V., PERTOLDOVÁ J., HROCH T., ŠTĚDRÁ V., UHLÍK J., MILICKÝ M., GVOŽDÍK L., BUTOVIČ A., ZAHRADNÍK O., LAHODOVÁ Z., KRAJÍČEK L. (2020): Konkretizace kritérií a indikátorů pro účely porovnání potenciálních lokalit HÚ. - MS SURAO. TZ 492/2020, Praha.

KOBYLKA D. (2019): Optimalizace vzájemné vzdálenosti UOS. – MS SÚRAO TZ 135/2017.

NAVRÁTILOVÁ V., NOL O. et al (2018): Souhrnná závěrečná zpráva ETE – jih. Hodnocení PÚ ZZZK a návrh navazujících geologických prací MS SURAO TZ 222/2018, SÚRAO, Praha.

ŠPINKA O., GRÜNWARD, L. ZAHRADNÍK O., VEVERKA A., FIEDLER F., NOHEJL J., POŘÍZEK J. A KOBYLKA D (2018a): Studie umístitelnosti HÚ v lokalitě Hrádek. MS SURAO TZ 138/2017, SÚRAO, Praha.

ŠPINKA O., GRÜNWARD, L. ZAHRADNÍK O., VEVERKA A., FIEDLER F., NOHEJL J., POŘÍZEK J. A KOBYLKA D. (2018b). Studie umístitelnosti HÚ v lokalitě Březový potok. MS SURAO TZ 139/2017, SÚRAO, Praha.

ŠPINKA P., BUTOVIČ A., BUREŠ P., GRÜNWARD L., POŘÍZEK J., SOURAL J., ZAHRADNÍK O., MARTINČÍK J., KOBYLKA D. (2020b): Studie umístitelnosti – aktualizace. Hrádek. ČVÚT-SATRA-Mott mac Donald CZ, MS SÚRAO, TZ 513/2020

ŠPINKA P., BUTOVIČ A., BUREŠ P., GRÜNWARD L., POŘÍZEK J., SOURAL J., ZAHRADNÍK O., MARTINČÍK J., KOBYLKA D. (2020a): Studie umístitelnosti – aktualizace Březový potok. ČVUT-SATRA-Mott Mac Donald CZ, MS SÚRAO, TZ 514/2020

ZAHRADNÍK O., PÖPPERLE J., MAKÁSEK P., BUTOVIČ A., GRÜNWARD L., BUREŠ P., ŠPINKA O., MARTINČÍK J., KOBYLKA D. (2020): Studie umístitelnosti Janoch – aktualizace2020. MS SURAO TZ 518/2020, SÚRAO, Praha.

ZAHRADNÍK O., BUREŠ P., HABARTA D., GRÜNWARD L., ŠPINKA O., BUTOVIČ A., BABIČ M., MAKÁSEK P (2019): Doplněk ke studiím umístitelnosti HÚ v kandidátních lokalitách, MS SURAO -TZ 442/2019.

## 6.2 Systém podzemních děl

Hlubinné úložiště je tvořeno systémem ukládacích prostor, přístupových chodeb, větracích šachet a technického zázemí. V českém konceptu jsou prostory na ukládacím horizontu řešeny variantně (viz kap. 4.2) – pro vertikální a horizontální způsob ukládání, a z pohledu použitých technologií s využitím konvenční a mechanizované ražby.

Systém podzemních děl, kde se manipuluje s UOS s VJP) lze rozčlenit do několika skupin, podle jejich využití:

- Zavážecí tunel (z povrchu na ukládací horizont);
- Páteřní chodby (na ukládacím horizontu, slouží k zavážení UOS k ukládacím vrtům pro horizontální i vertikální ukládání);
- Ukládací/zavážecí chodby (na ukládacím horizontu, pouze pro vertikální ukládání);
- Ukládací vrty (ukládací horizont).

Ukládací vrty jsou vždy realizovány metodou TBM, ostatní důlní díla byly navrženy variantně pro ražbu TBM a konvenční ražbu.

Součástí důlního díla jsou rovněž odtěžovací tunel, větrací šachty, dopravní cesty pro personál a pracovníky úseku ražky a výstavby, technické zázemí pro ražbu a další podpůrné technologické systémy.

Podrobnější informace o rozměrech a konstrukčním řešení důlních děl jsou uvedeny v kapitole 4.1.

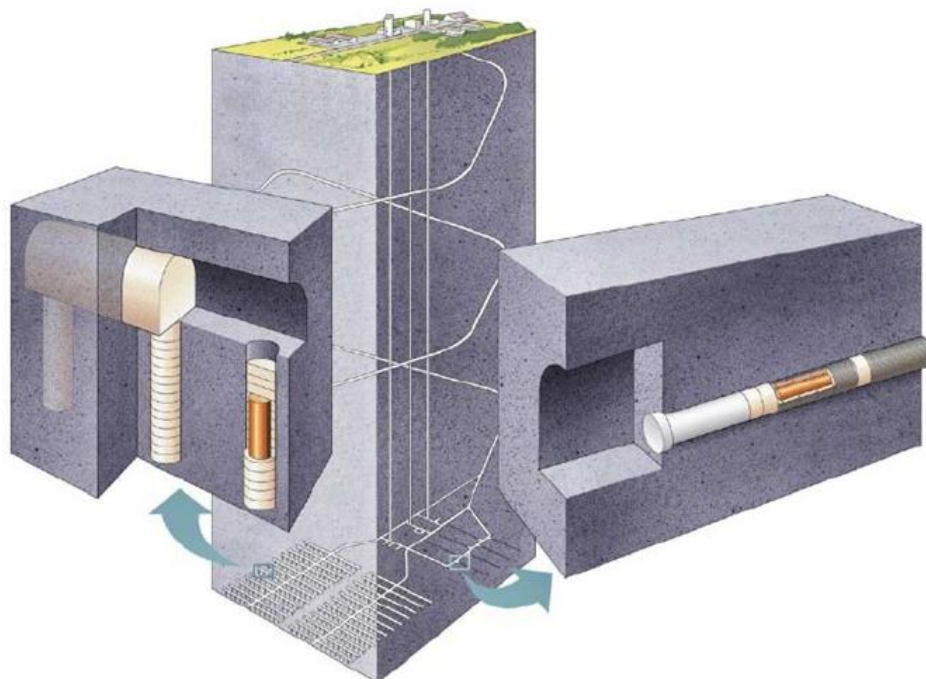
Z pohledu dlouhodobé bezpečnosti jsou především důležité dvě charakteristiky:

- Ukládací vrty a jejich orientace podle způsobu ukládání;
- Vlastnosti horniny ovlivněné ražbou

### 6.2.1 Ukládací vrty a jejich orientace podle způsobu ukládání

#### Popis:

Existují dvě technicky přijatelné varianty pro uložení UOS s VJP – vertikální a horizontální.



Obr. 7 Švédský koncept KBS-3V (vlevo) a KBS-3H (vpravo). Zdroj: Posiva 2010.

Stejně jako v případě stanovení hloubky úložiště, i volba způsobu ukládání UOS musí vycházet z kombinace projektových a bezpečnostních požadavků; především stabilita horninového masivu, tok podzemní vody, velikost horninového masivu, četnost a charakter křehkých struktur, navíc pak charakteristiky inženýrských bariér, jejich fyzikální a chemické vlastnosti.

Český referenční koncept pro uložení VJP je zpracován ve dvou variantách – vertikální ukládání (Holub et al. 1999) a horizontální ukládání (Pospíšková et al 2011).

Aktuální studie umístitelnosti do kandidátních lokalit Březový potok (Špínka et al 2018a), Hrádek (Špínka et al 2018b), Horka (Bureš et al 2018) uvádí průměr svislého ukládacího vrtu 1,8 m (vertikální koncept) a / nebo průměr 2,2 m mikrotunelů pro horizontální koncept. Předpokládá se, že vrty budou realizovány mechanizovanou ražbou.

**Vliv na dlouhodobou bezpečnost:**

Uspořádání ukládacího horizontu je nejvíce ovlivněno dvěma požadavky – vznikem preferenčních cest a délkou transportních cest, a vzájemným tepelným ovlivněním UOS s VJP.

Oba způsoby ukládání ovlivní i množství použitého tlumícího a výplňového materiálu (buffer a backfill). (viz kap 6.3.1)

Vnesené materiály mohou ovlivnit chemismus vody a následné chemické interakce. Bentonit, především v jeho nenasyceném stavu, je důležitý i pro vyvolaný teplotní gradient úložiště.

Dlouhodobou bezpečnost ovlivní i způsob realizace vrtu (viz 6.2.2)

**Dostupná data:**

Návrhy jednotlivých variant uložení UOS vycházely z teplotních a termomechanických výpočtů (Kobylka 2019).

Analýza stávajícího modelu hlubinného úložiště (Landa et al. 2015) a podklady použité pro zpracování tohoto dokumentu.

**Nejistoty:**

Pro horizontální i vertikální způsob ukládání byly připraveny v průběhu vývoje konceptu ukládání VJP do HÚ bezpečnostní modely pro transport radionuklidů do biosféry.

Nicméně bezpečnostní modely pro horizontální i vertikální ukládání nebyly provedeny se stejnými vstupy, takže nejsou porovnatelné.

**Reference:**

BUREŠ P., GRÜNWARD L., POŘÍZEK J., ZAHRADNÍK O., VEVERKA A., FIEDLER F., NOHEJL J., BAUDIS J., KOBYLKA D., MAREK P. (2018): Studie umístitelnosti HÚ v lokalitě Horka. MS SÚRAO TZ 137/2017, SÚRAO, Praha.

HOLUB J. A KOL (1999): Referenční projekt povrchových i podzemních systémů HÚ v hostitelském prostředí granitových hornin v dohodnuté skladbě úvodního projektu a hloubce projektové studie, EGP Invest spol. s r.o., Praha.

KOBYLKA D. (2019): Optimalizace vzájemné vzdálenosti UOS. – MS SÚRAO TZ 135/2017.

LANDA J., TRPKOŠOVÁ D., HAVLOVÁ V, GONDOLLI J (2015): Analýza stávajícího modelu hlubinného úložiště, MS SÚRAO – TZ 8/2015. Praha.

PATRAKKA E. (2010): The Final Disposal Of Spent Nuclear Fuel In Finland. ITRE Public Hearing, 1 December 2010, Brussels

POSPÍŠKOVÁ, I. A KOL. (2011): Aktualizace referenčního projektu hlubinného úložiště radioaktivních odpadů v hypotetické lokalitě, Závěrečná zpráva. ÚJV Řež a.s. -Divize Energoprojekt. Praha. ŠPINKA O., GRÜNWARD, L. ZAHRADNÍK O., VEVERKA A., FIEDLER F., NOHEJL J., POŘÍZEK J. A KOBYLKA D (2018a): Studie umístitelnosti HÚ v lokalitě Hrádek. MS SÚRAO TZ 138/2017, SÚRAO, Praha.

ŠPINKA O., GRÜNWARD, L. ZAHRADNÍK O., VEVERKA A., FIEDLER F., NOHEJL J., POŘÍZEK J. A KOBYLKA D. (2018a). Studie umístitelnosti HÚ v lokalitě Březový potok. MS SÚRAO TZ 139/2017, SÚRAO, Praha.



ŠPINKA O., GRÜNWARD, L. ZAHRADNÍK O., VEVERKA A., FIEDLER F., NOHEJL J., POŘÍZEK J. A KOBYLKA D. (2018b). Studie umístitelnosti HÚ v lokalitě Hrádek. MS SURAO TZ 138/2017, SÚRAO, Praha.

## 6.2.2 Vlastnosti horniny ovlivněné ražbou

### Popis:

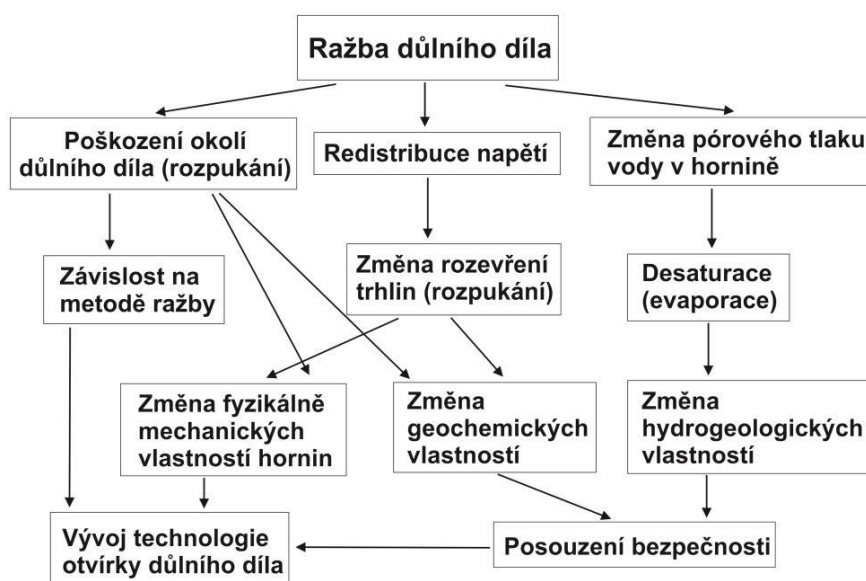
Zóna narušení v důsledku ražby (Excavation Disturbed Zone – EdZ) a zóna poškození v důsledku ražby (Excavation Damaged Zone – EDZ) jsou oblasti okolo podzemních děl, v nichž je horninový masiv více či méně rozrušen v důsledku razících prací. Vznik těchto zón je nevyhnutelný (Hudson et al. 2009), intenzita ovlivnění okolního masivu je ovšem závislá na použité metodě ražby, tj. zda je použita např. trhací práce nebo je výstavba naopak prováděna pomocí technologie TBM (Tunnel Boring Machine). Kromě použité metody výstavby díla je rozsah a tvar zón porušení ovlivněn také tvarem a průřezem podzemních prostor, pevnostními vlastnostmi horninového masivu, napěťovými poměry in situ, strukturními fenomény a rovněž, v případě trvalých úložišť, i teplotním zatížením od uloženého vyhořelého jaderného paliva (VJP). Bäckblom (2008), v rámci studie zaměřené na krystalinické horniny a prováděné pro SKB, definoval zóny narušení a poškození následujícím způsobem:

- „Zóna narušení“ - disturbed resp. influence zone (EdZ resp. EIZ) - je zóna, ve které převládají změny stavu (např. napětí, hydraulického tlaku). Změny vlastností horninového masivu jsou však nevýznamné nebo vratné.
- „Zóna poškození“ - damaged zone (EDZ) - je zóna nejbližší podzemnímu dílu, která utrpěla nevratné deformace a ve které dochází buď ke střížnému pohybu na existujících puklinách nebo k jejich propagaci a vzniku nových nespojitostí. Takovéto poškození a narušení je ve větší, či menší míře přítomno vždy při vytváření podzemních prostor.

V rámci EDZ bývá někdy ještě vymežována zóna HDZ – highly damaged zone, která je zpravidla spojována s odlupováním a vylamováním horniny, kdy dochází ke kompletnímu oddělení celých desek nebo bloků od horninového masivu. Zatímco ke vzniku EDZ a EdZ dochází v důsledku ražby vždy, HDZ může vzniknout v případech značně vysokých hodnot napětí v masivu nebo když metoda hloubení nebo ražby vytváří rozpukanou zónu (např. běžné vrtání a trhací práce).

Tsang et al. (2005) uvádějí, že pokud je jako metoda ražby použito vrtání a trhací práce, může být EDZ rozvinuto v mocnosti od 10 cm až do 1,5 m směrem do horninového masivu při nárůstu propustnosti o dva až tři řády ( $10^{-15}$ – $10^{-16}$  m<sup>2</sup>). Při použití TBM, mocnost EDZ dosahuje okolo 1 cm, přičemž propustnost narůstá o jeden řád.

Probíhající procesy změn vlastností hornin s narušením masivu ražbou lze zobrazit následovně:



Obr. 8 Procesy změn vlastností hornin s narušením masivu ražbou (Saiang 2008)

V období, kdy je dílo otevřeno, dochází k zapojení časově závislých jevů a procesů, ovlivňujících okolní horniny. Později, během a po uložení radioaktivních odpadů, budou horniny podléhat vlivu zvyšování teploty v důsledku přenosu tepla od UOS, což bude mít vliv na změny napětí v horninovém masivu a bude rovněž urychlovat chemické reakce (Hudson et al. 2009).

### Vliv na bezpečnost:

Z podstaty charakteru fenoménu EDZ – indukované zvýšení porušenosti horninového materiálu v okolí podzemních tunelů a kaveren – vyplývají následující zásadní změny původních vlastností materiálu:

- Degradace pružnostních a pevnostních charakteristik materiálu v zónách EDZ představuje zvýšenou deformabilitu zasažené části masivu, doprovázenou snížením únosnosti materiálu a následně potenciálním snížením úrovně stability díla v bezprostřední blízkosti ukládaných UOS s VJP.
- Vzniklé porušení materiálu a reaktivace přirozených puklinových systémů umožňuje vznik nových komunikačních cest, zvyšuje propustnost této části masivu, degraduje izolační schopnost masivu a tím účinnost kompaktní horniny jako přirozené izolační bariéry proti šíření uniklých radioaktivních izotopů.

Více energeticky razantnější razící metody (např. běžné vrtání a trhací práce) mohou však vytvářet lokální HDZ na obvodu díla, zatímco v porušených horninách preexistující prvky nespojitosti mohou změnit podobu a způsob porušení horniny a mohou být reaktivovány, což má za následek významné změny v propustnosti. Jak uvádí Tsang et al. (2005), EDZ je, alespoň v průběhu určitého časového období, zónou s relativně vysokou permeabilitou, ale to, zda je hydrogeologický režim schopen využít EDZ k transportu rozpuštěných látek do okolního prostředí vyžaduje komplexní zhodnocení celkového proudění a režimu podzemních vod.

### Dostupná data:

Současné znalosti ze světa o fenoménu EDZ jsou přehledně zpracovány v rešeršní zprávě

- VAVRO M. A KOL.: Shrnutí zahraničních poznatků o vzniku a vývoji EDZ v krystalinických horninách – rešerše, SÚRAO, Technická zpráva číslo 50/2016.

Další poznatky z výzkumu EDZ jsou převážně z českého prostředí lokality PVP Bukov a Dolu Rožná v následujících zprávách:

- BUKOVSKÁ Z. A KOL.: Získání dat z hlubokých horizontů Dolu Rožná, SÚRAO, Technická zpráva č. 464/2020
- STAŠ L., BLÁHA P. A KOL.: Vznik a monitoring EDZ při výstavbě PVP BUKOV – závěrečná zpráva, SÚRAO, Technická zpráva číslo 351/2019
- STAŠ L. A KOL.: Rozvoj geotechnických a geofyzikálních metod pro získání 2D a 3D obrazu geologické stavby, ETAPA C -Výzkum použití geotechnických metod, etapová zpráva projektu FV20294, ÚGN, 2021
- BLÁHA P. A KOL.: Rozvoj geotechnických a geofyzikálních metod pro získání 2D a 3D obrazu geologické stavby, ETAPA B -Výzkum použití geofyzikálních metod, etapová zpráva projektu FV20294, Geotest a.s., 2021

### Nejistoty:

Na kandidátních lokalitách zatím není zatím dostatek relevantních informací pro hodnocení rozsahu budoucích vzniklých EDZ a jejich vlivu na celkový stav bezpečnosti potenciálního HÚ.

Na předpokládaném hloubkovém horizontu nejsou známy:

- orientace a velikost složek napětového pole včetně anizotropie (napětové poměry se mohou významně lišit od předpokladu standardní distribuce geostatického gravitačního napětového pole),
- konkrétní intervaly hodnot deformačních a pevnostních charakteristik dotčeného horninového masivu včetně případné anizotropie, jak z pohledu okamžitého stavu, tak i z hlediska možného dlouhodobého vývoje iniciovaného změnami okolních podmínek
- lokální hydrogeologická situace,
- plánovaná technologie ražby včetně schématu postupů a geometrie tunelů.

### Reference:

BÄCKBOLM, G. (2008): Excavation damage and disturbance in crystalline rock – results from experiments and analyses. Technical Report SKB TR-08-08. Svensk Kärnbränslehantering AB Stockholm, 85 pp.

HUDSON, J. A., BÄCKSTRÖM, A., RUTQVIST, J., JING, L., BACKERS, T., CHIJIMATSU, M., CHRISTIANSSON, R., FENG, X. T., KOBAYASHI, A., KOYAMA, T., LEE, H. S., NERETNIEKS, I., PAN, P. Z., RINNE, M., SHEN, B. T. (2009): Characterising and modelling the excavation damaged zone in crystalline rock in the context of radioactive waste disposal. *Environmental Geology*, 57(6), 1275-1297.

TSANG, C. F., BERNIER, F., DAVIES, C. (2005): Geohydromechanical processes in the Excavation Damaged Zone in crystalline rock, rock salt, and indurated and plastic clays – in the context of radioactive waste disposal. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 42(1), 109-125.

SAIANG, D. (2008): Behaviour of blast-induced damaged zone around underground excavations in hard rock mass. Ph.D. Thesis, Luleå University of Technology, Luleå, Sweden, 297 pp.

## 6.3 Tlumicí materiál /buffer (bentonit)

Bentonity jsou reziduální jílové horniny s vysokým obsahem smektitů. Bentonity jsou dominantně typu Na či Ca/Mg. V ČR jsou těženy pouze Mg-Ca bentonity. Referenční řešení blíže nespecifikuje typ či další požadavky na bentonit. Více o původu českých bentonitů viz Příloha 2.

### 6.3.1 Výplň ukládacího vrtu (koncepční řešení)

#### Popis:

V ukládacím tunelu/ vrtu bude UOS obklopen materiálem – bentonitem – zajišťujícím odvod tepla od UOS, těsnicí a retardační funkci a mechanickou stabilitu UOS v daném místě. Předpokládá se využití českého bentonitu z oblasti západní části České republiky. Bentonit je typu Ca-Mg, s obsahem smektitu nad 60 % a se zvýšeným obsahem železa v oktaedrických polohách (Hausmannová et al. 2018).

Může být využito bentonitových bloků, celých prstenců, pelet, popř. kombinací těchto možností. Z hlediska technologie výstavby půjde o sestavení (bloky, prstence), nasypání, popř. zhutnění u pelet či nástřik (pelet).

V referenčním projektu (Holub et al. 1999) se pro vertikální ukládání mezi UOS a stěnou vrtu uvažovala mocnost bufferu 300 mm.

Pro horizontální ukládání v referenčním projektu (Pospíšková et al., 2011) se mocnost bufferu se předpokládala 700 mm, při využití technologie superkontejneru.

Aktuální studie umístitelnosti do kandidátních lokalit Březový potok (Špínka et al 2018a), Hrádek (Špínka et al 2018b), Horka (Bureš et al 2018) uvádí průměr svislého ukládacího vrtu 1,8 m (svislý koncept) a / nebo průměr 2,2 m mikrotunelů pro vodorovný koncept. Vzhledem k různému průměru ukládacího vrtu (tunelu) a vnějších průměrů UOS pro různé typy VJP - 805 mm pro VVER 440 či 1050 mm pro VVER 1000/ NJZ vychází variabilita mocnosti bufferu cca 0,4-0,7 m. Je to důsledkem variability rozměrů UOS vůči rozměrům ukládacího vrtu, realizovaného dostupnou technologií.

V počáteční fázi, po výstavbě, resp. krátce po uložení UOS bude buffer relativně suchý (se vstupní vlhkostí pelet/ bloků). Po uložení UOS bude z jeho strany docházet k ohřívání, a tedy vývoji teplotního gradientu směrem do okolí. Naopak z okolního prostředí bude postupem času docházet k syčení vodou, a tak k dočasnému vzniku hydraulických gradientů (do doby úplného nasycení bufferu). Maximální dosažená teplota v bufferu je jedním z klíčových limitních kritérií návrhu HÚ. Syčení bufferu způsobí bobtnání bentonitu, a tudíž dotěsnění mezer a spár v konstrukci.

#### Vliv na dlouhodobou bezpečnost:

Materiál tlumicí vrstvy a jeho dlouhodobá stabilita je, spolu s parametry vrstvy (objemová hmotnost sušiny, objem volných prostor, homogenita) klíčový pro její chování a zajištění dlouhodobé funkce. Nevhodně vybraný materiál či nedostatečná kvalita vrstvy by přímo ovlivnila schopnost zatěsnění UOS, mechanickou stabilitu UOS v místě, záchyt a transport radionuklidů či korozní podmínky na rozhraní bufferu a UOS.

Pro hodnocení účinnosti chování bufferu při posuzování bezpečnosti byla v zahraničí formulována řada tzv. funkčních ukazatelů společně s kritérii, která by měla v průběhu času splňovat (SKB, 2011). V ČR zatím nebyla obdobná sada indikátorů stanovena.

#### **Dostupná data:**

Shrnutí vlastností českých bentonitů uvádí Hausmannová et al. (2018). Hojně testovaný bentonit BCV\_2017 je popsán v Červinka et al. (2018).

V současné době (4/2022) je tvořena databáze dat českých bentonitů v rámci projektu SÚRAO „Výplně a ostatní inženýrské komponenty HÚ“.

Technologie, postup výroby a výsledky testování pelet z českého materiálu BCV uvádí Pacovský et al. (2019) a Šťástka et al. (2020).

#### **Nejistoty:**

Materiál: Není rozhodnuto o kandidátním materiálu (typ, původ, zajištěná kapacita pro potřeby HÚ v době jeho provozu, dostupnost pro výzkum atd.)

I když se české Ca-Mg bentonity BCV a BaM chovají obdobně, konkrétní materiálové parametry pro hodnocení bezpečnosti i parametry nutné pro kontrolu kvality při výstavbě bude možné stanovit, resp. aktualizovat až se znalostí zdroje/ materiálu.

Z dostupných českých zdrojů (Pospíšková et al., 2011) je zřejmé, že funkční ukazatele a konkrétní číselná kritéria – požadavky na buffer a backfill nebyla v ČR dosud stanovena – jde např. o maximální přípustnou hodnotu hydraulické vodivosti, minimální či maximální bobtnací tlak. Z těchto hodnot dále, pro každý konkrétní bentonit, vyplývají požadavky na minimální objemovou hmotnost sušiny, ať už bufferu sestaveného z tvárnic nebo pelet. Objemová hmotnost sušiny (a vlhkost) jsou fakticky klíčovými parametry pro přípravu a kontrolu výroby komponent bufferu (tvárnic/ pelet). Logicky jsou prozatím přebírány hodnoty ze zahraničních konceptů (POSIVA, SKB) nicméně pro český koncept bude nutno zohlednit chování a konkrétní parametry vybraného českého bentonitu, tedy typu Ca-Mg.

Systém ukládání, typ bufferu a technologie výstavby: Není definitivně rozhodnuto o systému ukládání (vertikální, horizontální), variantě bufferu a technologii jeho výstavby. Z orientace ukládání, podoby bufferu a technologie výstavby vyplývají nejistoty jako počáteční nehomogenita bufferu, objem a geometrie mezer a spár. Mezery a spáry, spolu s objemovou hmotností sušiny bentonitu, dále ovlivňují tepelnou vodivost bufferu jako celku, tedy schopnost systému odvádět teplo od UOS.

Vzhledem k doposud nerozhodnutému způsobu ukládání je nejistotou také celkové množství materiálu nutné pro HÚ a jeho dostupnost.

#### **Reference:**

BUREŠ P., GRÜNWARD L., POŘÍZEK J., ZAHRADNÍK O., VEVERKA A., FIEDLER F., NOHEJL J., BAUDIS J., KOBYLKA D., MAREK P. (2018): Studie umístitelnosti HÚ v lokalitě Horka. MS SÚRAO TZ 137/2017, SÚRAO, Praha.

ČERVINKA R., VAŠÍČEK R. A KOLEKTIV (2018): Kompletní charakterizace bentonitu BCV 2017 -, SÚRAO TZ419/2019, 39 str.

- HAUSMANNOVÁ, L., HANUSOVÁ, I., A DOHNÁLKOVÁ, M. (2018): Summary of the research of Czech bentonites for use in the deep geological repository – up to 2018, SÚRAO 309/2018/ENG.
- HOLUB J. A KOL (1999): Referenční projekt povrchových i podzemních systémů HÚ v hostitelském prostředí granitových hornin v dohodnuté skladbě úvodního projektu a hloubce projektové studie, EGP Invest spol. s r.o., Praha.
- PACOVSKÝ J., ŠTÁSTKA J., A KOLEKTIV (2019): Návrh a výroba směsi bentonitových pelet – závěrečná zpráva, ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Centrum experimentální geotechniky, SÚRAO TZ 362/2019, Praha, 65 str.
- POSPÍŠKOVÁ, I. A KOL. (2011): Aktualizace referenčního projektu hlubinného úložiště radioaktivních odpadů v hypotetické lokalitě, ÚJV Řež a.s. -Divize Energoprojekt. Praha.
- SKB (2011): Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark. Main report of the SR-Site project. SKB TR-11-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- ŠPINKA O., GRÜNWARD, L. ZAHRADNÍK O., VEVERKA A., FIEDLER F., NOHEJL J., POŘÍZEK J. A KOBYLKA D (2018a): Studie umístitelnosti HÚ v lokalitě Hrádek. MS SURAO TZ 138/2017, SÚRAO, Praha.
- ŠPINKA O., GRÜNWARD, L. ZAHRADNÍK O., VEVERKA A., FIEDLER F., NOHEJL J., POŘÍZEK J. A KOBYLKA D. (2018b). Studie umístitelnosti HÚ v lokalitě Březový potok. MS SURAO TZ 139/2017, SÚRAO, Praha.
- ŠTÁSTKA J., VAŠÍČEK R., ČERNOCHOVÁ K. (2020): Návrh a výroba směsi bentonitových pelet II – závěrečná zpráva, ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Centrum experimentální geotechniky, MS SÚRAO TZ 489/2020, 45 str.

### 6.3.2 Termofyzikální vlastnosti

#### Popis:

#### Součinitel tepelné vodivosti

Součinitel tepelné vodivosti (tepelná konduktivita) číselně vyjadřuje množství tepla, které v ustáleném stavu prochází jednotkovým průřezem látky, při jednotkovém teplotním gradientu za jednotku času. Rozdělení metod měření tepelné vodivosti bentonitu je na metody stacionární, kdy se měří součinitel tepelné vodivosti při ustáleném teplotním poli a nestacionární, kdy měření probíhá v neustáleném teplotním poli. Měření nestacionární metodou je vždy založeno na analýze průběhu časové závislosti teplotní odezvy na impulsy tepelného toku do analyzovaného materiálu. Pro zvolení vhodné metody měření je nutné zvážit druh vzorku (jeho geometrické vlastnosti) a fyzikální vlastnosti (u bentonitu hustota vzorku, vlhkost). Přístrojově problematické může být měření plně nasycených vzorků, tj. při vystavení měřicího zařízení/ sondy bobtnacímu tlaku.

#### Měrná tepelná kapacita

je definována jako tepelná kapacita hmotné jednotky (podíl tepelné kapacity objektu a jeho hmotnosti, popř. objemu), přičemž měrná tepelná kapacita  $c$  značí množství tepla potřebné k ohřátí 1 kg látky o 1 °C. Obvykle dostupné přístrojové vybavení umožňuje přímé měření tepelných vlastností, kterými jsou tepelná vodivosti s měrnou tepelnou kapacitou.

Měrná tepelná kapacita,  $c$  ( $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ) je podílem je měrné objemové tepelné kapacity  $c_p$  ( $\text{J.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$ ) a objemové hmotnosti  $\rho$  ( $\text{kg.m}^{-3}$ ):

$$c = \frac{c_p}{\rho}, \quad (1)$$

**Tepelná difuzivita  $a$**  ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) (součinitel teplotní vodivosti) vyjadřuje schopnost látky vyrovnávat rozdílné teploty při neustáleném šíření tepla vedením v homogenním prostředí, je rovna podílu tepelné konduktivity  $\lambda$  a součinu její objemové hmotnosti  $\rho$  a měrné tepelné kapacity  $c$  při stálém tlaku:

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}, \quad (2)$$

Obecně jsou parametry závislé zejm. na vysušené objemové hmotnosti, vlhkosti, méně na teplotě popř. dalších vlivech. Existuje velká variabilita metod, podmínek a požadavků při zkouškách (např. tvar a velikost vzorku, jeho struktura, objemová hmotnost, okolní podmínky, nutnost nestacionární metody pro měření tepelné kapacity apod.).

#### **Vliv na dlouhodobou bezpečnost:**

Teplo se přenáší z povrchu UOS do bentonitové bariéry a přes ní dále do horninového prostředí (přímo do okolí ukládacího vrtu či přes zásypový materiál). Účinnost přenosu tepla bentonitem je důležitá pro efektivitu celého systému, protože přímo ovlivňuje maximální teplotu bariéry, pro kterou byla stanovena prahová hodnota ( $< 100 \text{ }^\circ\text{C}$ ; Vokál a kol. 2010).

Když je bentonitová bariéra nasycena vodou a nabobtná tak, že jsou všechny mezery a spáry vyplněny, teplo se teplo přenáší vedením přes vodou nasycenou bentonitovou bariéru, tedy výrazně lépe.

V prvních letech provozu HÚ jsou určující pro teplotu na povrchu UOS, tepelné vlastnosti bentonitu a tloušťka bentonitové vrstvy obklopující UOS, avšak z dlouhodobého hlediska je rozhodující geometrie úložiště a tepelné vlastnosti horniny (Blaheta a kol. 2012). Tepelné vlastnosti horninového prostředí jsou tak jedním z kritických vstupů pro dimenzování a hodnocení HÚ. Nejdůležitějším parametrem je pak součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$  ( $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ).

#### **Dostupná data:**

Z hlediska transportu tepla je nutné znát jednak hodnoty u homogenních materiálů a jednak nehomogenních směsí (peletizovaných bentonitů) či nehomogenních systémů (mezera/bentonitová vrstva/ mezera).

Pro vedení tepla je nutná znalost součinitele tepelné vodivosti a pro výpočty neustáleného toku měrnou tepelnou kapacitu.

#### **Homogenní materiál**

Parametry homogenních vzorků (BCV\_2017) jsou uvedeny v Červinka a kol. (2019), v rámci prací byly také měřeny hodnoty  $c$ , resp.  $c_p$ .

Starší měření dalších českých bentonitů Rokle a B75 uvádí Vašíček a kol. (2013).

### **Nehomogenní systémy**

Pelety – parametry pelet z BCV\_2017 byly měřeny v rámci projektu TAČR TK01030031, Inženýrská bariéra 200C (2018-2025); prozatím není dostupný oponovaný, veřejný výstup.

#### **Nejistoty:**

Chybějící data pro tepelné vodivosti při plném nasycení materiálu (= za současného působení bobtnacího tlaku).

Chybějící experimentální data pro složitější systémy – pro ověření efektivních tepelných vodivostí pro systémy typu ne-zaplňená mezera/ blok, soustava bloků, pelety; za různých podmínek (sycení, míra homogenizace, tlak, teplota).

Konstrukční řešení (dimenze, parametry materiálů) rozhraní (mezer/ bloků/ pelet).

#### **Reference:**

BLAHETA R., BYCZANSKI P., MALÍK J., KOHUT R., KOLCUN A., STARÝ J., HOKR M., KRÁLOVCOVÁ J., FRYDRYCH D. (2012): Tepelná analýza referenčního návrhu úložiště vyhořelého jaderného paliva. Závěrečná zpráva řešení projektu. Ústav geoniky AV ČR, v. v. i., 39 str

ČERVINKA R., VAŠÍČEK R., VEČERNÍK P., KAŠPAR V. (2019): Kompletní charakterizace bentonitu BCV 2017. SÚRAO Technická zpráva 419/2019, Česká republika, 33 s.

SKB (2010). Buffer, backfill and closure process report for the safety assessment SR-Site. SKB TR 10-47. Svensk Kärnbränslehantering AB

SKB (2014). Engineered Barrier Process Report for the Safety Assessment SR-PSU. SKB TR 14-04. Svensk Kärnbränslehantering AB

VAŠÍČEK R., L. HAUSMANNOVÁ L., LEVOROVÁ M., HOLÍKOVÁ P., KAISR, Z. VENKRBEC Z., ČERVINKA R., P. VEČERNÍK P. GONDOLLI J., ŠTAMBERG K., DRTINOVÁ B., (2013). Závěrečná Zpráva Řešení Podetapy 4.1 Projektu FRTI1/362: Výzkum vlastností materiálů pro bezpečné ukládání radioaktivních odpadů a vývoj postupů jejich hodnocení FR-TI1/362. Centrum experimentální geotechniky, Fakulta stavební ČVUT.

VOKÁL A., HAVLOVÁ V., HERCÍK M., LANDA J., LUKIN D., VEJSADA J. (2010): Aktualizace referenčního projektu hlubinného úložiště radioaktivních odpadů v hypotetické lokalitě. III. Etapa. Studie zadávací bezpečnostní zprávy. C. Dokumentační část. C.2 Hodnocení dlouhodobé bezpečnosti HÚ. Zpráva ÚJV Řež, a.s. EGP 5014-F-101420, 12/2010.

### **6.3.3 Mechanické vlastnosti**

Mechanické chování bentonitu a jeho vývoj v době „životnosti“ bentonitových bariér je složitou oblastí, kdy se v počáteční fázi vývoje, tedy v nenasyčeném stavu, uplatní standardně stanovované parametry zemin jako pevnost v tlaku, smykové parametry, přetvárné charakteristiky atd. S postupem času, s narůstajícím sycením dochází ke změně zmíněných mechanických parametrů a bobtnání bentonitu, které v uzavřeném prostoru (např. v okolí UOS), způsobuje vývoj bobtnacího tlaku (viz 6.3.3.2 - Bobtnání.). Související změny sání, objemové hmotnosti (pórovitosti), napětí atp. mají vliv např. také na propustnost bariéry



a tepelné charakteristiky. Zhodnocení komplexní hydro-mechanické (HM) odezvy bariery je nutné provést vhodně sestaveným a kalibrovaným numerickým modelem. HM modelů existuje celá řada, pro jejich kalibraci se používají i průběhy závislostí jednotlivých parametrů (napětí/deformace/ číslo pórovitosti apod.) z vybraných laboratorních zkoušek (níže) ať již jako přímým vstup (materiálové charakteristiky) nebo pomocí zpětné analýza zkoušek a experimentů. Modelování HM chování bentonitu shrnuje Hokr a kol. (2022). Autoři také uvádí, že část vstupní parametrů pro modely lze získat přímo z laboratorních experimentů, ale některé lze určit pouze zpětnou analýzou z numerických modelování experimentů.

### 6.3.3.1 Pevnostní a přetvárné charakteristiky

HM parametry jsou obecně závislé na objemové hmotnosti sušiny a vlhkosti. Některé mechanické parametry lze příznivě ovlivnit (např. pevnost v tlaku) jejím zvýšením. Důsledkem bude však i zvýšení bobtnacího tlaku po nasycení.

#### Pevnost v prostém tlaku

Pevnost vzorku v prostém tlaku  $R_c$  (kPa) vyjadřuje mezní napětí při porušení za jednoosého tlakového namáhání. V případě plastických vzorků nemusí dojít k porušení a za mezní napětí se při laboratorním zkoušení považuje napětí, které způsobí 15 % vertikální deformaci vzorku.

Využití parametru může být relevantní pro stanovení únosnosti bentonitových bloků v počáteční fázi HÚ (kompaktovaný bentonit s počáteční vlhkostí).

#### Smykové vlastnosti

Smykové vlastnosti jsou klíčové pro stanovení únosnosti zemin, tedy i odolnosti bentonitových konstrukcí vůči mechanickému namáhání. Jde o parametry soudržnost  $c$  (kPa) a úhel vnitřního tření  $\phi$  (°). Podle podmínek stanovení, resp. na základě ne-uplatnění přenosu napětí vodou v pórech se rozlišují hodnoty efektivní či totální.

Stanovení smykových parametrů je možné krabicovou smykovou zkouškou (ČSN EN ISO 17892-10; efektivní parametry); triaxiální zkouškou (ČSN EN ISO 17892-8 a 9), popř. zkouškou v prostém tlaku (ČSN EN ISO 17892-7; totální soudržnost).

Smykové parametry jsou důležitým vstupem do HM modelů, neboť se používají pro popis chování materiálu.

#### Přetvárné vlastnosti

Pro stanovení vztahu deformací při namáhání materiálu (zemin) se stanovují tzv. přetvárné charakteristiky (modul deformační  $E_{def}$  (kPa), edometrický či Poissonovo číslo). Vztah svislého zatížení a způsobené jednoosé deformace (stlačení) se určuje v tzv. edometru (edometrický modul  $E_{oed}$  (kPa); Součinitel stlačitelnosti,  $C$  (-); ČSN EN ISO 17892-5). Vztah dvou či trojosého zatížení a deformací je možno stanovit v triaxiálním přístroji.

Pro na-sycené bentonity se jedná, při využití obdobných postupů měření deformace a zatížení, o zkoušky měření volného bobtnání (při nulovém zatížení) či mohou být aplikována jiná, konstantní zatížení („constant load test“). Tato zatížení se mohou, dle záměru zkoušky, po ustálení deformace vyvolané změnou zatížení bentonitu, měnit. Poslední možností je měření při konstantním objemu („constant volume test“) – více v 6.3.3.2 - Bobtnání.

Přetvárné parametry jsou důležitým vstupem do HM modelů, neboť jsou vstupem do konstitutivních modelů chování materiálu.

#### **Vliv na dlouhodobou bezpečnost:**

Porušení celistvosti bufferu, vznik diskontinuit, ztráta únosnosti vlivem zatížení obalovým souborem.

Porušení prostorového uspořádání, změna polohy UOS

Porušení bufferu vlivem nerovnoměrného zatížení (typicky nerovnoměrným bobtnáním)

#### **Dostupná data:**

Pevnost v tlaku bloků z B75 a Rokle, specifika přípravy a závislost na objemové hmotnosti byla řešena v projektu Výzkum vlastností materiálů pro bezpečné ukládání radioaktivních odpadů a vývoj postupů jejich hodnocení FR-TI1/362 (Vašíček a kol., 2013).

Komplexní problematikou mechanického chování bentonitů, homogenizací a numerickým modelováním se zabývá mezinárodní projekt „Bentonite mechanical evolution“ (BEACON; Euratom No. 745942). Dále, pro aplikace při zvýšených teplotách, také projekt „Numerické modelování a laboratorní charakterizace bentonitové bariéry v úložištích odpadu z jaderných zařízení v ČR“ (TAČR TK01010063). V projekt je mj. využíván český bentonit B75 a BCV.

Výstupem jsou informace „Deliverables“ (<https://www.beacon-h2020.eu/deliverables/>) a 2 články v přípravě – Svoboda a kol., (2022) a Najser a kol. (v přípravě).

#### **Nejistoty:**

Nebyl vybrán kandidátní materiál; omezené množství výsledků (objemové hmotnosti, stupeň nasycení, parametry).

Přírodní materiál – přirozená variabilita vlastností materiálu, typicky v závislosti na poloze v ložisku.

Postup průmyslové přípravy může měnit vlastnosti produktu (mletí, sušení, lisování, příměsí).

Hydroskopičnost → přijímání vlhkosti → změna vlastností již hotových výrobků během skladování (např. rozpadání tvárnic)

#### **Reference:**

ČSN EN 1926 Zkušební metody přírodního kamene – Stanovení pevnosti v prostém tlaku; 2007

ČSN EN ISO 17892-5 (721007) Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemín – Část 5: Zkouška stlačitelnosti v edometru postupným přitěžováním. Praha: Český normalizační institut. 2017

ČSN EN ISO 17892-7 (721007) Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemín – Část 7: Zkouška pevnosti v prostém tlaku. Praha: Český normalizační institut. 2018

ČSN EN ISO 17892-8 (721007) Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemín – Část 8: Stanovení pevnosti zemín nekonsolidovanou neodvodněnou triaxiální zkouškou. Praha: Český normalizační institut. 2018

- ČSN EN ISO 17892-9 (721007) Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemín – Část 9: Konsolidovaná triaxiální zkouška vodou nasycených zemín. Praha: Český normalizační institut. 2018
- ČSN EN ISO 17892-10 (721007) Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemín – Část 10: Krabicová smyková zkouška. Praha: Český normalizační institut. 2019
- HOKR A KOL. (2022): Metodiky modelování THMC procesů – shrnutí dosavadních znalostí, Průběžná zpráva TZ-612/2022, SÚRAO
- NAJSER J., MAŠÍN D., SVOBODA J., VAŠÍČEK R., HANUSOVÁ I., HAUSMANNOVÁ L., KRUIS J., KREJČÍ T., SUN H., (v přípravě). Homogenisation behavior of BCV bentonite – laboratory and numerical study; v přípravě
- SVOBODA J., MAŠÍN D., NAJSER J., VAŠÍČEK R., HANUSOVÁ I., HAUSMANNOVÁ L. (2022). BCV bentonite hydromechanical behaviour and modelling; Acta Geotechnica, manuscript no. AGEO-D-21-01152; v recenzním řízení
- VAŠÍČEK R., BEDRNÍKOVÁ E., ČERNÁ K., BARTAK D., ČERNOCHOVÁ K., PUSZTAI M., SVOBODA J., ŠACHLOVÁ Š., KAŠPAR V., KUČEROVÁ M., VEČERNÍK P., ZUNA M. (2022). Metodiky testování bentonitu, TZ590/2022, 2022, Praha
- VAŠÍČEK R., L. HAUSMANNOVÁ L., LEVOROVÁ M., HOLÍKOVÁ P., KAISR, Z. VENKRBEC Z., ČERVINKA R., P. VEČERNÍK P. GONDOLLI J., ŠTAMBERG K., DRTINOVÁ B., (2013). Závěrečná Zpráva Řešení Podetapy 4.1 Projektu FRTI1/362: Výzkum vlastností materiálů pro bezpečné ukládání radioaktivních odpadů a vývoj postupů jejich hodnocení FR-TI1/362. Centrum experimentální geotechniky, Fakulta stavební ČVUT.

### 6.3.3.2 Bobtnání

Bobtnavé materiály jako bentonity mají schopnost zvětšovat svůj objem sorbováním vody. Pokud je zabráněno změně objemu, je vyvíjen bobtnací tlak. Pokud je naopak změna objemu umožněna bez jakéhokoliv odporu, je možné měřit maximální objem do kterého je bentonit schopen v daných podmínkách nabobtnat. Jednoduchou zkouškou pro stanovení maximálního objemu po nabobtnání je stanovení „swell indexu“. Měření bobtnacích tlaků je přístrojově i časově výrazně náročnější.

#### Swell index

##### **Popis:**

Bobtnací schopnosti bentonitu se názorně získávají bobtnáním zvolené navážky bentonitu v odměrném válci naplněném destilovanou vodou o zvoleném objemu. Navážka vysušeného bentonitu pro jednu zkoušku činí 2 g ((ml/2g); ASTM D5890 – 11). Zkouška spočívá v postupném sypání navážky bentonitu po dávkách. Rozhraní bentonitové suspenze a vody je odečítáno po 24 h od vsypání poslední dávky bentonitu. Doporučením je provádět odečty i po delších dobách – po úplném nabobtnání (48 h, 30 dní atp.; Vašíček a kol., 2022). Test podává také informaci k eroznímu chování bentonitu. Zaznamenává se přítomnost koloidních částic, které k erozi vedou.

**Vliv na dlouhodobou bezpečnost:**

Pro snadné uzavírání volných prostor, spar a samohojení ploch nespojitosti je příznivé, aby bobtnací schopnost byla co nejvyšší.

Přítomnost koloidních částic vede k erozi bentonitu, parametr tedy napomáhá k hodnocení tohoto jevu.

Parametr může být součástí systému kontroly kvality materiálu při výstavbě HÚ.

**Dostupná data:**

Swell index dříve zkoumaných českých bentonitů (Rokle, B75, Sabenil 65) uvádí např. Vašíček a kol. (2013). Charakterizaci bentonitu BCV\_2017 je ve zprávách Červinka a kol. (2019) a Vašíček a kol. (2019), kde jsou také hodnoty pro BCV\_2017 a jeho „homoionní formy“.

Vliv dlouhodobého zatížení 150 °C (BCV\_2017) je zkoumán v rámci projektu H2020 EURAD (č. 847593), pracovní část HITEC (Influence Of Temperature On Clay-Based Material Behaviour; Kašpar a kol., 2021; Černochová a kol., 2021)

Vlivem dlouhodobého zatížení 200 °C (BCV\_2017) se zabývá projekt TAČR Inženýrská bariera 200C (TK01030031; Laufek a kol., 2021).

*Tab. 2: Přehled výsledků swell indexu studovaných materiálů (ml/2 g) a výchozího bentonitu. (Vašíček a kol., 2019).*

Odečet/ BCV	Forma	Na-BCV	Na/Ca-BCV	Ca-BCV	BCV
SI_24 h (ml/2g)		22,8 ± 1,3	18,2 ± 0,5	7,5 ± 0,5	7,9 ± 0,5
SI_48 h (ml/2g)		23,6 ± 1,5	19,0 ± 0,8	7,5 ± 0,5	

**Nejistoty:**

Nejistoty jsou vztaženy k nejistotám stanovení – použitých laboratorních metod. Metody a jejich využití pro bentonity shrnují Vašíček a kol. (2022).

**Reference:**

ASTM D 5890–11: Standard Test Method for Swell Index of Clay Mineral Component of Geosynthetic Clay Liners, 2011

ČERNOCHOVÁ K., KAŠPAR V., KRUIS J., MAŠÍN D., NAJSER J., SVOBODA, J., VAŠÍČEK, R. (2021): WP 7 HITEC: Souhrn výstupů českých stran projektu EURAD, SÚRAO TZ 562/2021. Praha

ČERVINKA R., VAŠÍČEK R., VEČERNÍK P., KAŠPAR V. (2019): Kompletní charakterizace bentonitu BCV 2017. SÚRAO Technická zpráva 419/2019, Česká republika, 33 s.

KAŠPAR, V., ŠACHLOVÁ, Š., HOFMANOVÁ, E.; KOMÁRKOVÁ, B., HAVLOVÁ, V.; APARICIO, C.; ČERNÁ, K., BARTAK, D., HLAVÁČKOVÁ, V. (2021). Geochemical, Geotechnical, and Microbiological Changes in Mg/Ca Bentonite after Thermal Loading at 150 °C. Minerals 2021, 11, 965. <https://doi.org/10.3390/min11090965>

LAUFEK, F.; HANUSOVÁ, I.; SVOBODA, J.; VAŠÍČEK, R.; NAJSER, J.; KOUBOVÁ, M.; ČURDA, M.; PTICEN, F., VACULÍKOVÁ, L., SUN H., MAŠÍN D. (2021). Mineralogical, Geochemical and Geotechnical Study of BCV 2017 Bentonite—The Initial State and the State following Thermal Treatment at 200 °C. Minerals. 2021, 11(8), ISSN 2075-163X.

VAŠÍČEK, R.; LEVOROVÁ, M., ČERVINKA, R., HAUSMANNOVÁ, L.; KAISR, Z.; VENKRBEC, Z. (2013). Závěrečná zpráva řešení Podetapy 4.2 projektu FRT11/362: Výzkum vlastností materiálů pro bezpečné ukládání radioaktivních odpadů a vývoj postupů jejich hodnocení FR-T11/362. Centrum experimentální geotechniky, Fakulta stavební ČVUT.

VAŠÍČEK, R., HOFMANOVÁ E., SVOBODA J., ČERVINKA, R. (2019). Geotechnická charakterizace homoionních forem bentonitu bcv 2017 závěrečná zpráva – samostatná příloha. TZ SÚRAO 425/2019. Praha

## **Bobtnací tlak**

### **Popis:**

Bobtnací tlak je generován bobtnavým materiálem, jemuž je při kontaktu s vodou bráněno ve změně objemu. V této části je míněn parametr měřený za konstantního objemu vzorku po celou dobu zkoušky („Constant volume test“). Při využití postupů bobtnacích testů, kdy není po celou dobu objem konstantní, může dojít, v závislosti na pořadí jednotlivých kroků zkoušky (zatížení, odtížení, sycení), k dosažení rozdílných výsledků, jak uvádí Svoboda a kol. (2022). Bobtnací tlak je tedy úzce spjat s umožněnou deformací, tedy i výslednou objemovou hmotností. Významově se oblast částečně překrývá s částí 6.3.3.1 - Pevnostní a přetvárné charakteristiky.

U bentonitu je parametr ovlivněn převážně obsahem smektitů, objemovou hmotností sušiny (tedy zhutněním) a také typem výměnného kationtu. S rostoucí objemovou hmotností sušiny bobtnací tlak roste exponenciálně. Vyšší bobtnací tlak je pro bentonity s vyšším podílem smektitu a pro bentonity s převahou Na<sup>+</sup> v mezivrstvi.

### **Dostupná data:**

Dostupná data z výzkumu českých bentonitů shrnuje Hausmannová a kol. (2018):

Vliv dlouhodobého zatížení 150 °C v suchém i plně nasyceném stavu (BCV\_2017) je zkoumán v rámci projektu H2020 EURAD (č. 847593), pracovní část HITEC (Influence Of Temperature On Clay-Based Material Behaviour). Součástí prací je měření za vyšších teplot (40, 60, 90 a 120 °C). Černochová a kol. (2021) uvádí výsledky po dvou letech řešení projektu.

Vlivem dlouhodobého zatížení 200 °C (BCV\_2017) se zabývá projekt TAČR Inženýrská bariera 200C (TK01030031); Laufek a kol., 2021)

### **Nejistoty:**

Variabilita suroviny – podle ložiska i polohy v ložisku, jde přírodní materiál.

Postup zpracování po vytěžení.

Vliv akcesorických minerálů (typ, množství).

Dlouhodobá stabilita materiálu při dlouhodobém vystavení podmínkám HÚ (teplota, geochemie).

Konstrukce bufferu (pelety, bloky, objem mezer, spar) – vliv na výslednou homogenitu bariéry jako celku a tím i distribuci botnacího tlaku, a tudíž i těsnicí schopnosti.

#### **Vliv na dlouhodobou bezpečnost:**

Při nízkém tlaku nebezpečí nedostatečného zahojení spar a mezer – zachování preferenčních cest.

Nadměrné namáhání/ porušení UOS (tlak na UOS).

Porušení prostorového uspořádání, změna polohy UOS.

Porušení bufferu vlivem nerovnoměrného zatížení nerovnoměrným bobtnáním.

#### **Reference:**

ČERNOCHOVÁ K., KAŠPAR V., KRUIS J., MAŠÍN D., NAJSER J., SVOBODA, J., VAŠÍČEK, R. (2021): WP 7 HITEC: Souhrn výstupů českých stran projektu EURAD, SÚRAO TZ 562/2021. Praha

ČERVINKA R., VAŠÍČEK R., VEČERNÍK P., KAŠPAR V. (2019): Kompletní charakterizace bentonitu BCV 2017. SÚRAO Technická zpráva 419/2019, Česká republika, 33 s.

HAUSMANNOVÁ, L., HANUSOVÁ, I., A DOHNÁLKOVÁ, M. (2018). Summary of the research of Czech bentonites for use in the deep geological repository – up to 2018, SÚRAO 309/2018/ENG Kašpar, V., Šachlová, Š., Hofmanová, E.; Komárková, B., Havlová, V.; Aparicio, C.; Černá, K., Bartak, D., Hlaváčková, V. (2021). Geochemical, Geotechnical, and Microbiological Changes in Mg/Ca Bentonite after Thermal Loading at 150 °C. Minerals 2021, 11, 965. <https://doi.org/10.3390/min11090965>

KARNLAND, O.; OLSSON, S.; NILSSON, U. (2006). SKB Technical Report TR-06-30: Mineralogy and Sealing Properties of Various Bentonites and Smectite-Rich Clay Materials; Svensk Kärnbränslehantering AB: Stockholm, Sweden, 2006; p. 112.

LAUFEK, F.; HANUSOVÁ, I.; SVOBODA, J.; VAŠÍČEK, R.; NAJSER, J.; KOUBOVÁ, M.; ČURDA, M.; PTICEN, F., VACULÍKOVÁ, L., SUN H., MAŠÍN D. (2021). Mineralogical, Geochemical and Geotechnical Study of BCV 2017 Bentonite—The Initial State and the State following Thermal Treatment at 200 °C. Minerals. 2021, 11(8), ISSN 2075-163X.

SVOBODA J., MAŠÍN D., NAJSER J., VAŠÍČEK R., HANUSOVÁ I., HAUSMANNOVÁ L. (2022). BCV bentonite hydromechanical behaviour and modelling; Acta Geotechnica, manuscript no. AGEO-D-21-01152; v recenzním řízení

### **6.3.4 Hydraulické vlastnosti**

#### **6.3.4.1 Sání bentonitu**

##### **Popis:**

Za hlavní hnací sílu pohybu vody v nenasyceném jílu se obvykle považuje gradient tlaku pórové vody. Celkové sání je popsáno retenční křivkou popisující závislost sacího tlaku na hmotnostní vlhkosti  $w$ . Hodnota sacího tlaku  $s$  (MPa) se počítá pomocí Kelvinovy rovnice:

$$s = -10^{-6} \cdot \frac{R \cdot T}{V_w} \ln\left(\frac{RH}{100}\right), \quad (3)$$

kde  $R$  je univerzální plynová konstanta ( $= 8,314 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$ ),  $T$  (K) je absolutní teplota,  $V_w$  je molární objem vody ( $= 1,803 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{mol}$  při atmosférickém tlaku a laboratorní teplotě) a  $RH$  (%) je relativní vlhkost. Pro stanovení retenčních křivek se používají dvě metodiky lišící se v přístupu nastavení různé relativní vlhkosti (Vašíček a kol., 2022):

- přípravou vzorků o různé  $w$  – bloková metoda (Kašpar a kol., 2021)
- udržení různé  $RH$  pomocí různých roztoků v uzavřené nádobě – komorová metoda (Delage a kol., 1998).

### **Vliv na dlouhodobou bezpečnost:**

Ovlivnění rychlosti transportu vody.

### **Dostupná data:**

Měření retenčních křivek českých bentonitů se zabývají zejména týmy z Přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy (PřF UK) a ÚJV Řež. V laboratořích PřF UK jde mj. o součást měření sady vstupních parametrů při vývoji numerického modelu THM procesů v bentonitové bariéře. V souvislosti s projektem Mock-Up-Josef byl zkoumán materiál B75 (např. Sun a kol., 2018).

Charakterizaci bentonitu BaM\_2014 a BCV\_2017 uvádí tým ÚJV ve zprávách Večerník a kol. (2017) a Červinka a kol. (2019). BCV\_2017 je také zkoumán na PřF UK v rámci projektu Inženýrská bariéra 200C (viz dále).

Vliv dlouhodobého zatížení 150 °C (BCV\_2017) je zkoumán v rámci projektu H2020 EURAD (č. 847593), pracovní část HITEC (Influence Of Temperature On Clay-Based Material Behaviour; Kašpar a kol., 2021; Černochová a kol., 2021)

Vlivem dlouhodobého zatížení 200 °C (BCV\_2017) se zabývá projekt TAČR Inženýrská bariéra 200C (TK01030031). Stanovení retenčních křivek (PřF UK) je prováděno metodou rovnováhy par (vstupní charakterizace a po dlouhodobém tepelném zatížení 200°C; Laufek a kol., 2021).

Červinka a kol. (2019) uvádí stanovení retenčních čar pomocí blokové metody (Villar 2007, Večerník a kol. 2014). Čáry byly stanoveny pro bentonit BCV 2017 nalisovaný na tři různé suché objemové hmotnosti:  $1400 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $1600 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  a  $1800 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  (vzorky označeny BCV 1400, BCV 1600 a BCV 1800). Retenční čáry byly vyneseny jako závislost sacího tlaku na hmotnostní vlhkosti a následně byly porovnány s dříve stanovenými retenčními čarami pro bentonit BaM 2014 (Večerník a kol. 2017). Výsledky jsou shrnuty v následujícím grafu:

Z výsledků vyplývá, že se retenční čáry bentonitu BCV v závislosti na hmotnostní vlhkosti v podstatě neliší. Dále vyplývá, že bentonit BCV dosahuje při nízkých vlhkostech vyšších sacích tlaků než bentonit BaM; při vyšších vlhkostech jsou sací tlaky srovnatelné Červinka a kol. (2019).

Kašpar a kol. (2021) Je vidět, že schopnost bentonitu BCV zadržovat vodu při tepelném zatížení klesá. Největší rozdíl byl zjištěn mezi nezatíženým a zatíženým vzorkem; doba tepelného zatížení má zřejmě menší vliv. Tento trend byl výraznější pro nižší obsah vody.

Ukazuje zanedbatelný vliv počáteční hustoty na obsah vody, což lze vysvětlit strukturou dvojité pórovitosti typickou pro bentonity (Romero a kol., 2011; Mašín a Khalili, 2016). Při vysokém sání se voda soustřeďuje převážně v mikropórech uvnitř agregátů, které nejsou zhutněním významně ovlivněny (Sun a kol., 2018). Retenční křivky ukazovaly na nižší retenční schopnost tepelně ošetřených vzorků, což naznačovalo neúplnou rehydrataci tepelně ošetřeného bentonitu vystaveného vzdušné vlhkosti a rozdíl v chování materiálu ve srovnání s bentonitem vystaveným kapalně vodě.

#### Reference:

- ČERNOCHOVÁ K., KAŠPAR V., KRUIS J., MAŠÍN D., NAJSER J., SVOBODA, J., VAŠÍČEK, R. (2021): WP 7 HITEC: Souhrn výstupů českých stran projektu EURAD, SÚRAO TZ 562/2021. Praha
- ČERVINKA R., VAŠÍČEK R., VEČERNÍK P., KAŠPAR V. (2018): Kompletní charakterizace bentonitu BCV 2017. SÚRAO Technická zpráva 419/2019, Česká republika, 33 s.
- DELAGE, P.; HOWAT, M.D.; CUI, Y.J. (1998). The relationship between suction and swelling properties in a heavily compacted unsaturated clay. *Eng. Geol.* 1998, 50, 31–48.
- KAŠPAR, V., ŠACHLOVÁ, Š., HOFMANOVÁ, E.; KOMÁRKOVÁ, B., HAVLOVÁ, V.; APARICIO, C.; ČERNÁ, K., BARTAK, D., HLAVÁČKOVÁ, V. (2021). Geochemical, Geotechnical, and Microbiological Changes in Mg/Ca Bentonite after Thermal Loading at 150 °C. *Minerals* 2021, 11, 965. <https://doi.org/10.3390/min11090965>
- LAUFEK, F.; HANUSOVÁ, I.; SVOBODA, J.; VAŠÍČEK, R.; NAJSER, J.; KOUBOVÁ, M.; ČURDA, M.; PTICEN, F., VACULÍKOVÁ, L., SUN H., MAŠÍN D. (2021). Mineralogical, Geochemical and Geotechnical Study of BCV 2017 Bentonite—The Initial State and the State following Thermal Treatment at 200 °C. *Minerals*. 2021, 11(8), ISSN 2075-163X.
- MAŠÍN, D.; KHALILI, N. (2016) Swelling phenomena and effective stress in compacted expansive clays. *Can. Geotech. J.* 2016, 53, 134–147
- ROMERO, E.; DELLA VECCHIA, G.; JOMMI, C. (2011) An insight into the water retention properties of compacted clayey soils. *Géotechnique* 2011, 61, 313–328.
- SKB (2010). Buffer, backfill and closure process report for the safety assessment SR-Site. SKB TR 10-47. Svensk Kärnbränslehantering AB
- SUN, H.; MAŠÍN, D.; NAJSER, J.; NEDĚLA, V.; NAVRÁTILOVÁ, E. (2018) Bentonite microstructure and saturation evolution in wetting–drying cycles evaluated using ESEM, MIP and WRC measurements. *Géotechnique* 2018, 69, 713–726
- VAŠÍČEK R., BEDRNÍKOVÁ E., ČERNÁ K., BARTAK D., ČERNOCHOVÁ K., PUSZTAI M., SVOBODA J., ŠACHLOVÁ Š., KAŠPAR V., KUČEROVÁ M., VEČERNÍK P., ZUNA M. (2022). Metodiky testování bentonitu, TZ590/2022, 2022, Praha
- VEČERNÍK P., HOFMANOVÁ E., PECKOVÁ A., KAŠPAR V., TRPKOŠOVÁ D. (2017): Vývoj aparatur pro charakterizaci materiálů inženýrských bariér hlubinného úložiště radioaktivních odpadů a vyhořelého jaderného paliva - TA04021378. Zpráva ÚJV Řež, a. s. číslo 14671.
- VEČERNÍK P., TRPKOŠOVÁ D., HOFMANOVÁ E. (2014): Vývoj aparatur pro charakterizaci materiálů inženýrských bariér hlubinného úložiště radioaktivních odpadů a vyhořelého jaderného paliva - TA04021378. Zpráva ÚJV Řež, a. s. číslo 14422.



VILLAR, M. V. (2007): Water retention of two natural compacted bentonites. *Clays and Clay Minerals*, vol. 55, No. 3, 311-322.

### 6.3.4.2 Hydraulická vodivost

#### Popis:

Součinitel hydraulické vodivosti  $k$  ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) je zásadní pro transport vody za nasycených podmínek. Transport vody v kapalně fázi je řízen gradientem tlaku vody. Hydraulická vodivost  $k$  (součinitel propustnosti; koeficient filtrace) je funkcí složení bentonitu, čísla pórovitosti, koncentrace iontů v pórové vodě a teploty  $T$ . Rovnice pro ustálené proudění, dle Darcyho:

$$q = A k i, \quad (4)$$

Kde  $q$  je průtok ( $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ );  $A$  plocha kolmá na směr proudění ( $\text{m}^2$ ) a  $i$  hydraulický gradient ( $\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$ )

U bentonitu je tento parametr ovlivněn převážně objemovou hmotností sušiny (tedy jejím zhuštěním), obsahem smektitů a také typem výměnného kationtu. S rostoucí objemovou hmotností sušiny (s vyšším stupněm zhuštění) exponenciálně klesá hydraulická vodivost. Vyšší hydraulická vodivost (větší propustnost materiálu) je také udávána pro bentonity s nižším podílem smektitu a pro bentonity s převahou dvojmocných kationtů v mezivrstvi.

#### Vliv na dlouhodobou bezpečnost:

Zvýšení propustnosti bufferu vlivem dlouhodobé interakce s okolím (teplota, voda, další materiály)

#### Dostupná data:

Dostupná data z výzkumu českých bentonitů shrnuje Hausmannová a kol. (2018): *České bentonity mají stejný typ mezivrstevních kationtů (převaha  $\text{Ca}^{2+}$  a  $\text{Mg}^{2+}$ ) a s přihlédnutím na rozptyl měření jsou jejich hodnoty hydraulické vodivosti srovnatelné. Oproti tomu MX-80, který má převahu sodných kationtů v mezivrstvi, má hodnoty hydraulické vodivosti znatelně nižší.*

Vliv dlouhodobého zatížení  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$  v suchém i plně nasyceném stavu (BCV\_2017) je zkoumán v rámci projektu H2020 EURAD (č. 847593), pracovní část HITEC (Influence Of Temperature On Clay-Based Material Behaviour). Součástí prací je měření za vyšších teplot ( $40$ ,  $60$ ,  $90$  a  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Černochová a kol. (2021) uvádí výsledky po dvou letech řešení projektu.

Vlivem dlouhodobého zatížení  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  (BCV\_2017) se zabývá projekt TAČR Inženýrská bariéra 200C (TK01030031).

#### Nejistoty:

Variabilita suroviny – podle ložiska i polohy v ložisku, jde přírodní materiál.

Postup zpracování po vytěžení.

Vliv akcesorických minerálů (typ, množství).

Parametry a konstrukční řešení bufferu.

Vliv dlouhodobých interakcí s okolím (teplota, voda, další materiály).

**Reference:**

- ČERNOCHOVÁ K., KAŠPAR V., KRUIS J., MAŠÍN D., NAJSER J., SVOBODA, J., VAŠÍČEK, R. (2021): WP 7 HITEC: Souhrn výstupů českých stran projektu EURAD, SÚRAO TZ 562/2021. Praha
- ČERVINKA R., VAŠÍČEK R., VEČERNÍK P., KAŠPAR V. (2018): Kompletní charakterizace bentonitu BCV 2017. SÚRAO Technická zpráva 419/2019, Česká republika, 33 s.
- ČSN EN ISO 17892-11 (721007) Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemín – Část 11: Stanovení propustnosti. Praha: Český normalizační institut. 2019
- DELAGE, P.; HOWAT, M.D.; CUI, Y.J. (1998). The relationship between suction and swelling properties in a heavily compacted unsaturated clay. *Eng. Geol.* 1998, 50, 31–48.
- DIXON D. A., GRAHAM J., GRAY M. N. (1999). Hydraulic conductivity of clays in confined tests under low hydraulic gradients. *Canadian Geotechnical Journal*, 36, pp 815–825.
- HANSBO S. (1960). Consolidation of clay, with special reference to influence of vertical drains: a study made in connection with full-scale investigations at Skå-Edeby. Ph. D. thesis. Chalmers University of Technology, Gothenburg.
- HAUSMANNOVÁ, L., HANUSOVÁ, I., A DOHNÁLKOVÁ, M. (2018). Summary of the research of Czech bentonites for use in the deep geological repository – up to 2018, SÚRAO 309/2018/ENG Kašpar, V., Šachlová, Š., Hofmanová, E.; Komárková, B., Havlová, V.; Aparicio, C.; Černá, K., Bartak, D., Hlaváčková, V. (2021). Geochemical, Geotechnical, and Microbiological Changes in Mg/Ca Bentonite after Thermal Loading at 150 °C. *Minerals* 2021, 11, 965. <https://doi.org/10.3390/min11090965>
- KARNLAND, O.; OLSSON, S.; NILSSON, U. (2006). SKB Technical Report TR-06-30: Mineralogy and Sealing Properties of Various Bentonites and Smectite-Rich Clay Materials; Svensk Kärnbränslehantering AB: Stockholm, Sweden, 2006; p. 112.
- LAUFEK, F.; HANUSOVÁ, I.; SVOBODA, J.; VAŠÍČEK, R.; NAJSER, J.; KOUBOVÁ, M.; ČURDA, M.; PTICEN, F., VACULÍKOVÁ, L., SUN H., MAŠÍN D. (2021). Mineralogical, Geochemical and Geotechnical Study of BCV 2017 Bentonite—The Initial State and the State following Thermal Treatment at 200 °C. *Minerals*. 2021, 11(8), ISSN 2075-163X.
- VAŠÍČEK R., BEDRNÍKOVÁ E., ČERNÁ K., BARTAK D., ČERNOCHOVÁ K., PUSZTAI M., SVOBODA J., ŠACHLOVÁ Š., KAŠPAR V., KUČEROVÁ M., VEČERNÍK P., ZUNA M. (2022). Metodiky testování bentonitu, TZ590/2022, 2022, Praha
- VEČERNÍK P., HOFMANOVÁ E., PECKOVÁ A., KAŠPAR V., TRPKOŠOVÁ D. (2017): Vývoj aparatur pro charakterizaci materiálů inženýrských bariér hlubinného úložiště radioaktivních odpadů a vyhořelého jaderného paliva - TA04021378. Zpráva ÚJV Řež, a. s. číslo 14671.
- VEČERNÍK P., TRPKOŠOVÁ D., HOFMANOVÁ E. (2014): Vývoj aparatur pro charakterizaci materiálů inženýrských bariér hlubinného úložiště radioaktivních odpadů a vyhořelého jaderného paliva - TA04021378. Zpráva ÚJV Řež, a. s. číslo 14422.
- VILLAR, M. V. (2007): Water retention of two natural compacted bentonites. *Clays and Clay Minerals*, vol. 55, No. 3, 311-322.

ROMERO, E.; DELLA VECCHIA, G.; JOMMI, C. (2011) An insight into the water retention properties of compacted clayey soils. *Géotechnique* 2011, 61, 313–328.

SKB (2010). Buffer, backfill and closure process report for the safety assessment SR-Site. SKB TR 10-47. Svensk Kärnbränslehantering AB

SUN, H.; MAŠÍN, D.; NAJSER, J.; NEDĚLA, V.; NAVRÁTILOVÁ, E. (2018) Bentonite microstructure and saturation evolution in wetting–drying cycles evaluated using ESEM, MIP and WRC measurements. *Géotechnique* 2018, 69, 713–726

### 6.3.4.3 Plynopropustnost

#### Popis:

Tlumičím materiálem na bázi bentonitu se chová v principu shodně jako ostatní materiály s velmi nízkou propustností. Transport plynu je tedy ovlivněn nejen hydraulickými a mechanickými vlastnostmi (vodivost, porozita, pevnost,...), ale i vlastním stavem (stupeň nasycení, pórový tlak, napjatost,...), případně jeho historií.

Druh plynu, rychlost vzniku plynu a množství vzniklého plynu ovlivňuje významným způsobem transportní chování. Tyto vlivy určují, jaký transportní mód bude dominantní, v jaké fázi uzavírání úložiště. Další procesy, které mají vliv na transport plynu v úložišti a které je nutné brát v úvahu jsou sorpce, rozpouštění a vyloučení plynu v/z pórové vody a fázové přechody vody. Podrobně se všemi transportními módy a procesy ovlivňující transport plynu v úložišti zabývá State-of-the-Art WP GAS z projektu EURAD EURAD (Levasseuer, a kol., 2021), kde jsou popsány jednotlivé scénáře a vlivy. Pro hodnocení a předpověď plynopropustnosti je tedy nutné znát celou sadu zmíněných parametrů.

#### Vliv na dlouhodobou bezpečnost:

Předpokládá se, že zejména díky anaerobní korozi kovů bude  $H_2$  hlavním plynem, který se zde bude v průběhu životnosti úložiště vytvářet. Jílová bariéra bude mít po svém kompletním nasycení velmi nízkou propustnost, a tak se  $H_2$  může akumulovat v místě mezi přebalem a jílovou bariérou. To může vést k tlakům přesahujícím odolnost jílu a k poškození celého systému inženýrských bariér (Galle a Tanai 1998). Akumulace plynu generovaného v prostoru úložného souboru může ovlivnit funkci tlumičímho materiálu následovně (Popp et al. 2009):

- Průraz (mechanické roztlačení materiálu) plynem může vést k vytvoření stálých cest skrz bariéru, a tím prakticky negovat funkci bariéry. Pokud tlumičím materiál nedovolí kontrolovaný únik plynu, může dojít k výraznému nárůstu tlaku a následnému mechanickému poškození systému bariér či hostitelského prostředí.
- Plyn může způsobit desaturaci tlumičímho materiálu.
- Plyn může "tlačit" vodu s radionuklidy skrz tlumičím materiál podél preferenčních cest (včetně cest jím vytvořených).
- Difúze plynů, které jsou buď přímo radioaktivní, nebo jsou pro radionuklidy nosiči, může vést k významnější migraci radionuklidů do dalších částí systému než při uvážení pouze rozpuštěných specií v pórové vodě bentonitu a jejich difúzi v důsledku koncentračního gradientu.

Tyto scénáře jsou navázány na vlastnosti jednotlivých částí systému inženýrských bariér a hostitelského prostředí.

### **Dostupná data:**

V zahraniční literatuře lze nalézt velké množství prací, které se zabývají transportem plynu v bentonitech s ohledem na EBS. Největším uceleným zdrojem poznatků jsou výstupy evropského projektu FORGE (<https://www.bgs.ac.uk/forge/reports.html>). Mezi hlavní autory pak patří tým BGS (Horseman, Harrington et al., 1999) a CIEMAT (Villar et al. 2012). Z hlediska ČR jsou zejména zajímavé výsledky druhého týmu (v rámci projektu FEBEX a FORGE), neboť pracuje s bentonitem podobného typu, jako se nachází v ČR.

Nejaktuálnější a nejucelenější poznatky, data a studie jsou shrnuty v již zmíněné State-of-the-Art WP GAS z projektu EURAD (Levasseuer, a kol., 2021).

Výzkum zabývající se plynopropustností českých bentonitů byl prováděn v rámci projektu Výzkumná podpora pro bezpečnostní hodnocení hlubinného úložiště, dílčí projekt: Experimentální hodnocení plynopropustnosti inženýrských bariér hlubinného úložiště. V tomto projektu se prováděly experimentální laboratorní zkoušky plynopropustnosti na přirozeně vlhkém a plně nasyceném bentonitu BaM (Svoboda, 2019) a s vodíkem (Mendoza, 2019).

Na českém bentonitu BaM byly provedeny laboratorní testy plynopropustnosti na přirozeně vlhkém materiálu. Hodnoty relativní propustnosti jsou závislé na objemové hmotnosti materiálu.

Dále se prováděly průrazové testy, které měly za cíl ověřit integritu materiálu (nasycené homogenní a nehomogenní vzorky). Po průrazu (vysoký injektážní tlak plynu – cca 13 MPa) byly vzorky syceny po dobu 3 měsíců a byla změřena hydraulická vodivost a bobtnací tlak. Celý zatěžovací cyklus se opakoval (sycení – průraz). Celkem byly provedeny 4 zatěžovací cykly. Z naměřených dat bylo zjištěno, že po průrazech a znovunasyčení materiálu nedochází k negativnímu ovlivnění jeho těsnících vlastností. A to jak pro homogenní vzorky, tak i pro nehomogenní vzorky (s uměle vytvořenou podélnou spárou). (Svoboda, 2019)

Nicméně tento výzkum na českých bentonitech je na začátku a získaná data z dosavadních laboratorních testů jsou prvním krokem pro komplexnější a obsáhlejší výzkum vlastností českých bentonitů z hlediska transportu plynu. V současnosti běží projekt EURAD, kde v WP GAS je zapojena česká skupina (ČVUT, ÚJV) zabývající se plynopropustností a problematikou transportu plynu v hlubinném úložišti. V rámci projektu jsou navrženy experimentální laboratorní testy na (nejen) českém bentonitu BCV, které by měly značnou měrou přispět k poznání transportního chování českého bentonitu.

### **Nejistoty:**

Nejistoty jsou spojeny s nedostatkem experimentálních dat na českých bentonitech.

Obecně ve výzkumu vlivu vzniku plynu v hlubinném úložišti na jeho bezpečnost chybí především převedení experimentálních laboratorních výsledků do reálného měřítka. S tím souvisí také doposud nedostatečné porozumění mechanickému chování proudění plynu v bentonitech.

Jedním z cílů projektu EURAD WP GAS je odpovědět na otázku, zda při výskytu průrazů dojde k narušení integrity bariéry a ovlivnění jejích těsnících funkcí.

**Reference:**

- BOUDREAU, B. (1996). The diffusive tortuosity of fine-grained unlithified sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 60 (issue 16), 3139-3142. doi:10.1016/0016-7037(96)00158-5
- GALLÉ, C., TANAI, K. (1998): Evaluation of Gas Transport Properties of Backfill Materials for Waste Disposal: H<sub>2</sub> Migration Experiments in Compacted Fo-Ca Clay. *Clays and Clay Minerals*. 1998, vol. 46, issue 5, s. 498-508. DOI: 10.1346/CCMN.1998.0460503.
- GRATHWOHL, P. (1998). Diffusion in natural porous media: contaminant transport, sorption/desorption and dissolution kinetics, by Peter Grathwohl (1. vyd.). London: Kluwer Academic Publishers.
- HORSEMAN, S.T., J.F. HARRINGTON A P. SELLIN. (1999) Gas migration in clay barriers. *Engineering Geology*. 1999, vol. 54, 1-2, s. 139-149. DOI: 10.1016/S0013-7952(99)00069-1. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0013795299000691>
- LENORMAND, R., TOUBOUL, E., & ZARCONI, C. (1988). Numerical models and experiments on immiscible displacements in porous media. *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 189, 165-187. doi:10.1017/S0022112088000953
- LEVASSEUER, S., COLLIN, F., DANIELS, K., DYMITROWSKA, M., HARRINGTON, J., JACOBS, E., . . . WENDLING, J. (2021). Initial State-of-the-Art on Gas Transport in Clayey Materials: Deliverable D6.1 of the HORIZON 2020 project EURAD, Workpackage Gas. EC Grant agreement no: 847593.
- MENDOZA MIRANDA, A. N. (2019): Hydrogen transport experiments in bentonit. MS SÚRAO, TZ 383/2019/EN. Prague.
- POPP, T. (2009) FORGE D3.1 State of the art report on gas transport trough interfaces, Institut für Gebirgsmechanik
- SVOBODA J., VAŠÍČEK R., ŠŤÁSTKA J., NÁDHERNÁ D., PACOVSKÁ D., PACOVSKÝ J. (2019). Experimentální hodnocení plynopropustnosti inženýrských bariér hlubinného úložiště – Závěrečná zpráva – MS SÚRAO, ZZ 384/2019, Praha.
- VILLAR, M.V., GUTIÉRREZ-RODRIGO, V., MARTÍN, P.L. ROMERO, F.J., BARCALA, J.M. (2012): Results of the tests on bentonite (Part 2). CIEMAT Technical Report CIEMAT/DMA/2G207/07/12. 60pp.

### 6.3.5 Chemické, mineralogické a strukturní vlastnosti

#### 6.3.5.1 Chemické a mineralogické složení

**Popis:**

Chemické složení (tj. zastoupení jednotlivých hlavních a vedlejších prvků) bentonitu je obvykle hodnoceno na základě silikátové analýzy. Tato běžná metoda spočívá v převedení vzorku do roztoku (rozpuštění v kyselinách nebo tavení s vhodným činidlem) a stanovení obsahu jednotlivých oxidů pomocí gravimetrie, fotometrie nebo s využitím (F)AAS (Hausmannová et al. 2018).

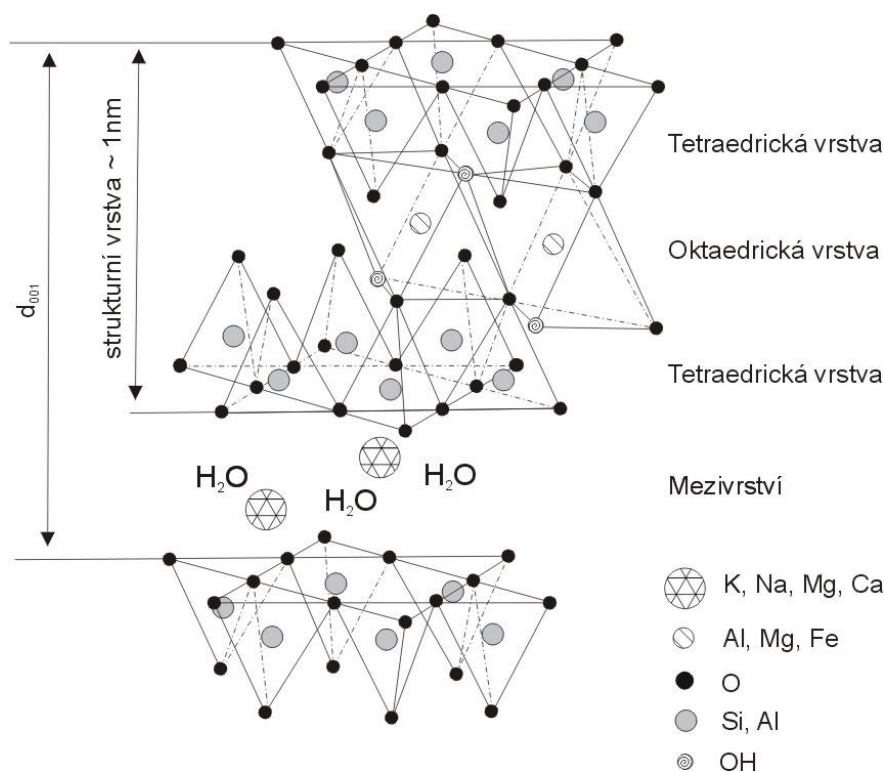
Přehled výsledků silikátových analýz je uveden ve zprávě Hausmannová et al. (2018) – viz následující tabulka.

Tab. 3 Výsledky silikátové analýzy pro české bentonity. Reference: Rokle – Křížová et al. (2010), B75 – Červinka a Hanuláková (2013), BAM – Červinka a Vejsadů (2015), BCV – Červinka et al. (2018) Hodnoty v závorce byly stanoveny samostatně a nejsou započítány do sumy silikátové analýzy.

Oxidy (% hm. suš.)	Rokle	B 75	BAM	BCV
-H <sub>2</sub> O	9.83	-	-	-
+H <sub>2</sub> O	6.71	-	-	-
SiO <sub>2</sub>	43.72	51.91	49.99	49.75
TiO <sub>2</sub>	4.17	2.28	3.1	3.04
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.85	15.52	14.56	14.8
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.47	8.89	12.22	11.11
FeO	0.11	2.95	(4.79)	<0.1
MnO	0.14	0.108	0.12	0.21
CaO	2.66	4.6	3.11	3.1
MgO	2.13	2.22	3.16	2.5
K <sub>2</sub> O	0.94	1.27	0.9	1.15
Na <sub>2</sub> O	0.26	1.21	0.19	0.34
Li <sub>2</sub> O	0.0021	-	-	-
S	0.01	-	-	-
CO <sub>2</sub>	0.25	5.15	(4.53)	2.29
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.83	0.4	0.7	0.86
C	0	-	-	-

Vlastní struktura jílových minerálů ze skupiny smektitu je poměrně specifická a jelikož smektity v bentonitech tvoří dominantní složku, ovlivňují významně jeho chemické i fyzikální vlastnosti a chování. Obecně je přijímána struktura, kdy je jednotka tvořena dvěma tetraedrickými a jednou oktaedrickou vrstvou, která je mezi nimi (tzv. T-O-T). Tetraedry [SiO<sub>4</sub>]<sup>4-</sup> se váží třemi vrcholy (tzv. bazálními kyslíky) na své sousedy. Volné vrcholy tetraedrů (tzv. apikální kyslíky) jsou součástí oktaedrické vrstvy. Ta je tvořena koordinačními oktaedry [AlO<sub>6</sub>]<sup>9-</sup> spojenými sdílenými hranami. V hraničních rovinách mezi oktaedrickou sítí a tetraedrickými sítěmi mohou být uloženy jak hydroxylové skupiny OH<sup>-</sup>, tak nesdílené ionty O<sup>2-</sup> (viz Obr. 9). V důsledku zastupování iontů v tetraedrických (hlavně Si<sup>4+</sup> / Al<sup>3+</sup>) a oktaedrických (hlavně Al<sup>3+</sup>, Fe<sup>3+</sup> / Mg<sup>2+</sup>, Fe<sup>2+</sup>) sítích dochází k tomu, že komplex není elektricky neutrální, přičemž je rozdíl náboje ve vodou nasyceném stavu kompenzován vstupem kationtů (nejčastěji K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>) obklopenými molekulami vody do mezivrství (Chváta 2005).

Druh dominantního kationtu v mezivrství a rovněž poměry mezi těmito kationty mohou významně ovlivňovat transportní vlastnosti bentonitu a geotechnické vlastnosti (Červinka et al. (2015).



Obr. 9 Mikrostruktura jílu ze skupiny smektitu (2:1) s vyznačeným mezivrstvím (Červinka et al. 2015)

České bentonity vykazují vysoký podíl minerálů ze skupiny smektitu (nad 60 %), v menší míře jsou pak zastoupeny ostatní jílové minerály (kaolinit, illit). U akcesorických fází je zajímavé zastoupení Fe-karbonátů, místy i oxohydroxidů Fe, což souvisí s genezí (Hausmanová et al. 2018).

Zastoupením Fe-bohatých fází i nabohacením smektitu železem v oktaedrických pozicích se české bentonity odlišují od světových standardů i od Ca-bentonitů většiny evropských ložisek. Zejména je významný obsah smektitů a dalších jílových minerálů (vermikulit, kaolinit), u kterých může v různé velké míře probíhat iontová výměna a které mají velký specifický povrch. Podstatné mohou být také různé druhy slíd, případně živců a volných oxidů železa. Ve srovnání se zahraničními bentonity je obsah smektitických jílu spíše nižší (Rokle, přírodní bentonit ~ 60 hm. %; Wyoming, MX-80 ~ 65–75 hm. %; Milos, IBECO RWC ~ 75 – 85 hm. %) (Koch 2008 v Červinka et al. 2015).

#### Vliv na dlouhodobou bezpečnost:

Charakter vyměnitelného kationtu ( $\text{Na}^+$  vs.  $\text{Ca}^{2+}$ ) v mezivrství může významně ovlivnit nejen geotechnické vlastnosti (např. Pusch 2006), ale i vlastnosti transportní (např. Choi a Oscarson 1996, González Sánchez et al. 2008). Rozdílné geotechnické a transportní vlastnosti sodné a vápenaté formy jsou v literatuře přisuzovány rozdílné mikrostruktuře porézního prostředí dané formy jílového materiálu (také např. Hofmanová et al. 2018; Vašíček et al. 2019).

#### Dostupná data:

Základní přehled informací o vlastnostech českých bentonitů je uveden ve zprávě Ryndová a Tvrdý (2020). Chemické složení českých bentonitů a mineralogické složení je souhrnně uvedeno ve zprávě Hausmannová et al. (2018). Významný soubor dat silikátových analýz

a mineralogických analýz a jejich zdrojů je uveden v Červinka et al. (2015). Charakterizace materiálů je uvedena v Hofmanová et al. (2019).

V současné době probíhá projekt Výplně a ostatní inženýrské komponenty HÚ (SO 2020-092).

### **Nejistoty:**

Nejistoty analytické – amorfni fáze, malé množství krystalických forem (např. Hofmanová et al. 2019). Nehomogenní složení. Obsah Fe fází (řešený např. v rámci Červinka et al. 2018). Diskutabilní zůstává stanovení semikvantitativního složení bentonitu včetně stanovení obsahu amorfni fáze (Vašíček et al. 2022).

### **Reference:**

- ČERVINKA R. A VEJSADŮ J. (2015): Studium vývoje vlastností a eroze bentonitu z lokality Rokle, (arch. č. SÚRAO 42/10, 42/11)
- ČERVINKA R., HANULÁKOVÁ D. (2013): Laboratorní výzkum tlumících, výplňových a konstrukčních materiálů. Geochemické modelování – bentonitová pórová voda. Zpráva ÚJV Řež, a. s., 14269, 111 s.
- ČERVINKA R., VEČERNÍK P., KAŠPAR V., VAŠÍČEK R. (2018): Kompletní charakterizace bentonitu BCV 2017. Průběžná zpráva – Samostatná příloha. – MS SÚRAO, TZ 419/2019, Praha.
- ČERVINKA R., VOPÁLKA D., ADAM R., BRÁZDA L., DRTINOVÁ B., HOFMANOVÁ E., KITNEROVÁ J., RAMEŠOVÁ L. REIMITZ D., ŠIMÚTHOVÁ Z., ŠTAMBERG K., VETEŠNÍK A. (2015): Transport radionuklidů z úložiště / Vstupní parametry a procesní modely pro hodnocení transportu radionuklidů přes inženýrské bariéry: 1. průběžná zpráva. – MS SÚRAO, TZ 24/2015, Praha.
- GONZÁLEZ SÁNCHEZ, F., VAN LOON, L.R., GIMMI, T., JAKOB, A., GLAUS, M.A., DIAMOND, L.W. (2008): Self-diffusion of water and its dependence on temperature and ionic strength in highly compacted montmorillonite, illite and kaolinite. *Appl. Geochem.* 23, 3840–3851. doi:10.1016/j.apgeochem.2008.08.008
- HAUSMANNOVÁ L., HANUSOVÁ I., DOHNÁLKOVÁ M. (2018): Shrnutí výzkumu českých bentonitů pro hlubinné úložiště – do roku 2018. MS SURAO TZ 309/201á, Praha.
- HOFMANOVÁ E., ČERVINKA R., VOPÁLKA D., BABOROVÁ L., BRÁZDA L., PECKOVÁ A., VETEŠNÍK A., VIGLAŠOVÁ E., VAŠÍČEK R. (2019): Transport radionuklidů z úložiště / vstupní parametry a procesní modely pro hodnocení transportu radionuklidů přes inženýrské bariéry: Závěrečná zpráva. – MS SÚRAO, ZZ 420/2019, Praha
- CHOI J. W., OSCARSON D. W. (1996): Diffusive transport through compacted Na- and Ca-bentonite. *Journal of Contaminant Hydrology*, 22, 189-202.
- CHVÁTAL M. (2005): Úvod do systematické mineralogie. Silikátový svaz. ISBN 86821-11-5.
- KOCH D. (2008): European Bentonites as alternatives to MX-80. Proceedings of Clay in natural and engineered barriers for radioactive waste confinement conference in Lille 2007. Science & Technology Series n° 334, Andra.



KŘÍŽOVÁ V. ET AL. (2010): Sledování dlouhodobé stability inženýrských bariér na bázi bentonitu s využitím zatěžovacích procedur a experimentů in-situ a hodnocení jejich retardační funkce, (arch. č. SÚRAO 31/08, 32/08, 35/09, 23/10 (závěrečná zpráva)

PUSCH, R. (2006): Mechanical properties of clays and clay minerals in Bergaya, F., Theng, B.K.G., Lagaly, G., editors, (2006): Handbook of Clay Science. Elsevier Ltd. 1246 s.

RYNDOVÁ T., TVRDÝ J. (2020): Bentonit pro české hlubinné úložiště radioaktivního odpadu. - MS SURAO 248/2020, Praha

VAŠÍČEK R., HOFMANOVÁ E., ČERNÁ K., BARTAK D., ČERNOCHOVÁ K., PUSZTAI M., SVOBODA J., ŠACHLOVÁ Š., KAŠPAR V., KUČEROVÁ M., VEČERNÍK P., ZUNA M. (2022): Metodiky testování bentonitu, TZ590/2022, Praha

### 6.3.5.2 Složení pórové vody

#### Popis:

Interakcí mezi bentonitem a podzemní vodou bude vznikat za daných podmínek pórová voda v bentonitu. Její chemické složení bude závislé na vlastnostech bentonitu (mineralogické složení, obsah jílu ze skupiny smektitu, velikost kationtové výměnné kapacity a obsazení kationtů na výměnných místech apod.), na chemickém složení podzemní vody a na fyzikálně-chemických parametrech prostředí (teplota, tlak, složení plynné fáze apod.).

Vzhledem ke struktuře bentonitu, ve kterém dominantní zastoupení mají minerály ze skupiny smektitů vyznačující se vrstevnatou strukturou, je důležité nejdříve rozlišit, jak je voda v bentonitech vázána, určit jaký podíl této vody se účastní geochemických reakcí (tj. získat poměr kapalné ku pevné fázi) a definovat pojem „pórová voda“. Obecně je možné vztáhnout objem vázané vody k porozitě zhuštěného bentonitu a rozlišit dva typy pórů (porozity), póry uvnitř smektitových vrstev, které vyplňuje voda „*interlayer water*“ a póry vně těchto vrstev, které vyplňuje voda „*external water*“ (Wersin, 2003; Muurinen et al., 2004). Aplikací povrchově komplexačních modelů založených na EDL (*electric double layer*) probíhajících na funkčních skupinách umístěných na vnějších hranách smektitových vrstev, došlo k rozdělení vody „*external water*“ na dva typy a to; „*diffuse double layer water (DDL water)*“ a volnou vodu „*free water*“. Externí porozita, tj. „*external water*“, je často nazývána efektivní porozita nebo geochemická porozita. Pojmem „pórová voda“ je v bentonitu v současnosti většinou autorů označována volná voda „*free water*“, která se podílí na reakcích probíhajících uvnitř bentonitu (sorpce, rozpouštění, srážení) a současně umožňuje transport látek pomocí difúze. Objem pórové vody v kompaktovaném bentonitu je pak funkcí jeho hustoty, resp. objemové hmotnosti („*dry density*“) (Bradbury a Baeyens, 2003).

Obecně uznávaným přístupem k získání chemického složení pórové vody kompaktovaného bentonitu je kombinace experimentálních výsledků s termodynamickým modelováním. Nejdříve je charakterizován bentonit, který následně vstupuje do interakce s podzemní vodou (většinou reálné analýzy podzemních vod, případně potenciální podzemní vody – např. tavné vody z ledovce). Prvotní ověření modelu se provádí povětšinou na experimentálních datech. Model může být rovnovážný se zahrnutím nebo nezahrnutím transportu (difúze). V případě pouze rovnovážného modelu je časové hledisko nahrazeno mnoha opakujícími se cykly, kdy se tvoří nová rovnováha mezi bentonitem a podzemní vodou (Červinka et al. 2015).

**Vliv na dlouhodobou bezpečnost:**

Chemické složení pórové vody bude zásadně ovlivňovat transportní parametry uvolněných radionuklidů (rozpuštěnost, sorpční a difúzní koeficienty).

**Dostupná data:**

Přehled současných českých a zahraničních komplexních reportů týkající se pórové vody kompaktovaného bentonitu či jílových hornin jsou uvedeny v následující tabulce (Červinka et al. 2015).

Tab. 4 Výběr českých a zahraničních zpráv týkajících se modelování pórové vody v kompaktovaném bentonitu.

Zadavatel / organizace	Materiál	Model	Reference
NAGRA (2002)	MX-80	Kombinace experimentů a termodynamického modelu	Bradbury a Baeyens (2002), NAGRA TR 01-08
NAGRA (2002)	MX-80	Kombinace experimentů a termodynamického modelu	Curti a Wersin (2002) NAGRA TR 02-09
BRGM a ANDRA	Jílové horniny	Kombinace experimentů, reálných in-situ dat a termodynamického modelu	Gaucher et al. (2009)
SKB (2006)	MX-80, Deponit CA-N	Transportní a termodynamický model, experimentální data	Arcos et al. (2006)
POSIVA (2014)	Deponit CA-N, AC200	Kombinace experimentů, reálných in-situ dat a termodynamického modelu	Hellä et al. (2014) POSIVA 2014-04
MPO-TIP (2013)	B75 a S65	Kombinace experimentů a termodynamického modelu	Červinka a Hanuláková (2013)
SÚRAO (2015)	BaM	Kombinace experimentů a termodynamického modelu	Červinka a Vejsadů (2015)

V současné době probíhá projekt Výplně a ostatní inženýrské komponenty HÚ (SO 2020-092), který vyslovil některé podstatné připomínky k postupu, jak získat složení pórové vody.

**Nejistoty:**

Problematika pórové vody a jejího složení je předmětem debat již několik desetiletí. Přispěly k tomu jak dezinterpretace výsledků průnikových difúzních experimentů iontů, metodiky, které se používaly (a používají) ke stanovení „pórové“ vody, a to:

- vodné výluhy za různých poměrů pevné a kapalné fáze,
- squeezing (tzv. vysokotlaká extrakce),

dále pak mikroskopické techniky (Vašíček et al. 2022).

To vedlo k představě nasyceného kompakovaného bentonitu jako multiporézního média (s duální porozitou), v kterém se uvažují tři druhy vody, voda volná (tzv. *free water*), difúzní dvojvrstva a mezivrstevná voda (Muurinen a Lehtikoinen (1999), Bradbury a Baeyens (2002), Wersin (2003). Za pórovou vodu je označována pouze voda volná (Bradbury and Baeyens, 2002).

V posledních letech se objevují práce, které vyvrací tento koncept a které dokazují, že nasycený kompakovaný bentonit má pouze jeden typ pórů (tj. mezivrstvených), který je vyplněný jedním typem vody, např. Birgersson (2017); Birgersson a Karnland (2009); Holmboe et al. (2012); Ohkubo et al. (2016); Vašíček et al. (2022)

Tyto koncepce jsou v diskuzi, aniž by jedna dokázala překonat druhou, a tvoří nesmiřitelné tábory. Prokázat skutečné složení pórové vody je problematické, protože ji není možno přímo odebrat nebo měřit její složení a každá extrakční metoda může její složení ovlivnit.

Získat chemické složení pórové vody kompakovaného bentonitu experimentálně je v některých případech téměř technicky nemožné, a to zejména díky nízké propustnosti, vysokému poměru mezi minerálním povrchem a pórovým objemem a specifickým interakcím mezi jílovým povrchem a pórovou vodou bentonitu. Rovněž experimentální metody používané k získávání pórové vody (vodné výluhy, vysokotlaké lisování tzv. „*squeezing*“, vysokorychlostní centrifugace) mohou zanechat ve výsledném roztoku určité artefakty a nemusí odpovídat podmínkám ve ztuhnutém bentonitu. Například při metodě squeezingu může při vysokých tlacích dojít k oxidaci a tlakovému rozpouštění akcesorických minerálů, odplynění CO<sub>2</sub> či k chemické frakcionaci (Pearson et al., 2003). Rovněž vodné výluhy neodpovídají poměru kapalné a pevné fáze ve ztuhnutém bentonitu a jsou významně závislé na experimentálních podmínkách (Fernández et al., 2001). Proto je nutné použít kombinaci jak experimentálních metod, tak metod geochemického modelování.

#### Reference:

- ARCOS, D., GRANDIA, F., DOMÈNECH, C. (2006): Geochemical evolution of the near field of a KBS-3 repository. Technical Report 06-16. SKB, Sweden.
- BIRGERSSON M. (2017): A general framework for ion equilibrium calculations in compacted bentonite. *Geochim. Cosmochim. Acta* 200, 186–200.
- BIRGERSSON M., KARNLAND O. (2009): Ion equilibrium between montmorillonite interlayer space and an external solution—Consequences for diffusional transport. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 73, 1908–1923.
- BRADBURY, M., BAEYENS, B. (2002): Porewater chemistry in compacted re-saturated MX-80 bentonite: Physico-chemical characterisation and geochemical modelling. Technical Report 01–08. NAGRA, Switzerland.
- CURTI E., P. WERSIN (2002): Assessment of Porewater Chemistry in the Bentonite Backfill for the Swiss SF/HLW Repository. NAGRA Technical Report 02-09, 87 s.
- ČERVINKA R. A VEJSADŮ, J. (2015): Studium vývoje vlastností a eroze bentonitu z lokality Rokle, (arch. č. SÚRAO 42/10, 42/11)
- ČERVINKA R., HANULÁKOVÁ D. (2013): Laboratorní výzkum tlumících, výplňových a konstrukčních materiálů. *Geochemické modelování – bentonitová pórová voda*. Zpráva ÚJV Řež, a. s., 14269, 111 s.

- FERNÁNDEZ, A. M., BAYENS, B., BRADBURY, M., RIVAS, P. (2004): Analysis of porewater chemical composition of a Spanish compacted bentonite used in a engineered barrier. *Physics and Chemistry of the Earth* 29, 105 – 118.
- GAUCHER, E. C., TOURNASSAT, C., PEARSON, F.J., BLANC, P., CROUZET, C., LEROUGE, C., ALTMANN, S. (2009): A robust model for pore-water chemistry of clayrock. *Geochim. et Cosmochim. Acta* 73, 21, 6470-6487.
- HELLÄ, P., PITKÄNEN, P., LÖFMAN, J., PARTAMIES, S., VUORINEN, U., WERSIN, P. (2014) Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto Definition of Reference and Bounding Groundwaters, Buffer and Backfill Porewaters. POSIVA 2014-04. POSIVA OY, Finland.
- HOLMBOE M., WOLD S., JONSSON M. (2012): Porosity investigation of compacted bentonite using XRD profile modeling. *Journal of Contaminant Hydrology* 128, 19–32.
- MUURINEN A., LEHIKONEN J. (1999): Porewater chemistry in compacted bentonite. VTT Chemical Technology, POSIVA report 99-20, Finsko, 46 s.
- NAGRA (2002): Project Opalinus Clay: Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste. - Technical Report 02-05, 360 s.
- OHKUBO T., IBARAKI M., TACHI Y., IWADATE Y. (2016): Pore distribution of water-saturated compacted clay using NMR relaxometry and freezing temperature depression; effects of density and salt concentration. *Applied Clay Science* 123, 148–155.
- PEARSON, F.J., ACROS, D., BATH, A., BOISSON, J. Y., FERNÁNDEZ, A.M, GÄBLER, H-E, GAUCHER, E., GAUTSCHI, A., GRIFFAULT, L., HERMÁN, P., WABER, H.N., (2003): Geochemistry of water in the Opalinus Clay Formation at the Mont Terri Rock Laboratory. Swiss Federal Office for Water and Geology Series, N° 5, 319 pp.
- WERSIN P. (2003): Geochemical modelling of bentonite porewater in high-level waste repositories. *J. Contam. Hydrol.*, 61, 405–422.
- VAŠÍČEK R., HOFMANOVÁ E., ČERNÁ K., BARTAK D., ČERNOCHOVÁ K., PUSZTAI M., SVOBODA J., ŠACHLOVÁ Š., KAŠPAR V., KUČEROVÁ M., VEČERNÍK P., ZUNA M.(2022): Metodiky testování bentonitu, TZ590/2022, Praha

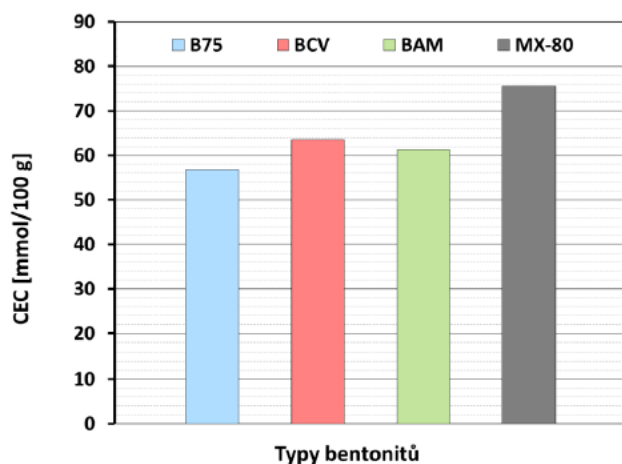
### 6.3.5.3 Kationtová výměnná kapacita (CEC)

#### Popis:

Kationtovou výměnnou kapacitu (CEC) můžeme definovat jako celkový permanentní negativní náboj, který vzniká isomorfní substitucí kationtů ve strukturní mřížce jílových minerálů za kationty s nižší valencí. Nábojová neutralita je pak zajištěna přítomností kationtů (vyměnitelné kationty), které jsou drženy elektrostatickými silami v mezivrstvi mezi jednotlivými vrstvičkami jílových minerálů. Do CEC je započítán i náboj, který se nachází na povrchových hydroxylových skupinách, které jsou situovány na koncích jílových vrstviček. Udávaná hodnota CEC pro smektity se běžně pohybuje v rozmezí 80 až 120 mmol<sup>+</sup>·100 g<sup>-1</sup> (Červinka et al. 2015).

V bentonitu je velké množství montmorillonitu a jen malý objem pórové vody. Kapacita iontové výměny pevných látek je tedy větší než kapacita vodné fáze. CEC působí jako silný pufr pro složení pórové vody, a proto montmorillonit určuje složky pórové vody. (Bradbury and Bayerns 2002)

Hodnoty CEC českého bentonitu jsou uvedeny na následujícím obrázku (Hausmannová et al. 2018).



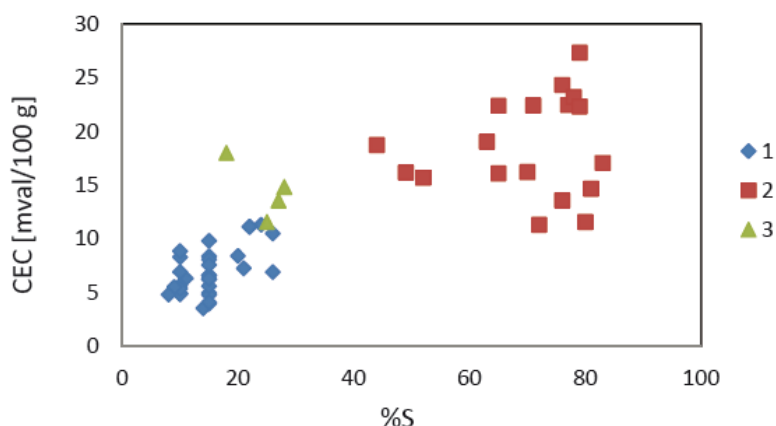
Obr. 10 Porovnání hodnot CEC u českých bentonitů a MX-80. Reference: B75 - Červinka a Hanuláková (2013), BAM - Červinka a Vejsadů (2015), BCV - Červinka et al. (2018) a MX-80 – Meier & Kahr (1999)

Naměřené hodnoty CEC dobře korelují s obsahem smektitu v bentonitech v Tab. 3 (Hausmannová et al. 2018).

#### **Vliv na dlouhodobou bezpečnost:**

Vysoká CEC bentonitu významně přispívá k zajištění bezpečnostní funkce 5.3 Nesmí dojít ke ztrátě retardačních vlastností použitého tlumícího materiálu vlivem působení korozních produktů UOS nebo tepelnou degradací (viz kap. 3.2).

Kationtová výměnná kapacita (CEC) je jedním z nejcitlivějších parametrů pro detekci změn minerálních vlastností, jako je bobtnací kapacita a illitizace v alteračních experimentech (Dohrmann et al. 2012). Při rozpouštění bentonitu a illitizaci dochází k poklesu CEC. Na Obr. 11 je jasně patrná závislost CEC na obsahu smektitické složky.



Obr. 11 Korelace mezi CEC a obsahem smektitu ve smíšených illit-smektitových jílech (Przelaskowska et al. 2015)

### Dostupná data:

Zpřehledněné hodnoty CEC českého bentonitu jsou uvedeny v Hausmannová et al. (2018). Další zdroje dat je možno dohledat v Červinka et al. (2015), Červinka et al. (2018), Hofmanová et al. (2019).

### Nejistoty:

Nejistoty stanovení CEC jsou spojeny jak s analytickými postupy stanovení CEC (kterou metodu zvolit), tak s přenosem dat, změřených na malém počtu vzorků na měřítko tlumící bariéry v celém vrtu. Není dostatek dat.

### Reference:

- BRADBURY, M.H. & BAEYENS, B. (2002): Porewater Chemistry in Compacted Re-Saturated MX-80 Bentonite: Physico-Chemical Characterisation and Geochemical Modelling. Villigen 2002, PSI Bericht Nr. 02-10. 42 p.
- ČERVINKA R. A VEJSADŮ, J. (2015): Studium vývoje vlastností a eroze bentonitu z lokality Rokle, (arch. č. SÚRAO 42/10, 42/11)
- ČERVINKA R., HANULÁKOVÁ D. (2013): Laboratorní výzkum tlumících, výplňových a konstrukčních materiálů. Geochemické modelování – bentonitová pórová voda. Zpráva ÚJV Řež, a. s., 14269, 111 s.
- ČERVINKA R., VEČERNÍK P., KAŠPAR V., VAŠIČEK R. (2018): Kompletní charakterizace bentonitu BCV 2017. Průběžná zpráva – Samostatná příloha. – MS SÚRAO, TZ 419/2019, Praha.
- ČERVINKA R., VOPÁLKA D., ADAM R., BRÁZDA L., DRTINOVÁ B., HOFMANOVÁ E., KITNEROVÁ J., RAMEŠOVÁ L. REIMITZ D., ŠIMÚTHOVÁ Z., ŠTAMBERG K., VETEŠNÍK A. (2015): Transport radionuklidů z úložiště / Vstupní parametry a procesní modely pro hodnocení transportu radionuklidů přes inženýrské bariéry: 1. průběžná zpráva. – MS SÚRAO, TZ 24/2015, Praha.
- DOHRMANN, REINER & GENSKÉ, DIETER & KARNLAND, OLA & KAUFHOLD, STEPHAN & KIVIRANTA, LEENA & OLSSON, SIV & PLÖTZE, MICHAEL & SANDÉN, TORBJÖRN & SELLIN, PATRIK & SVENSSON, DANIEL & VALTER, MARTIN. (2012): INTERLABORATORY CEC and Exchangeable

Cation Study of Bentonite Buffer Materials: II. Alternative Methods. *Clays and Clay Minerals*. 60. 10.1346/CCMN.2012.0600207.

HAUSMANNOVÁ L., HANUSOVÁ I., DOHNÁLKOVÁ M. (2018): Shrnutí výzkumu českých bentonitů pro hlubinné úložiště – do roku 2018. MS SURAO TZ 309/201, Praha.

HOFMANOVÁ E., ČERVINKA R., VOPÁLKA D., BABOROVÁ L., BRÁZDA L., PECKOVÁ A., VETEŠNÍK A., VIGLAŠOVÁ E., VAŠÍČEK R. (2019): Transport radionuklidů z úložiště / vstupní parametry a procesní modely pro hodnocení transportu radionuklidů přes inženýrské bariéry: Závěrečná zpráva. – MS SÚRAO, ZZ 420/2019, Praha

Przelaskowska A., Łykowska G., Klaja J., Kowalska S., Gašior I. (2015). Application of the cation exchange capacity parameter (CEC) to the characterisation of the swelling capacity of lower Paleozoic, Carpathian Flysch and Miocene Carpathian Foredeep clay rocks. *NAFTA I GAZ*, LXXI, Nr, 6/2015.

SOLDATOV, V.S. (1995): Application of basic concepts of chemical thermodynamics to ion exchange equilibria. *Reactive & Functional Polymers* 27(1995)2, pp. 95–106.

#### 6.3.5.4 Specifický povrch

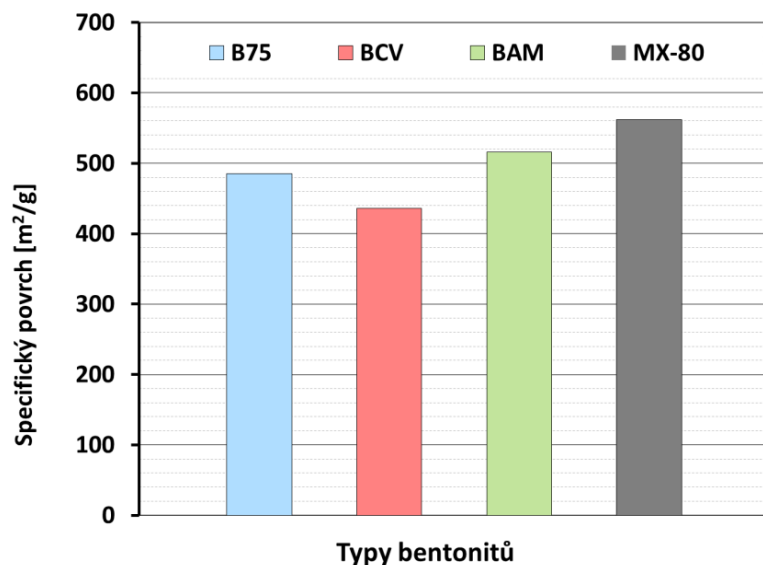
##### Popis:

Specifický povrch látky je plocha povrchu, vztažená na jednotku hmotnosti (obvykle  $\text{m}^2/\text{g}$ )  
Měření specifického povrchu materiálů je běžně spojeno se stanovením množství adsorbované látky na částicích materiálu. Tyto nepřímé metody lze rozdělit do dvou hlavních skupin:

- Adsorpce nepolárního plynu (většinou  $\text{N}_2$ ) metodou BET (Brunauer et al. 1938);
- Adsorpce polárních kapalin, např. EGME (Carter et al. 1986) nebo methylenová modř (Hang a Brindley 1970).

Stanovení specifického povrchu metodou BET je široce užívané, ale pro jílové materiály poskytuje silně podhodnocené výsledky. Důvodem je skutečnost, že k adsorpci plynu dochází pouze na vnějším povrchu částic. Hodnotu specifického povrchu pro jíly ze skupiny smektitu (např. pro montmorillonit) lze spočítat i teoreticky a ideálně vychází na cca  $750 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$  (Meunier 2005). Pro bentonity z českých ložisek kolísají hodnoty specifického povrchu stanovené metodou EGME v rozmezí  $\sim 350\text{-}550 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ .

Na následujícím obrázku je znázorněno porovnání hodnot specifického povrchu českých bentonitů ze zprávy Hausmannová et al. (2018).



Obr. 12 Porovnání hodnot specifického povrchu českých bentonitů a MX-80. Reference: BAM, B75 – Červinka et al (2015), BCV - Červinka et al. (2018), MX-80 – Hausmannová et al. (2018)

### Vliv na dlouhodobou bezpečnost:

Specifický měrný povrch (*specific surface area*, SSA) do značné míry určuje mnoho fyzikálních a chemických vlastností materiálů (adsorpce látek, bobtnání apod.). Nejvíce do specifického povrchu jílových materiálů přispívají vrstevnaté silikáty, které jsou známy svým obrovským povrchem až 810 m<sup>2</sup>/g (Carter et al. 1986).

### Dostupná data:

Shrnutí dat specifického povrchu lze najít ve zprávě Hausmannová et al. (2018). Další data jsou uvedena v Červinka et al. (2015, 2018 nebo Hofmanová et al. (2019).

### Nejistoty:

Nejistoty spojené s použitím analytické techniky. U metody BET plyn nevstupuje do všech pórů (mezivrství, Pusch 2002), určí se touto metodikou pouze nepatrná část celkového měrného povrchu bentonitů, tzv. vnější povrch. Získané parametry z metodiky stanovení SSA pomocí adsorpce plynu jsou navíc závislé na zrnitostním složení vzorku. Stanovení SSA\_EGME je vhodným indikátorem obsahu montmorillonitu; hodnota SSA\_EGME lineárně koreluje s obsahem montmorillonitu.

### Reference:

- BRUNAUER, S.; EMMETT, P. H.; TELLER, E (1938): Adsorption of gases in multi-molecular layers. J. Am. Chem. Soc. 60, 309–319.
- CARTER, D. L.; MORTLAND, M. M.; KEMPER, W. D. (1986): Specific Surface. Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods, 2nd ed.; American Society of Agronomy–Soil Science Society of America: Madison, USA, Chapter 16, pp 413–423.
- ČERVINKA R. A VEJSADŮ, J. (2015): Studium vývoje vlastností a eroze bentonitu z lokality Rokle, (arch. č. SÚRAO 42/10, 42/11)



- ČERVINKA R., VEČERNÍK P., KAŠPAR V., VAŠÍČEK R. (2018): Kompletní charakterizace bentonitu BCV 2017. Průběžná zpráva – Samostatná příloha. – MS SÚRAO, TZ 419/2019, Praha.
- ČERVINKA R., VOPÁLKA D., ADAM R., BRÁZDA L., DRTINOVÁ B., HOFMANOVÁ E., KITNEROVÁ J., RAMEŠOVÁ L. REIMITZ D., ŠIMÚTHOVÁ Z., ŠTAMBERG K., VETEŠNÍK A. (2015): Transport radionuklidů z úložiště / Vstupní parametry a procesní modely pro hodnocení transportu radionuklidů přes inženýrské bariéry: 1. průběžná zpráva. – MS SÚRAO, TZ 24/2015, Praha.
- HAUSMANNOVÁ L., HANUSOVÁ I., DOHNÁLKOVÁ M. (2018): Shrnutí výzkumu českých bentonitů pro hlubinné úložiště – do roku 2018. MS SÚRAO TZ 309/2018, Praha.
- HOFMANOVÁ E., ČERVINKA R., VOPÁLKA D., BABOROVÁ L., BRÁZDA L., PECKOVÁ A., VETEŠNÍK A., VIGLAŠOVÁ E., VAŠÍČEK R. (2019): Transport radionuklidů z úložiště / vstupní parametry a procesní modely pro hodnocení transportu radionuklidů přes inženýrské bariéry: Závěrečná zpráva. – MS SÚRAO, ZZ 420/2019, Praha
- PUSH R., KARNLAND O. (1996): Physico-chemical stability of smectite clays. Engineering Geology, 41, 73–85.
- SOLDATOV, V.S. (1995): Application of basic concepts of chemical thermodynamics to ion exchange equilibria. Reactive & Functional Polymers 27(1995)2, pp. 95–106.

### 6.3.6 Charakteristiky bentonitu významné pro migraci radionuklidů

#### Popis:

Pro migraci radionuklidů či jiných látek bentonitem jsou důležité následující parametry:

Minerální složení (potažmo obsah smektitu) – viz 6.3.5.1

Složení pórové vody (pro speciaci radionuklidů; viz 6.3.5.2)

CEC – viz 6.3.5.3

Celková porozita – viz 6.3.1

Efektivní (dostupná porozita)

Míra odpuzování aniontů od negativně nabitých povrchů se odráží v hodnotě  $\varepsilon$ , která je stanovována menší než je celková porozita ( $\varepsilon < \varepsilon_{\text{total}}$ ). Často bývá označovaná jako efektivní porozita,  $\varepsilon_{\text{eff}}$

Konstriktivita – viz 6.3.1

Tortuozita – viz 6.3.1

Geometrický faktor – viz 6.3.1

#### Vliv na dlouhodobou bezpečnost:

Jednou ze základních bezpečnostních funkcí bentonitu je funkce Zajištění difúzního transportu radionuklidů po dostatečně dlouhou dobu (viz kap. 3.2). Bentonit svými vlastnostmi vytváří předpoklad průlinového prostředí, ve kterém dohází k transportu a záchytu radionuklidů. Změna výše uvedených vlastností ovlivní i difúzní transport radionuklidu v bentonitu.

**Dostupná data:**

Shrnutí dat, významných pro migraci radionuklidů lze najít ve zprávě Hausmannová et al. (2018), či Červinka et al. (2015, 2018), Hofmanová et al. (2019).

**Nejistoty:**

Nejistoty jsou spojeny s nejistotami každé výše zmíněné metodiky, ale i obecně s popisem transportních procesů v daném prostředí.

**Reference:**

- ČERVINKA R., VEČERNÍK P., KAŠPAR V., VAŠÍČEK R. (2018): Kompletní charakterizace bentonitu BCV 2017. Průběžná zpráva – Samostatná příloha. – MS SÚRAO, TZ 419/2019, Praha.
- ČERVINKA R., VOPÁLKA D., ADAM R., BRÁZDA L., DRTINOVÁ B., HOFMANOVÁ E., KITNEROVÁ J., RAMEŠOVÁ L. REIMITZ D., ŠIMÚTHOVÁ Z., ŠTAMBERG K., VETEŠNÍK A. (2015): Transport radionuklidů z úložiště / Vstupní parametry a procesní modely pro hodnocení transportu radionuklidů přes inženýrské bariéry: 1. průběžná zpráva. – MS SÚRAO, TZ 24/2015, Praha.
- HAUSMANNOVÁ L., HANUSOVÁ I., DOHNÁLKOVÁ M. (2018): Shrnutí výzkumu českých bentonitů pro hlubinné úložiště – do roku 2018. MS SURAO TZ 309/2018, Praha.
- HOFMANOVÁ E., ČERVINKA R., VOPÁLKA D., BABOROVÁ L., BRÁZDA L., PECKOVÁ A., VETEŠNÍK A., VIGLAŠOVÁ E., VAŠÍČEK R. (2019): Transport radionuklidů z úložiště / vstupní parametry a procesní modely pro hodnocení transportu radionuklidů přes inženýrské bariéry: Závěrečná zpráva. – MS SÚRAO, ZZ 420/2019, Praha
- HOFMANOVÁ E. (2018): Diffusion of anionic species in compacted bentonite. Dizertační práce, ČVUT v Praze, 144 s.

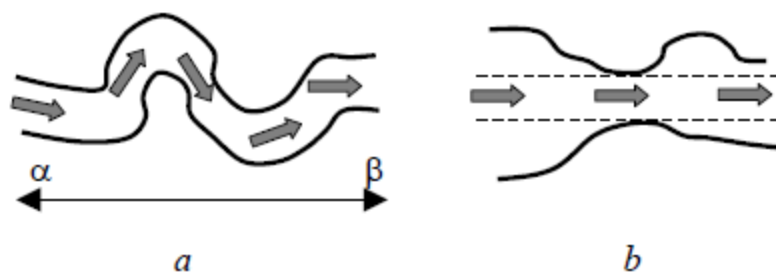
### 6.3.7 Charakter pórů

**Popis:**

Jak je popsáno ve FEP Chemické a mineralogické složení (6.3.5.1), obecně je přijímána struktura, kdy je jednotka tvořena dvěma tetraedrickými a jednou oktaedrickou vrstvou, která je mezi nimi (tzv. T-O-T). Někteří autoři používají modely „dvojitá porozita“ (Appelo et al. 2010; Glaus et al. 2015; Appelo 2017), jiní používají jednoporozitní modely se zohledněním elektrostatického charakteru mezivrstev (Lehikoinen 1982; Ochs et al. 2001; Birgersson a Karnland 2009; Tachi et al. 2011; Tachi a Yotsuji 2014).

Pro migraci radionuklidů je významná celková porozita (cca 50%, jako např. v Hofmanová et al. 2018) a frakce porozity dostupná pro daný radionuklid (viz 6.3.6).

Tvar pórů může být různě deformovaný, což vede k tomu, že látky difundující z jednoho bodu do druhého (viz Obr. 13) nemohou procházet nejkratší přímou cestou, tento jev se nazývá *tortuozita pórů*. Jiným faktorem ovlivňujícím difúzní transport látky v pórech je jejich různá plocha průřezu (viz Obr. 13), neboli *konstriktivita pórů* (Löfgren, 2004).



Obr. 13 Schématické znázornění tortuozity (vlevo) a konstrikivity póru (vpravo)

Tortuozita ( $\tau^2$ ) čili zakřivení a konstrikivita ( $\delta$ ) neboli zúžení jsou hlavními vlastnostmi pórů, které ovlivňují migraci látek materiálem. Pak je možno definovat difúzní koeficient v systému pórů  $D_p$  jako:

Konstrikivitu, tortuozitu a transportní pórovitost (pro  $\varepsilon_f = 0$ ) je možno zahrnout do veličiny nazvané *formační faktor*  $F_f$  (Byegard et al., 1998; Löfgren a Neretnieks, 2002 ad.)

$$F_f = \varepsilon_t \frac{\delta_D}{\tau^2} \quad (5)$$

Tento parametr je zcela závislý na vlastnostech matrice a je poměrně problematicky určován. Jeho účelem je popsat a určitým způsobem generalizovat vlastnosti materiálu, jež ovlivňují difúzi (Shen, L. & Chen, Z 2007; Apello et al. (2010); van Brakel, J. & Heertjes, P. M. (1974)

#### **Vliv na dlouhodobou bezpečnost:**

Tyto vlastnosti pórů mohou významně ovlivňovat tzv. aniontovozu exkluzi, kdy je obecně uvažováno, že je to způsobeno elektrostatickým odpuzováním aniontů od negativního povrchového náboje montmorillonitu.

#### **Dostupná data:**

Hodnoty G a F lze odvodit z výsledků difúzních experimentů (např. Hofmanová et al. 2018; Hofmanová 2019).

#### **Nejistoty:**

Nejistoty jsou spojeny s nejistotami každé výše zmíněné metodiky, ale i obecně s popisem transportních procesů v daném prostředí.

#### **Reference:**

APPELO, C. A. J., VAN LOON, L. R. & WERSIN, P. (2010): Multicomponent diffusion of a suite of tracers (HTO, Cl, Br, I, Na, Sr, Cs) in a single sample of Opalinus Clay. *Geochim. Cosmochim. Acta* 74, 1201–1219.

HOFMANOVÁ E. (2018): Diffusion of anionic species in compacted bentonite. Dizertační práce, ČVUT v Praze, 144 s.

HOFMANOVÁ E., ČERVINKA R., VOPÁLKA D., BABOROVÁ L., BRÁZDA L., PECKOVÁ A., VETEŠNÍK A., VIGLAŠOVÁ E., VAŠÍČEK R. (2019): Transport radionuklidů z úložiště / vstupní parametry a procesní modely pro hodnocení transportu radionuklidů přes inženýrské bariéry: Závěrečná zpráva. – MS SÚRAO, ZZ 420/2019, Praha

SHEN, L. & CHEN, Z. (2007): Critical review of the impact of tortuosity on diffusion. Chem. Eng. Sci. 62, 3748–3755 (2007).

VAN BRAKEL, J. & HEERTJES, P. M. (1974) Analysis of diffusion in macroporous media in terms of a porosity, a tortuosity and a constrictivity factor. Int. J. Heat Mass Transf. 17, 1093–1103 (1974).

## 6.4 Výplňový materiál /backfill (bentonit)

### 6.4.1 Výplň přístupových prostor (konstrukční řešení)

#### Popis:

Po uložení UOS do ukládacího vrtu budou veškeré prostory, mimo vrty samotné, zaplněny vhodným výplňovým materiálem. Studie umístitelnosti lokalit Březový potok (Špinka et al 2018a), Hrádek (Špinka et al 2018b), Horka (Bureš et al 2018) a Janoch (Navrátilová et al. 2018) a jejich následné aktualizace z roku 2020 (Špinka et al. 2020a; Butovič et al. 2020; Špinka et al. 2020b; Zahradník et al. 2020) jako výplňový materiál při uzavírání sekcí s VJP uvažují čistý bentonit ve formě prefabrikátů. Alternativou nebo doplňkem k užití prefabrikovaných bentonitů mohou být bentonitové pelety (Pacovský et al., 2019; Štáštka et al., 2020). Zamítnuta však nebyla zatím ani možnost použití směsi bentonitu a drcené horniny. V současné době se počítá s tím, že bude použit český bentonit – stejný jako pro buffer (Hausmannová et al. 2018).

Konstrukce backfillu je na jedné straně ukončena (a v kontaktu s) konstrukcí bufferu (rozhraní buffer/ backfill) a na druhé straně zátkou na konci chodby/ tunelu.

Přístup k hodnocení dlouhodobého chování výplňového materiálu, resp. backfillu jako části konstrukce HÚ je obdobný jako v případě bufferu – stanovení indikátorů a kritérií nutných pro zajištění dlouhodobé funkce.

#### Vliv na dlouhodobou bezpečnost:

Nedostatečná funkce backfillu, charakterizovaná zejm. nedostatečnou bobtnací schopností, nadměrnou propustností či nadměrnou nehomogenitou způsobí vytvoření preferenční cesty pro transport radionuklidů ve směru tunelů/ štol/ šachet. Jde o důsledky konstrukčního a technologického řešení backfillu, tak kvality jeho materiálu.

V případě přítomnosti hydraulických gradientů v počáteční fázi (před homogenizací backfillu) může dojít k erozi, a tedy nežádoucímu přesunu hmoty.

Z dlouhodobého hlediska jsou nejdůležitější fyzikální a chemické procesy, které by mohly vést k nežádoucí změně vlastností. Patří mezi ně iontová výměna, osmóza, uvolňování koloidů a přeměna montmorillonitu. (SKB, 2010)

#### **Dostupná data:**

Výrobu pelet, základní parametry vrstvy pelet po instalaci (sypání, hutnění, nástřik) a vývoj technologie nástřikem postupně řeší Pacovský et al. (2019) a Šťástka et al. (2020).

Výstavba ani parametry konstrukce backfillu z tvárníc či ze směsi bentonitu a kameniva nebyly dosud v ČR řešeny.

#### **Nejistoty:**

Nejsou stanoveny funkční ukazatele a kritéria pro materiál i konstrukci backfillu v ČR. Využití dat (SKB, POSIVA) je možné pouze v omezené míře. Typicky materiálová data lze na podmínky ČR přenést pouze orientačně a se zřetelem na použitý typ bentonitu (Na/ Ca-Mg).

Nejistoty spočívají v nejasnosti o finálním výběru materiálu pro backfill. Ten může být stejný jako pro buffer, nicméně nebyla vyloučena varianta použití materiálu jiného. V tom případě, by bylo nutné se vypořádat i s případným vzájemným chemickým ovlivněním těchto dvou různých materiálů.

V každém případě bude nutné vyjasnit možné vzájemné mechanické ovlivnění na rozhraní buffer/ backfill.

Vzhledem k menším nárokům na backfill je pravděpodobné, že po vyřešení ukazatelů a kritérií pro buffer bude možné tyto, s menšími nároky, přenést na backfill.

Vzhledem k doposud nerozhodnutému způsobu ukládání je nejistotou také celkové množství materiálu nutné pro HÚ a jeho dostupnost.

#### **Reference:**

BUREŠ P., GRÜNWARD L., POŘÍZEK J., ZAHRADNÍK O., VEVERKA A., FIEDLER F., NOHEJL J., BAUDIS J., KOBYLKA D. A MAREK P. (2018): Studie umístitelnosti HÚ v lokalitě Horka. MS SÚRAO TZ 137/2017, SÚRAO, PRAHA.

BUTOVIČ A., GRÜNWARD L., BUREŠ P., POŘÍZEK J., ŠPINKA O., SOURAL J., ZAHRADNÍK O., MARTINČÍK J., KOBYLKA D. (2020): Studie umístitelnosti – aktualizace. Horka. ČVUT-SATRA-Mott MacDonald CZ, MS SÚRAO, TZ 512/2020

HAUSMANNOVÁ, L., HANUSOVÁ, I. A DOHNÁLKOVÁ, M. (2018): Summary of the research of Czech bentonites for use in the deep geological repository – up to 2018, SÚRAO 309/2018/ENG.

NAVRÁTILOVÁ V., NOL O. et al (2018): Souhrnná závěrečná zpráva ETE – jih. Hodnocení PÚ ZZZK a návrh navazujících geologických prací MS SÚRAO TZ 222/2018, SÚRAO, Praha.

PACOVSKÝ J., ŠTÁSTKA J. A KOLEKTIV (2019): Návrh a výroba směsi bentonitových pelet – závěrečná zpráva, ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Centrum experimentální geotechniky, SÚRAO TZ 362/2019, Praha, 65 str.

SKB (2010): Buffer, backfill and closure process report for the safety assessment SR-Site. SKB TR-10-47, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- ŠPINKA O., GRÜNWARD, L. ZAHRADNÍK O., VEVERKA A., FIEDLER F., NOHEJL J., POŘÍZEK J. A KOBYLKA D. (2018a): Studie umístitelnosti HÚ v lokalitě Hrádek. MS SURAO TZ 138/2017, SÚRAO, Praha.
- ŠPINKA O., GRÜNWARD, L. ZAHRADNÍK O., VEVERKA A., FIEDLER F., NOHEJL J., POŘÍZEK J. A KOBYLKA D. (2018b). Studie umístitelnosti HÚ v lokalitě Březový potok. MS SURAO TZ 139/2017, SÚRAO, Praha.
- ŠPINKA P., BUTOVIČ A., BUREŠ P., GRÜNWARD L., POŘÍZEK J., SOURAL J., ZAHRADNÍK O., MARTINČÍK J., KOBYLKA D. (2020b): Studie umístitelnosti – aktualizace. Hrádek. ČVÚT-SATRA-Mott mac Donald CZ, MS SÚRAO, TZ 513/2020
- ŠPINKA P., BUTOVIČ A., BUREŠ P., GRÜNWARD L., POŘÍZEK J., SOURAL J., ZAHRADNÍK O., MARTINČÍK J., KOBYLKA D. (2020a): Studie umístitelnosti – aktualizace Březový potok. ČVUT-SATRA-Mott MacDonald CZ, MS SÚRAO, TZ 514/2020
- ŠŤÁSTKA J., VAŠÍČEK R., ČERNOCHOVÁ K. (2020): Návrh a výroba směsi bentonitových pelet II – závěrečná zpráva, ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Centrum experimentální geotechniky, MS SÚRAO TZ 489/2020, 45 str.
- ZAHRADNÍK O., PÖPPERLE J., MAKÁSEK P., BUTOVIČ A., GRÜNWARD L., BUREŠ P., ŠPINKA O., MARTINČÍK J., KOBYLKA D. (2020): Studie umístitelnosti Janoch – aktualizace 2020. MS SURAO TZ 518/2020, SÚRAO, Praha.

## 6.4.2 Termofyzikální vlastnosti

Vzhledem k tomu, že v českém konceptu se počítá s využitím bentonitu jako výplňového materiálu a nejsou dosud pevně stanoveny konstrukční uspořádání, požadavky, detaily je FEP v tuto chvíli totožný s FEP „buffer“ 6.3.2

## 6.4.3 Mechanické vlastnosti

### 6.4.3.1 Pevnostní a přetvárné charakteristiky

Pevn Vzhledem k tomu, že v českém konceptu se počítá s využitím bentonitu jako výplňového materiálu a nejsou dosud pevně stanoveny konstrukční uspořádání, požadavky, detaily je FEP v tuto chvíli totožný s FEP „buffer“ 6.3.3.1

### 6.4.3.2 Bobtnání

Vzhledem k tomu, že v českém konceptu se počítá s využitím bentonitu jako výplňového materiálu a nejsou dosud pevně stanoveny konstrukční uspořádání, požadavky, detaily je FEP v tuto chvíli totožný s FEP „buffer“ 6.3.3.2

## 6.4.4 Hydraulické vlastnosti

### 6.4.4.1 Retenční křivky

Vzhledem k tomu, že v českém konceptu se počítá s využitím bentonitu jako výplňového materiálu a nejsou dosud pevně stanoveny konstrukční uspořádání, požadavky, detaily je FEP v tuto chvíli totožný s FEP „buffer“ 6.3.4.1

#### 6.4.4.2 Hydraulická vodivost

Vzhledem k tomu, že v českém konceptu se počítá s využitím bentonitu jako výplňového materiálu anejsoú dosud pevně stanoveny konstrukční uspořádání, požadavky, detaily je FEP v tuto chvíli totožný s FEP „buffer“ 6.3.4.2

#### 6.4.4.3 Plynopropustnost

Vzhledem k tomu, že v českém konceptu se počítá s využitím bentonitu jako výplňového materiálu anejsoú dosud pevně stanoveny konstrukční uspořádání, požadavky, detaily je FEP v tuto chvíli totožný s FEP „buffer“ 6.3.4.3

### 6.4.5 Chemické, mineralogické a strukturní vlastnosti

#### 6.4.5.1 Chemické a mineralogické složení

Vzhledem k tomu, že v českém konceptu se počítá s využitím bentonitu jako výplňového materiálu anejsoú dosud pevně stanoveny konstrukční uspořádání, požadavky, detaily je FEP v tuto chvíli totožný s FEP „buffer“ 6.3.5.1

#### 6.4.5.2 Specifický povrch

Vzhledem k tomu, že v českém konceptu se počítá s využitím bentonitu jako výplňového materiálu anejsoú dosud pevně stanoveny konstrukční uspořádání, požadavky, detaily je FEP v tuto chvíli totožný s FEP „buffer“ 6.3.5.4

#### 6.4.6 Charakteristiky bentonitu významné pro migraci radionuklidů

Vzhledem k tomu, že v českém konceptu se počítá s využitím bentonitu jako výplňového materiálu anejsoú dosud pevně stanoveny konstrukční uspořádání, požadavky, detaily je FEP v tuto chvíli totožný s FEP „buffer“ 6.3.6

#### 6.4.7 Charakter pórů

Vzhledem k tomu, že v českém konceptu se počítá s využitím bentonitu jako výplňového materiálu anejsoú dosud pevně stanoveny konstrukční uspořádání, požadavky, detaily je FEP v tuto chvíli totožný s FEP „buffer“ 6.3.7

## 6.5 Konstrukční prvky úložiště

### 6.5.1 Konstrukční prvky úložiště (technické řešení)

#### 6.5.1.1 Zátky

**Popis:**

Zátky je možno rozlišit dle jejich fyzikální funkce (hydraulické, mechanické, proti vniknutí, Sievänen et al., 2012) nebo dle jejich umístění v HÚ:

- Zátky, uzavírající úložné vrty,

- Zátky uzavírající chodby,
- Uzávěry větracích šachet,
- Uzávěra celého úložiště.

Ukládací vrty jsou vždy u jejího ústí opatřeny zátkou. U vertikálního ukládání je zátkou myšlena vyplněná část vertikálního vrtu od ukládaného UOS s VJP po zpevněné dno zavážeční chodby. V případě horizontálního ukládání je zátka umístěna 7,5 m od ústí vrtu. Samotná zátka je uvažována dosahuje tl. 2,5 m a je zaklíněna do horniny v podobě prstence kolem celého vrtu. V době zpracování studie umístitelnosti (např. Butovič et al., 2020) nebylo podrobné konstrukční řešení této inženýrské bariéry a technologie její výstavby zpracováno (Butovič et al., 2020 TZ512\_2020, str 130).

Jediným praktickým příkladem řešení zátky v českém prostředí je výstavba a provoz EPSP (Experimental pressure and sealing plug), v Podzemní laboratoři Josef (Fakulta stavební ČVUT). Zátka vznikla v rámci projektu DOPAS (Full Scale Demonstration of Plugs and Seals; EURATOM FP7, projekt č. 323273). Zátka je navržena tak, aby splňovala požadavky jak na mechanickou odolnost/ únosnost, tak na hydraulickou těsnost (po nasycení střední, těsnicí části). V současnosti je zátka stále v provozu (4/2022). V rámci projektu byly nejprve řešeny související materiálové výzvy jako je vývoj betonu se sníženým pH a jeho využití při nástřiku zátky vyztužené skleněnými vlákny. Pro těsnicí část byla využita kombinace hutněných pelet a jejich nástřik.

#### **Vliv na dlouhodobou bezpečnost:**

Zátky plní svoji funkci v rámci provozní bezpečnosti – oddělují uzavřené prostoru od těch stále provozovaných. Funkční a tvralé oddělení je důležité jak pro bezchybné fungování „před“ zátkou (v provozovaných částech), tak i za ní – zajišťují stabilitu přilehlé oblasti backfillu a znemožňují přesun hmoty dále do otevřených oblastí HÚ.

V českém konceptu se jejich primární funkce (hydraulická, mechanická) v rámci dlouhodobé bezpečnosti neuvažuje, jsou tedy primárně, z hlediska dlouhodobé bezpečnosti, zdrojem vnesených materiálů (zejména beton). Tyto materiály mohou, při nevhodném množství a složení, způsobit nežádoucí interakce s bentonitem, popř. dalšími materiály HÚ, a tím následně ovlivnit chování úložiště. (viz FEP 6.5.1.2 Vnesený konstrukční materiál).

#### **Dostupná data:**

Návrh zátky EPSP popisuje Svoboda et al. (2015), materiálovými parametry se zabývá Vašíček et al. (2016). Celkovou informaci podávají např. Dvořáková et al. (2014) a Hanusová et al. (2016). Vývoj těsnicí funkce zátky v in-situ prostředí Podzemní laboratoře Josef popisuje aktuálně Svoboda et al. (2022).

Vlastní výzkumný program SÚRAO betonové směsi se sníženým pH (Kratochvíle et al., 2019; Pernicová et al., 2019) je dále realizován v rámci projektu H2020 EURAD – WP 16 MAGIC.

#### **Nejistoty:**

Dosud nebylo systematicky konstrukčně řešeno (princip, funkce, rozměry, materiály). Konkrétní podoba se bude částečně přizpůsobovat vybranému systému ukládání (vertikální, horizontální, rozměry).



**Reference:**

- BUTOVIČ A., GRÜNWARD L., BUREŠ P., POŘÍZEK J., ŠPINKA O., SOURAL J., ZAHRADNÍK O., MARTINČÍK J., KOBYLKA D. (2020): Studie umístitelnosti – aktualizace. Horka. ČVUT-SATRA-Mott MacDonald CZ, MS SÚRAO, TZ 512/2020
- DVOŘÁKOVÁ, M., ET AL. (2014). Experiment EPSP – stavba zátky pro hlubinné úložiště radioaktivních odpadů v rámci evropského projektu dopas. Tunel. 2014, 23(2), 4-10. ISSN 1211-0728.
- HANUSOVÁ, I., SVOBODA, J., VEČERNÍK P. (2016). Experimental pressure and sealing plug as part of the European DOPAS project – deep geological repository plug demonstration. Clay Minerals 2016; 51 (4): 589–601. doi: <https://doi.org/10.1180/claymin.2016.051.4.04>
- KRATOCHVÍLE L., KOLÍSKO J., DOBIÁŠ D., ČÍTEK D., MANDLÍK T., HURTIG K. (2019): Příprava, složení a vlastnosti malty se sníženým pH (LPM), MS SÚRAO TZ 369/2019, 14 s.
- PERNICOVÁ R., ČÍTEK D., DOBIÁŠ D., MANDLÍK T., KRATOCHVÍLE L., KOLÍSKO J. (2019): Vývoj betonu se sníženým pH, MS SÚRAO TZ 415/2019, 45 s.
- SIEVÄNEN, U., KARVONEN, T. H., DIXON, D., HANSEN, J. & JALONEN, T. (2012). Closure Production Line 2012 – Design, Production and Initial State of the Underground Disposal Facility Closure. POSIVA 2012-19. Posiva Oy, Eurajoki. ISBN 978-951-652-200-8.
- SVOBODA, J., VAŠÍČEK, R., SMUTEK, J. & ŠŤÁSTKA, J. (2015) Deliverable D3.15 - Detail design of EPSP plug. DOPAS project FP7 EURATOM, no. 323273; Czech Technical University in Prague
- SVOBODA, J.; VAŠÍČEK, R. (2022). Experiment EPSP – provoz 2024 - Průběžná zpráva 03/2022. Výzkumná zpráva č. 599/2022, SÚRAO, Praha
- VAŠÍČEK, R.; VEČERNÍK, P.; DVOŘÁKOVÁ, M.; HAUSMANNOVÁ, L.; ŠŤÁSTKA, J.; GONDOLLI, J.; HANUSOVÁ, I.; SVOBODA, J. ET AL. (2016). D3.21 Final results of EPSP laboratory testing. Praha: Czech Technical University in Prague. Report no. D3.21.

**6.5.1.2 Vnesený konstrukční materiál****Popis:**

Konstrukční materiály budou v úložišti zejména kvůli zajištění bezpečného provozu – zajištění stability díla (ostění, kotvy, výztuž/ sítě), těsnosti v místě lokálních přítoků (injektáže) a kvůli výstavbě konstrukcí nutných pro provoz (dna chodeb/ tunelů, zátky). Nepředpokládá se s odstraňováním těchto materiálů před uzavřením dané oblasti.

Z hlediska materiálu půjde o betony – předpokládají se se sníženým pH (Kratochvíle et al., 2019; Pernicová et al., 2019); kovové prvky a injektáže. Pro injektáže se nepředpokládají organické hmoty).

**Běžné betony**

Využití běžných typů betonu se v oblasti ukládacího horizontu nepředpokládá.

### Low-pH betony

Při plánovaném použití cementových materiálů v úložišti vysoceaktivního odpadu je potřeba vzít v úvahu jejich interakci s podzemní vodou, která povede ke vzniku roztoků s velmi vysokým pH (>12), jež může negativně ovlivnit okolní bentonitovou tlumící vrstvu. Tato skutečnost vedla k vývoji cementů/betonů s nízkým pH (LPC, low pH cement/concrete). LPC lze obecně definovat jako cement/beton, jehož výluh má nižší pH než 12, ideálně kolem hodnoty pH 11. V praxi to znamená, že v cementu chybí portlandit a je tedy složen především z C-S-H fáze s poměrem Ca/Si 0,8 (Savage a Benlow 2007).

### Organické látky

Cílem je zajistit co aplikaci látek organické povahy v co nejmenší míře, neboť organické látky a jejich degradační produkty by sloužily jako zdroj živin pro mikroorganismy. Použití některých organických látek ale bude zřejmě nezbytné: např. přísady do betonů na organické bázi (plastifikátory, zpomalovače tuhnutí apod.).

### Kovové prvky

Jako materiál kotev, výztuží je v běžné praxi ožívána ocel. Je možno předpokládat, že ocelové konstrukční prvky budou použity i v HÚ.

### **Vliv na dlouhodobou bezpečnost:**

Z hlediska dlouhodobé bezpečnosti půjde primárně o materiálové interakce s přihlédnutím k pozici, objemu a rozsahu jednotlivých materiálů a komponent, a tudíž jejich významnost pro případné ohrožení dlouhodobé bezpečnosti je malá.

### **Dostupná data:**

V českém prostředí byly cementové směsi se sníženým pH studovány v projektu MPO FR-TI1\_362 (Dobrev et al., 2013), používány v rámci evropského projektu DOPAS (Vašíček et al., 2016) a cementová malta a beton se sníženým pH (LPC\_SÚRAO) byly vyvinuty v rámci samostatného projektu SÚRAO (Kratochvíle et al., 2019 a Pernicová et al., 2019).

Degradace organických látek v podmínkách úložišť RAO zkoumá Drtinová et al. (2021).

### **Nejistoty:**

Nejsou vybrány finální materiály ani varianta / dispozice HÚ.

Není stanovena specifikace složení a dostupnost surovin v době výstavby a provozu úložiště.

### **Reference:**

DOBREV D., BALEK V., ČERVINKA R., ČLUPEK M., KOUŘIL M., NOVÁK P., SILBER R., STOULIL J., VEČERNÍK P. (2013): Výzkum materiálu úložných obalových souboru, vyhořelého jaderného paliva a různých forem radioaktivních odpadů a vývoj postupu jejich hodnocení – Závěrečná zpráva za etapu 3; projekt MPO M FR-TI1\_362, ÚJV zpráva č. 14280, 120 s.

DRTINOVÁ B., VAŠÍČEK R., VEČERNÍK P., HLAVÁČ, Z., BERGELOVÁ K., BUREŠOVÁ M., ČEJKOVÁ A., ČERNOCHOVÁ K., HYBÁŠKOVÁ M., KITTNEROVÁ J., KUČEROVÁ M., KOZEMPEL J., SVOBODA J., VLK M. (2021). WP3 CORI: Souhrn výstupů českých stran projektu EURAD, TZ 558/2021, Praha

KRATOCHVÍLE L., KOLÍSKO J., DOBIÁŠ D., ČÍTEK D., MANDLÍK T., HURTIG K. (2019): Příprava, složení a vlastnosti malty se sníženým pH (LPM), MS SÚRAO TZ 369/2019, 14 s.

PERNICOVÁ R., ČÍTEK D., DOBIÁŠ D., MANDLÍK T., KRATOCHVÍLE L., KOLÍSKO J. (2019): Vývoj betonu se sníženým pH, MS SÚRAO TZ 415/2019, 45 s.

SAVAGE D., BENLOW S. (2007): Low pH cement. – SKI Report 2007:32, Stockholm, SE, 46 s.

VAŠÍČEK R., HAUSMANNOVÁ L., ŠTÁSTKA J., SVOBODA J., NÁDHERNÁ D., PACOVSKÁ D., HUBÁLOVSKÁ J., VEČERNÍK P., TRPKOŠOVÁ D., GONDOLLI J., DVOŘÁKOVÁ M., HANUSOVÁ I., BĚLÍČKOVÁ L. (2016): D3.21 Final results of EPSP laboratory testing, projekt DOPAS FP7 – 323273.

## 6.5.2 Materiálové a chemické složení

### Popis:

Konstrukční materiály budou v úložišti zejména kvůli zajištění bezpečného provozu – zajištění stability díla (ostění, kotvy, výztuž/ sítě), těsnosti v místě lokálních přítoků (injektáže) a kvůli výstavbě konstrukcí nutných pro provoz (dna chodeb/ tunelů, zátky). Nepředpokládá se s odstraňováním těchto materiálů před uzavřením dané oblasti. Z hlediska materiálu půjde o betony – předpokládají se se sníženým pH; kovové prvky a injektáže. Pro injektáže se nepředpokládají organické hmoty).

Popis a vlastností konstrukčních materiálů jsou popisovány v běžícím projektu Výplně a ostatní inženýrské komponenty HÚ – DÚ04.

Více viz FEP 6.5.1.2 Vnesený konstrukční materiál

### Vliv na dlouhodobou bezpečnost:

Z hlediska dlouhodobé bezpečnosti půjde primárně o materiálové interakce s přihlédnutím k pozici, objemu a rozsahu jednotlivých materiálů a komponent, a tudíž jejich významnost pro případné ohrožení dlouhodobé bezpečnosti je malá.

### Dostupná data:

#### Běžné betony

Využití běžných typů betonu se v oblasti ukládacího horizontu nepředpokládá.

#### Low-pH betony

LPC lze obecně definovat jako cement/beton, jehož výluh má nižší pH než 12, ideálně kolem hodnoty pH 11. V praxi to znamená, že v cementu chybí portlandit a je tedy složen především z C-S-H fáze s poměrem Ca/Si 0,8 (Savage a Benlow 2007). Low-pH směsi vyvinuté v projektu SÚRAO (Pernicová et al., 2019) jsou založeny na CEM I 42,5R s přidavkem mikrosiliky a strusky.

#### Organické látky

Použití některých organických látek bude zřejmě nezbytné: např. přísady do betonů na organické bázi (plastifikátory, zpomalovače tuhnutí apod.). Vliv plastifikátorů a jejich degradačních produktů na vlastnosti cementových a jejich interakci s radionuklidy je studován

v rámci projektu EURAD WP3 – CORI (Drtinová et al., 2021), v tomto projektu jsou studovány plastifikátory založené na lignosulfátech a směsi polykarboxyletheru a lignosulfátu.

### Kovové prvky

Jako materiál kotev, výztuží je v běžné praxi ožívána ocel. Je možno předpokládat, že ocelové konstrukční prvky budou použity i v HÚ. Tyto prvky jsou vyráběny z vysoce kvalitních ocelí různých tříd dle požadavků na použití a výrobců.

### **Nejistoty:**

Nejsou vybrány finální materiály ani varianta / dispozice HÚ.

Není stanovena specifikace složení a dostupnost surovin v době výstavby a provozu úložiště.

### **Reference:**

DRTINOVÁ B., VAŠÍČEK R., VEČERNÍK P., HLAVÁČ, Z., BERGELOVÁ K., BUREŠOVÁ M., ČEJKOVÁ A., ČERNOCHOVÁ K., HYBÁŠKOVÁ M., KITTNEROVÁ J., KUČEROVÁ M., KOZEMPEL J., SVOBODA J., VLK M. (2021). WP3 CORI: Souhrn výstupů českých stran projektu EURAD, TZ 558/2021, Praha

PERNICOVÁ R., ČÍTEK D., DOBIÁŠ D., MANDLÍK T., KRATOCHVÍLE L., KOLÍSKO J. (2019): Vývoj betonu se sníženým pH, MS SÚRAO TZ 415/2019, 45 s.

SAVAGE D., BENLOW S. (2007): Low pH cement. – SKI Report 2007:32, Stockholm, SE, 46 s.

## **6.6 Rozhraní mezi jednotlivými komponentami**

### **6.6.1 Rozhraní bentonit / hornina**

#### **Popis:**

Bentonitová inženýrská bariéra (jako těsnící a výplňový materiál) bude v kontaktu s okolní hostitelskou horninou. Po uzavření jednotlivých úložných prostor či úložiště jako celku bude docházet k postupné saturaci bentonitu podzemní vodou z okolní hostitelské horniny. Na rozhraní bentonit/hostitelská hornina může v závislosti na různých faktorech docházet k těmto jevům (Červinka et al. 2015):

- Mechanická a chemická eroze bentonitu – fyzický odnos horniny, snížení objemové hmotnosti, pórovitosti a s tím spojený případný vznik koloidních částic.
- Vznik jílových koloidů – v případě příhodných podmínek mohou jílové koloidy zůstat v podzemní vodě stabilní a přispět k migraci uvolněných radionuklidů.
- Interakcí podzemní vody a bentonitu dojde ke vzniku pórové vody v bentonitu, jejíž chemické složení bude mít zásadní vliv na rozpustnost, difúzi a sorpci uvolněných radionuklidů.
- Interakce podzemní vody a bentonitu rovněž ovlivní samotný bentonit (např. iontová výměna mezi bentonitem a podzemní vodou) a může dojít ke změně jeho chemických, ale i geotechnických vlastností, jakož i transportních (difúze).

V širším měřítku je za oblast rozhraní možno považovat i zóny poškození horniny ražbou – EDZ/ EdZ.

**Vliv na dlouhodobou bezpečnost:**

Vznik příhodnějších podmínek pro migraci radionuklidů na kontaktu bentonit/ hornina (preferenční cesty, vznik koloidů, zhoršení těsnicí schopnosti bentonitu).

V oblasti EDZ/ EdZ je možnost vzniku otevřených diskontinuit různého měřítka, které sice nemají vliv na celkovou stabilitu podzemního díla, ale mohou představovat snadnější cesty pro případnou migraci radionuklidů. Rovněž šíření tepla v částečně rozpukaném masívu kolem výrubu může být odlišné od oblasti více vzdálené. Charakter a vývoj EDZ má tedy vliv na bezpečnost úložiště, robustnost inženýrských řešení, a tedy i na použité technologie rozpojování (Bureš et al., 2017).

**Dostupná data:**

Rešerše na toto téma je uvedena ve zprávě Červinka et al. (2015). Rozhraní bentonit – hornina bylo studováno v práci Hofmanová et al. (2019) pomocí sledování vývoje vybraných specií během interakce kompaktovaného bentonitu s třemi syntetickými podzemními vodami sanavzujícími transportními experimenty. Studium koloidů se věnovaly práce v rámci EU projektu CEBAMA (shrnutí v závěrečné zprávě Červinka R. et al. (2016).

**Nejistoty:**

Významnou proměnnou je složení podzemní vody, které se může měnit se časem, a heterogenita bentonitu.

**Reference:**

BUREŠ P., GRÜNWARD L., POŘÍZEK J., ZAHRADNÍK O., VEVERKA A., FIEDLER F., NOHEJL J., BAUDIS J., KOBYLKA D., MAREK P. (2018): Studie umístitelnosti HÚ v lokalitě Horka. MS SÚRAO TZ 137/2017, SÚRAO, PRAHA.

ČERVINKA R., GONDOLLI J., KOLOMÁ K. (2016): Eroze bentonitu a její dopad na dlouhodobé chování inženýrských bariér hlubinného úložiště a transport radionuklidů. Zpráva UJV Z4495. Husinec-Řež, a.s.

HOFMANOVÁ E., ČERVINKA R., VOPÁLKA D., BABOROVÁ L., BRÁZDA L., PECKOVÁ A., VETEŠNÍK A., VIGLAŠOVÁ E., VAŠÍČEK R. (2019): Transport radionuklidů z úložiště / vstupní parametry a procesní modely pro hodnocení transportu radionuklidů přes inženýrské bariéry: Závěrečná zpráva. – MS SÚRAO, ZZ 420/2019, Praha

## 6.6.2 Rozhraní buffer/backfill

**Popis:**

U vertikálního ukládání je vyplněná část vrtu od ukládaného UOS s VJP po zpevněné dno zavážecí chodby považována za zátku (např. Butovič et al., 2020). Při předpokladu, že tato zátka bude mít stejné parametry a materiál jako buffer, bude rozhraní buffer/ backfill fakticky na kontaktu „zátka“ a výplně zavážecí chodby. Rozhraní tedy bude tvořeno oblastí kontaktu dvou konstrukcí z bentonitu s různými fyzikálně-mechanickými vlastnostmi (typicky objemová hmotnost sušiny, hydraulická vodivost, bobtnací schopnost) popř. budou v různé formě (bloky/ pelety). Možností je i využití různých typů/ zdrojů bentonitu pro buffer a backfill. Vzájemné ovlivnění tedy bude primárně mechanické (homogenizace, bobtnání bufferu do backfillu) popř. geochemické při použití různých druhů bentonitů.

V případě horizontálního ukládání je zátka umístěna 7,5 m od ústí vrtu (např. Butovič et al., 2020). Backfill je na opačné straně zátky, než se nachází ukládací mikrotunel vyplněný bufferem. V tomto případě tedy přímé rozhraní buffer/ backfill nebude.

#### **Vliv na dlouhodobou bezpečnost:**

Možné zhoršení parametrů bufferu, a tím i jeho těsnicí a retardační funkce.

- Při chybném návrhu – velkém dosahu zóny „zředění“ objemové hmotnosti do oblasti bufferu
- V případě využití dvou typů bentonitů možné geochemické ovlivnění

#### **Nejistoty:**

Nejsou stanoveny funkční ukazatele a kritéria pro materiál i konstrukci bufferu ani backfillu v ČR. Využití dat (SKB, POSIVA) je možné pouze v omezené míře. Typicky materiálová data lze na podmínky ČR přenést pouze orientačně a se zřetelem na použitý typ bentonitu (Na/ Ca-Mg).

Nejistoty spočívají i v nejasnosti o finálním výběru materiálu pro backfill. Ten může být stejný jako pro buffer, nicméně nebyla vyloučena varianta použití materiálu jiného. V tom případě, by bylo nutné se vypořádat i s případným vzájemným chemickým ovlivněním těchto dvou různých materiálů.

#### **Reference:**

BUTOVIČ A., GRÜNWARD L., BUREŠ P., POŘÍZEK J., ŠPINKA O., SOURAL J., ZAHRADNÍK O., MARTINČÍK J., KOBYLKA D. (2020): Studie umístitelnosti – aktualizace. Horka. ČVUT-SATRA-Mott MacDonald CZ, MS SÚRAO, TZ 512/2020

### **6.6.3 Rozhraní zátka/ hornina**

#### **Popis:**

Rozhraní zátka – hornina bude, z hlediska materiálového, kombinací kontaktních ploch horniny s betonem (předpoklad betonu se sníženým pH; Kratochvíle et al. (2019; Pernicová et al., 2019), bentonitem (těsnicí sekce) či injektážními hmotami (injektáže z důvodu zatěsnění kontaktu po případném smrštění betonu, popř. injektáže nejbližší oblasti v horninovém masivu – EDZ – stejně jako na rozhraní bentonit/ hornina bude, v určitém okolí chodby/ tunelu zóna postižená změnami vlivem razicích prací).

#### **Nejistoty:**

Nejistotou je materiálové složení, konstrukční řešení zátek.

#### **Vliv na dlouhodobou bezpečnost:**

- vliv na provozní bezpečnost – možná netěsnost vytváří preferenční cestu;
- vliv na dlouhodobou bezpečnost – objem vnesených materiálů (zátka nemá dlouhodobou bezpečnostní funkci).

**Reference:**

KRATOCHVÍLE L., KOLÍSKO J., DOBIÁŠ D., ČÍTEK D., MANDLÍK T., HURTIG K. (2019): Příprava, složení a vlastnosti malty se sníženým pH (LPM), MS SÚRAO TZ 369/2019, 14 s.

PERNICOVÁ R., ČÍTEK D., DOBIÁŠ D., MANDLÍK T., KRATOCHVÍLE L., KOLÍSKO J. (2019): Vývoj betonu se sníženým pH, MS SÚRAO TZ 415/2019, 45 s.

### 6.6.4 Rozhraní zátka/ backfill

**Popis:**

Na rozhraní cementových materiálů (v podobě konstrukčních materiálů zátek) a bentonitu (těsnící a výplňový materiál) budou vznikat výrazné geochemické gradienty, které mohou v blízkosti rozhraní vést k:

- rozpouštění jílových minerálů bentonitu, které může lokálně ovlivnit sorpční kapacitu pro radionuklidy
- změnám v zastoupení iontově výměnného komplexu bentonitu, které mohou vést ke změně bobtnacího tlaku.
- změnám v porositě bentonitu a cementových materiálů díky rozpouštění/srážení minerálů, které mohou lokálně vést ke změně transportních vlastností (hydraulická vodivost, difuzivita)
- změnám v pH uvnitř bentonitu, které mohou ovlivnit sorpci a rozpustnost radionuklidů
- loužení a degradaci cementových materiálů

V počátečním stavu však k žádným interakčním dějům docházet nebude, neboť materiály nebudou prosyceny vodou, která je nezbytným prvkem interakčních procesů.

**Vliv na dlouhodobou bezpečnost:**

Možná interakce betonu a bentonitu, tvorba preferenčních cest – lokální zvýšení propustnosti v oblasti kontaktu

**Dostupná data:**

V ČR zatím nebylo systematicky řešeno.

**Nejistoty:**

Nejistotou je materiálové složení a konstrukční řešení zátek.

**Reference:**

Nejsou, zatím nebylo systematicky řešeno.

## 7 Procesy v úložišti VJP

### 7.1 Tepelné procesy

#### 7.1.1 Transport tepla (bentonitem/ bufferem)

##### Popis:

Transport tepla nebo přenos tepla označuje procesy výměny energie způsobené rozdíly teplot. Obecně platí, že přenos tepla má tendenci měnit rozložení teploty v systému. Teplota se může měnit také v důsledku rozptylu energie např. při chemických reakcích nebo radioaktivním rozpadu.

Pro transport tepla dominantní vedení (tepla) má tendenci vyrovnávat teplotní rozdíly uvnitř tělesa nebo mezi tělesy, která jsou ve vzájemném kontaktu, bez souvisejícího přenosu hmoty. Tepelný tok je úměrný teplotnímu gradientu ( $\nabla T$ ; Fourierův zákon); obecná řídicí tepelná rovnice (odvozená z Fourierova zákona a zákona zachování energie) pro vývoj teploty ( $T$ ) je:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{c_p \cdot \rho} \nabla \cdot (\lambda \nabla T) \quad (6)$$

Kde figuruje  $c_p$  (měrná tepelná kapacita),  $\rho$  (objemová hmotnost) a  $\lambda$  (součinitel tepelné vodivosti).

Kromě vedení se teplo přenáší také při transportu hmoty (konvekci) či zářením.

##### Vliv na dlouhodobou bezpečnost:

Teplo se přenáší z povrchu UOS do bentonitové bariéry a přes ní dále do horninového prostředí (přímo do okolí ukládacího vrtu či přes zásepový materiál). Zpočátku po umístění UOS budou existovat mezery mezi UOS a bentonitovou bariérou a bariérou a horninou. Během této doby bude teplo přenášeno kombinací sálání a vedení přes obě mezery a vedením přes nenasycený bentonit. Může docházet i ke konvekci, ale vzhledem k velmi nízké propustnosti bentonitu lze tento příspěvek zanedbat.

Účinnost přenosu tepla bentonitem je důležitá pro efektivitu celého systému, protože ovlivňuje maximální teplotu bariéry, pro kterou byla stanovena prahová hodnota ( $< 100 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

Když je bentonitová bariéra nasycena vodou a nabobtná tak, že jsou všechny mezery a spáry vyplněny, teplo se teplo přenáší vedením přes vodou nasycený bentonit, tedy výrazně lépe.

##### Dostupná data:

Z hlediska transportu tepla je nutné znát jednak hodnoty homogenních materiálů a jednak nehomogenních směsí (peletizovaných bentonitů) či nehomogenních systémů (mezera/ bentonitová vrstva/ mezera).

Parametry homogenních vzorků (BCV\_2017) jsou uvedeny v Červinka et. al. (2019), v rámci prací byly také měřeny hodnoty  $c$ , resp.  $c_p$ ; viz FEP 6.3.2 Termofyzikální vlastnosti.

Popis využití dat pro dimenzování HÚ je ve zprávě Kobylky (2017). Jde o zjednodušení vztahu mezi součinitelem tepelné vodivosti a objemovou hmotností sušiny, resp. vlhkostí na „reprezentativní“ (konzervativní), konstantní hodnotu homogenního materiálu (Kobylka využívá hodnotu  $0,7 \text{ W/mK}$ ).



*(Kobylka, 2017) Uvažovaná hodnota součinitele tepelné vodivosti je stanovena konzervativně a odpovídá méně hustému či vodou málo nasycenému materiálu (pod 50 %, Ikonen & Raiko, 2015). Většina zjednodušujících studií uvažuje efektivní součinitel tepelné vodivosti (tj. po zohlednění distribuce vlhkosti) kompaktních bentonitových bloků pro celou vrstvu cca 1 W/mK (viz např. Ikonen & Raiko, 2015, Hökmark, 2009; Blaheta et. al., 2012).*

Pro reálné, nehomogenní případy více vrstev (rozhraní, vzduchová či bentonitem zaplněná mezera, bentonitové bloky) se využívá efektivní součinitel tepelné vodivosti, který se stanoví na základě mocnosti jednotlivých vrstev a charakteristik dílčích materiálů. Sálání a konvekce jsou, konzervativně a z důvodu zjednodušení, zanedbány.

### **Nejistoty:**

Využití konstantních hodnot pro tepelné výpočty (zanedbány závislosti na vlhkosti, objemové hmotnosti sušiny, teplotě).

Chybějící data pro tepelné vodivosti při plném nasycení materiálu (= za současného působení bobtnacího tlaku).

Chybějící experimentální data pro složitější systémy – pro ověření efektivních tepelných vodivostí pro systémy typu ne-zaplněná mezera/ blok, soustava bloků, pelety; za různých podmínek (sycení, míra homogenizace, tlak, teplota).

Konstrukční řešení (dimenze, parametry materiálů) rozhraní (mezer/ bloků/ pelet).

Z hlediska transportu tepla a vývoje HÚ v čase se počáteční podmínky v úložišti řadí k těm nejméně vhodným (bariéra pouze s počáteční vlhkostí materiálu; bloky v nedokonalém kontaktu, nezahojené mezery se vzduchem/ zásypem s menší objemovou hmotností, než jsou bloky). Proto je uvažování materiálových parametrů odpovídajících této fázi konzervativní.

### **Reference:**

BLAHETA J. A KOL. (2012). Tepelná analýza referenčního návrhu úložiště vyhořelého jaderného paliva, Ústav geoniky AV ČR, Ostrava

ČERVINKA R., VEČERNÍK P., KAŠPAR V., VAŠIČEK R. (2018): Kompletní charakterizace bentonitu BCV 2017. SÚRAO Technická zpráva 419/2019, Česká republika, 33 s.

HÖKMARK H., LÖNNQVIST M., KRISTENSSON O., SUNDBERG J., HELLSTRÖM G. (2009). Strategy for thermal dimensioning of the final repository for spent nuclear fuel, R-09-04, SKB

IKONEN K., RAIKO H. (2015): Thermal Analysis of KBS-3H Repository, Working Report 2015-01, Posiva Oy

KOBYLKA D. (2017). Optimalizace vzájemné vzdálenosti UOS. SÚRAO Technická zpráva 135/2017, Česká republika, 167 s.

SKB (2010). Buffer, backfill and closure process report for the safety assessment SR-Site. SKB TR 10-47. Svensk Kärnbränslehantering AB

SKB (2014). Engineered Barrier Process Report for the Safety Assessment SR-PSU. SKB TR 14-04. Svensk Kärnbränslehantering AB

## 7.2 Hydraulické procesy

### 7.2.1 Transport vody v bentonitu

**Popis** vychází z SKB (2010):

#### Transport vody v nenasycených podmínkách

Nejdůležitější hnací silou pro sycení vodou v podmínkách hlubinného úložiště je gradient negativního tlaku vody nebo relativní vlhkosti v pórech bentonitu (bufferu), který vede k absorpci vody z okolní horniny. Rozhodujícím faktorem pro časový vývoj procesu je také přísun vody z horniny transportem vody v puklinách a v horninové matici (SKB, 2010).

Lze rozlišit následující hydraulické dílčí procesy (SKB, 2010):

- Transport vody v kapalně fázi, který je řízen a poháněn tlakovým gradientem ve vodě, teplotním gradientem, osmotickým gradientem, gravitací a gradientem hustoty.
- Transport vody ve formě páry, kde je transport řízen a poháněn tlakovým gradientem ve vodě, teplotním gradientem, osmotickým gradientem, gravitací a gradientem hustoty.

Důležitou proměnnou je tlak pórové vody, který lze popsat podle rovnice:

$$s = (u_a - u_w) + \pi, \quad (7)$$

kde  $s$  je volná energie vody v zemině (celkové sání),  $u_w$  je tlak pórové vody,  $u_a$  je tlak plynu v pórech a  $\pi$  je osmotické sání okolní podzemní vody.  $(u_a - u_w)$  se nazývá maticové sání.

Celkové sání lze popsat jako součet maticového sání (kapilární síly) a osmotického sání (dané rozdílem v koncentraci iontů).

Za hlavní hnací sílu proudění vody v nenasyceném jílu se obvykle považuje gradient tlaku pórové vody. Celkové sání je funkcí obsahu vody v jílu (tzv. retenční křivka). Hodnota sacího tlaku  $s$  (MPa) se počítá pomocí Kelvinovy rovnice:

$$s = -10^{-6} \cdot \frac{R \cdot T}{V_w} \ln\left(\frac{RH}{100}\right), \quad (8)$$

kde  $R$  je univerzální plynová konstanta ( $= 8,314 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$ ),  $T$  (K) je absolutní teplota,  $V_w$  je molární objem vody ( $= 1,803 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{mol}$  při atmosférickém tlaku a laboratorní teplotě) a  $RH$  (%) je relativní vlhkost.

#### Transport vody za nasycených podmínek

Transport vody v nasyceném bentonitu (bufferu) je kombinací dílčích procesů kdy je makroskopicky výsledkem velmi nízká propustnost nasyceného materiálu.

Nejdůležitějším mechanismem v nasycených podmínkách je transport vody v kapalně fázi, který je řízen gradientem tlaku vody. Tento proces lze popsat Darcyho zákonem. Odchytky od Darcyho zákona, které mohou nastat při nízkých gradientech, jsou příznivé v tom smyslu, že vedou ke snížení rychlosti průtoku (např. Dixon et al. (1999) a Hansbo (1960). Hydraulická

vodivost  $k$  (součinitel propustnosti; koeficient filtrace;  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) je funkcí složení bentonitu, čísla pórovitosti, koncentrace iontů v pórové vodě a teploty  $T$ . Rovnice pro ustálené proudění, dle Darcyho:

$$q = A k i, \quad (9)$$

kde  $q$  je průtok ( $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ),  $A$  je plocha kolmá na směr proudění ( $\text{m}^2$ ) a  $i$  hydraulický gradient ( $\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$ ). Propustnost  $K$  ( $\text{m}^2$ ) je vlastnost prostředí, nezávislá na tekutině:

$$K = k \mu / \gamma, \quad (10)$$

kde  $k$  je hydraulická vodivost, tj. součinitel z Darcyho zákona výše;  $\mu$  je dynamická viskozita ( $\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$ ) ( $\mu$  = kinematická viskozita  $\times \rho$ ) a  $\gamma$  objemová tíha protékající tekutiny ( $\text{N}\cdot\text{m}^{-3}$ ).

U bentonitu je tento parametr ovlivněn převážně objemovou hmotností sušiny (tedy jejím zhutněním), obsahem smektitů a také typem výměnného kationtu. S rostoucí objemovou hmotností sušiny (s vyšším stupněm zhutnění) exponenciálně klesá hydraulická vodivost. Vyšší hydraulická vodivost (větší propustnost materiálu) je také udávána pro bentonity s nižším podílem smektitu a pro bentonity s převahou dvojmocných kationtů v mezivrstvě.

#### **Vliv na dlouhodobou bezpečnost:**

Zvýšení propustnosti bufferu vlivem dlouhodobé interakce s okolím (teplota, voda, další materiály)

#### **Dostupná data:**

Retenční křivky (viz FEP 6.3.4.1 Retenční křivky).

Hydraulická vodivost (viz FEP 6.3.4.2 Hydraulická vodivost)

#### **Nejistoty:**

Materiálové složení bufferu

Parametry a konstrukční řešení bufferu

Nejistoty související s předpovědí vývoje HÚ (sycení, jeho nehomogenita; numerické modely)

Vliv dlouhodobých interakcí s okolím (teplota, voda, další materiály).

#### **Reference:**

ČERNOCHOVÁ K., KAŠPAR V., KRUIS J., MAŠÍN D., NAJSER J., SVOBODA, J., VAŠÍČEK, R. (2021): WP 7 HITEC: Souhrn výstupů českých stran projektu EURAD, SÚRAO TZ 562/2021. Praha

ČERVINKA R., VAŠÍČEK R., VEČERNÍK P., KAŠPAR V. (2018): Kompletní charakterizace bentonitu BCV 2017. SÚRAO Technická zpráva 419/2019, Česká republika, 33 s.

ČSN EN ISO 17892-11 (721007) Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemín – Část 11: Stanovení propustnosti. Praha: Český normalizační institut. 2019

DELAGE, P.; HOWAT, M.D.; CUI, Y.J. (1998). The relationship between suction and swelling properties in a heavily compacted unsaturated clay. Eng. Geol. 1998, 50, 31–48.

- DIXON D. A., GRAHAM J., GRAY M. N. (1999). Hydraulic conductivity of clays in confined tests under low hydraulic gradients. *Canadian Geotechnical Journal*, 36, pp 815–825.
- HANSBO S. (1960). Consolidation of clay, with special reference to influence of vertical drains: a study made in connection with full-scale investigations at Skå-Edeby. Ph. D. thesis. Chalmers University of Technology, Gothenburg.
- HAUSMANNOVÁ, L., HANUSOVÁ, I., A DOHNÁLKOVÁ, M. (2018). Summary of the research of Czech bentonites for use in the deep geological repository – up to 2018, SÚRAO 309/2018/ENG Kašpar, V., Šachlová, Š., Hofmanová, E.; Komárková, B., Havlová, V.; Aparicio, C.; Černá, K., Bartak, D., Hlaváčková, V. (2021). Geochemical, Geotechnical, and Microbiological Changes in Mg/Ca Bentonite after Thermal Loading at 150 °C. *Minerals* 2021, 11, 965. <https://doi.org/10.3390/min11090965>
- KARLAND, O.; OLSSON, S.; NILSSON, U. (2006). SKB Technical Report TR-06-30: Mineralogy and Sealing Properties of Various Bentonites and Smectite-Rich Clay Materials; Svensk Kärnbränslehantering AB: Stockholm, Sweden, 2006; p. 112.
- LAUFEK, F.; HANUSOVÁ, I.; SVOBODA, J.; VAŠÍČEK, R.; NAJSER, J.; KOUBOVÁ, M.; ČURDA, M.; PTICEN, F., VACULÍKOVÁ, L., SUN H., MAŠÍN D. (2021). Mineralogical, Geochemical and Geotechnical Study of BCV 2017 Bentonite—The Initial State and the State following Thermal Treatment at 200 °C. *Minerals*. 2021, 11(8), ISSN 2075-163X.
- ROMERO, E.; DELLA VECCHIA, G.; JOMMI, C. (2011) An insight into the water retention properties of compacted clayey soils. *Géotechnique* 2011, 61, 313–328.
- SKB (2010). Buffer, backfill and closure process report for the safety assessment SR-Site. SKB TR 10-47. Svensk Kärnbränslehantering AB
- SUN, H.; MAŠÍN, D.; NAJSER, J.; NEDĚLA, V.; NAVRÁTILOVÁ, E. (2018) Bentonite microstructure and saturation evolution in wetting–drying cycles evaluated using ESEM, MIP and WRC measurements. *Géotechnique* 2018, 69, 713–726
- VAŠÍČEK R., BEDRNÍKOVÁ E., ČERNÁ K., BARTAK D., ČERNOCHOVÁ K., PUSZTAI M., SVOBODA J., ŠACHLOVÁ Š., KAŠPAR V., KUČEROVÁ M., VEČERNÍK P., ZUNA M. (2022). Metodiky testování bentonitu, TZ590/2022, 2022, Praha
- VEČERNÍK P., HOFMANOVÁ E., PECKOVÁ A., KAŠPAR V., TRPKOŠOVÁ D. (2017): Vývoj aparatur pro charakterizaci materiálů inženýrských bariér hlubinného úložiště radioaktivních odpadů a vyhořelého jaderného paliva - TA04021378. Zpráva ÚJV Řež, a. s. číslo 14671.
- VEČERNÍK P., TRPKOŠOVÁ D., HOFMANOVÁ E. (2014): Vývoj aparatur pro charakterizaci materiálů inženýrských bariér hlubinného úložiště radioaktivních odpadů a vyhořelého jaderného paliva - TA04021378. Zpráva ÚJV Řež, a. s. číslo 14422.
- VILLAR, M. V. (2007): Water retention of two natural compacted bentonites. *Clays and Clay Minerals*, vol. 55, No. 3, 311-322.

## 7.2.2 Transport plynu v bentonitu

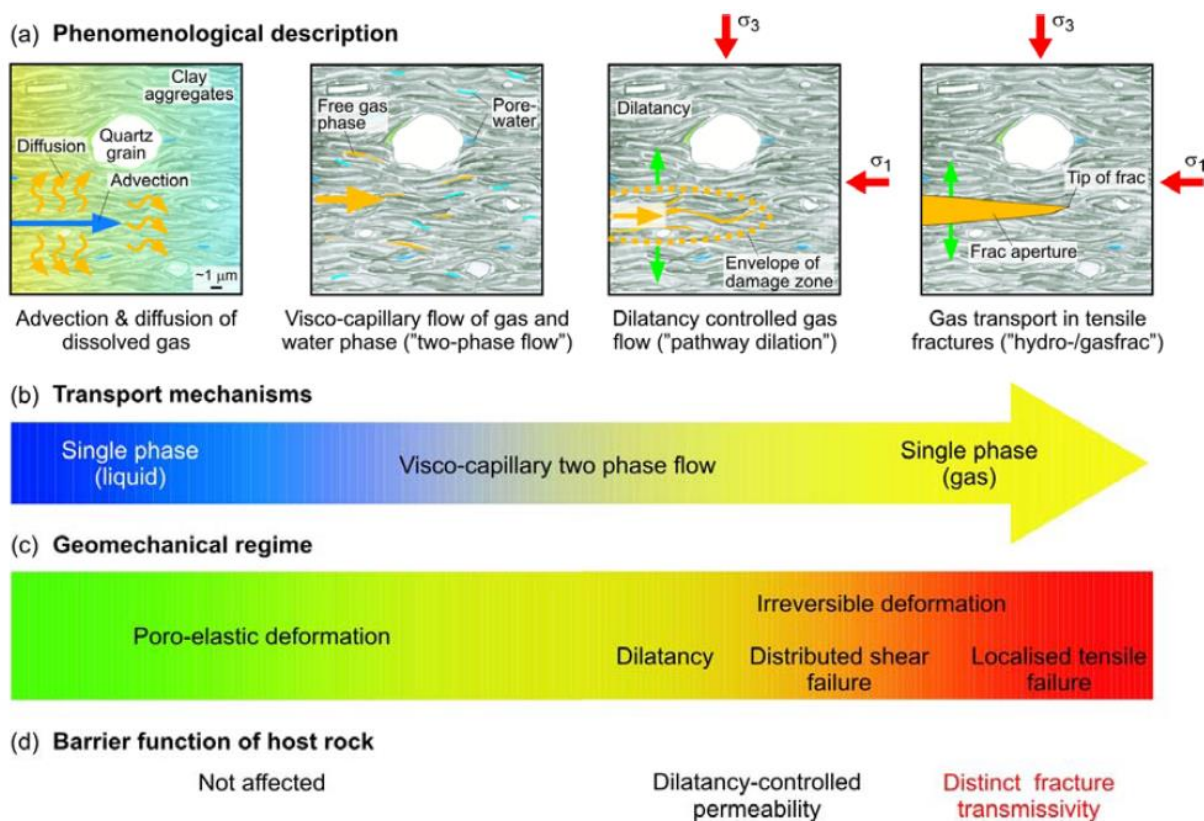
### Popis:

Transport plynu skrz bentonitovou bariéru v hlubinném úložišti je velmi složitý a ovlivňuje ho velké množství procesů.

Tlumicí materiál na bázi bentonitu se chová v principu shodně jako ostatní materiály s velmi nízkou propustností. Transport plynu je tedy ovlivněn nejen hydraulickými a mechanickými vlastnostmi (vodivost, porozita, pevnost,...), ale i vlastním stavem (stupeň nasycení, pórový tlak, napjatost,...), případně jeho historií. Z fenomenologického hlediska je možné základní transportní procesy rozdělit následovně:

- Advektivně-difusivní transport plynu rozpuštěného v pórové vodě
- Viskózně-kapilární dvoufázové proudění
- Dilatantní proudění plynu
- Proudění plynu podél makroskopických tahových puklin (hydraulické/plynové štěpení prostředí)

Příklad těchto procesů pro Opalinus clay je zobrazen na Obr. 14.



Obr. 14 Klasifikace transportních procesů pro materiály s nízkou propustností s příkladem pro Opalinus Clay (Marshall 2008)

Druh plynu, rychlost vzniku plynu a množství vzniklého plynu ovlivňuje významným způsobem transportní chování. Tyto vlivy určují, jaký transportní mód bude dominantní v jaké fázi uzavírání úložiště. Další procesy, které mají vliv na transport plynu v úložišti a které je nutné

brát v úvahu, jsou sorpce, rozpouštění a vyloučení plynu v/z pórové vody a fázové přechody vody.

Advektivní proudění popisuje Darcyho zákon. Pro stanovení rychlosti difúze a difúzních koeficientů existuje několik způsobů a přístupů (Boudreau, 1996; Grathwohl, 1998). Viskózně-kapilární dvoufázové proudění plynu skrz porézní materiál, kdy dochází k vytlačování vody z pórů, popisuje např. (Lenormand, Touboul, & Zarcone, 1988). Tento druh proudění je však v materiálech s nízkou propustností a nízkou pevností značně obtížný, a proto může být proudění plynu skrz cesty vytvořené dilatací důležitý. V těchto materiálech nedochází k žádnému proudění plynu, dokud není překročen vysoký tlak plynu. Poté dojde k vytvoření preferenční cesty konsolidací materiálu a vznikne tak prostor (mikrofraktury) v materiálu, kudy může plyn proudit.

Podrobně se všemi transportními módy a procesy ovlivňující transport plynu v úložišti zabývá State-of-the-Art WP GAS z projektu EURAD EURAD (Levasseuer, a kol., 2021), kde jsou popsány jednotlivé scénáře a vlivy.

#### **Vliv na dlouhodobou bezpečnost:**

Předpokládá se, že zejména díky anaerobní korozi kovů bude  $H_2$  hlavním plynem, který se zde bude v průběhu životnosti úložiště vytvářet. Jílová bariéra bude mít po svém kompletním nasycení velmi nízkou propustnost, a tak se  $H_2$  může akumulovat v místě mezi přebalem a jílovou bariérou. To může vést k tlakům přesahujícím odolnost jílu a k poškození celého systému inženýrských bariér (Galle a Tanai 1998). Akumulace plynu generovaného v prostoru úložného souboru může ovlivnit funkci tlumicího materiálu následovně (Popp et al. 2009):

- Průraz (mechanické roztlačení materiálu) plynem může vést k vytvoření stálých cest skrz bariéru, a tím prakticky negovat funkci bariéry. Pokud tlumicí materiál nedovolí kontrolovaný únik plynu, může dojít k výraznému nárůstu tlaku a následnému mechanickému poškození systému bariér či hostitelského prostředí.
- Plyn může způsobit desaturaci tlumicího materiálu.
- Plyn může "tlačit" vodu s radionuklidy skrz tlumicí materiál podél preferenčních cest (včetně cest jím vytvořených).
- Difúze plynů, které jsou buď přímo radioaktivní, nebo jsou pro radionuklidy nosiči, může vést k významnější migraci radionuklidů do dalších částí systému než při uvážení pouze rozpuštěných specií v pórové vodě bentonitu a jejich difúzi v důsledku koncentračního gradientu.

Tyto scénáře jsou navázány na vlastnosti jednotlivých částí systému inženýrských bariér a hostitelského prostředí.

#### **Dostupná data:**

V zahraniční literatuře lze nalézt velké množství prací, které se zabývají transportem plynu v bentonitech s ohledem na EBS. Největším uceleným zdrojem poznatků jsou výstupy evropského projektu FORGE (<https://www.bgs.ac.uk/forge/reports.html>). Mezi hlavní autory pak patří tým BGS (Horseman, Harrington et al., 1999) a CIEMAT (Villar et al. 2012). Z hlediska ČR jsou zejména zajímavé výsledky druhého týmu (v rámci projektu FEBEX a FORGE), neboť pracuje s bentonitem podobného typu, jako se nachází v ČR.

Nejaktuálnější a nejucelenější poznatky, data a studie jsou shrnuty v již zmíněné State-of-the-Art WP GAS z projektu EURAD (Levasseuer, a kol., 2021).

Výzkum zabývající se plynopropustností českých bentonitů byl prováděn v rámci projektu Výzkumná podpora pro bezpečnostní hodnocení hlubinného úložiště, dílčí projekt: Experimentální hodnocení plynopropustnosti inženýrských bariér hlubinného úložiště. V tomto projektu se prováděly experimentální laboratorní zkoušky plynopropustnosti na přirozeně vlhkém a plně nasyceném bentonitu BaM (Svoboda, 2019) a s vodíkem (Mendoza, 2019).

Otázkami ohledně mechanistického pochopení vzniku dilatantního proudění plynu a vlivu průrazů na integritu bentonitového těsnění se aktuálně zabývá evropský projekt EURAD WP GAS. V rámci tohoto projektu konsorcium složené z ČVUT v Praze a ÚJV Řež provádí dlouhodobé tlakové plynové zkoušky na nasyceném bentonitu (BCV, FEBEX, Kunipia) s cílem zjistit závislost výskytu průrazu na vlastnostech materiálu (především bobtnacím tlaku) a okrajových podmínkách (injektažní tlak plynu). ČVUT provádí rychlé průrazové zkoušky, které mají ověřit schopnost samohojení českého bentonitu po výskytu průrazu (breakthrough) a zda nedochází jejich vlivem k degradaci materiálu. V současnosti z naměřených dat lze usuzovat, že cyklické zatěžování vysokým tlakem plynu a resaturací vzorku nedochází k negativnímu ovlivnění těsnících vlastností bentonitové bariéry. ÚJV Řež dále ověřuje, zda druh plynu má vliv na průběh laboratorních testů a v experimentech používá vzduch a vodík, aby bylo možné naměřená data mezi sebou porovnat. Z dosavadních výsledků lze říci, že druh plynu na plynopropustnost bentonitu nemá vliv.

### **Nejistoty:**

Nejistoty jsou spojeny s nedostatkem experimentálních dat na českých bentonitech.

Obecně ve výzkumu vlivu vzniku plynu v hlubinném úložišti na jeho bezpečnost chybí především převedení experimentálních laboratorních výsledků do reálného měřítko. S tím souvisí také doposud nedostatečné porozumění mechanistickému chování proudění plynu v bentonitech.

Za jakých podmínek dochází k dvoufázovému proudění a vytlačování vody a kdy k dilatantnímu proudění v návaznosti na vlastnosti a parametry materiálu a okrajové podmínky je jedním z cílů projektu EURAD WP GAS. Dále se vědecké týmy z evropských zemí snaží odpovědět na otázku, zda při výskytu průrazů dojde k narušení integrity bariéry a ovlivnění jejich těsnících funkcí. Po ukončení projektu v roce 2024 by tyto otázky měly být zodpovězeny.

### **Reference:**

- BOUDREAU, B. (1996). The diffusive tortuosity of fine-grained unlithified sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 60(issue 16), 3139-3142. doi:10.1016/0016-7037(96)00158-5
- GALLÉ, C., TANAI, K. (1998): Evaluation of Gas Transport Properties of Backfill Materials for Waste Disposal: H<sub>2</sub> Migration Experiments in Compacted Fo-Ca Clay. *Clays and Clay Minerals*. 1998, vol. 46, issue 5, s. 498-508. DOI: 10.1346/CCMN.1998.0460503.
- GRATHWOHL, P. (1998). *Diffusion in natural porous media : contaminant transport, sorption/desorption and dissolution kinetics*, by Peter Grathwohl (1. vyd.). London: Kluwer Academic Publishers.
- HORSEMAN, S.T., J.F. HARRINGTON A P. SELLIN. (1999) Gas migration in clay barriers. *Engineering Geology*. 1999, vol. 54, 1-2, s. 139-149. DOI: 10.1016/S0013-7952(99)00069-1. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0013795299000691>

- LENORMAND, R., TOUBOUL, E., & ZARCONE, C. (1988). Numerical models and experiments on immiscible displacements in porous media. *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 189, 165-187. doi:10.1017/S0022112088000953
- LEVASSEUER, S., COLLIN, F., DANIELS, K., DYMITROWSKA, M., HARRINGTON, J., JACOBS, E., WENDLING, J. (2021). Initial State-of-the-Art on Gas Transport in Clayey Materials: Deliverable D6.1 of the HORIZON 2020 project EURAD, Workpackage Gas. EC Grant agreement no: 847593.
- MENDOZA MIRANDA, A. N. (2019): Hydrogen transport experiments in bentonit. MS SÚRAO, TZ 383/2019/EN. Prague.
- POPP, T. (2009) FORGE D3.1 State of the art report on gas transport trough interfaces, Institut für Gebirgsmechanik
- SVOBODA J., VAŠIČEK R., ŠŤÁSTKA J., NÁDHERNÁ D., PACOVSKÁ D., PACOVSKÝ J. (2019). Experimentální hodnocení plynopropustnosti inženýrských bariér hlubinného úložiště – Závěrečná zpráva – MS SÚRAO, ZZ 384/2019, Praha.
- VILLAR, M.V., GUTIÉRREZ-RODRIGO, V., MARTÍN, P.L. ROMERO, F.J., BARCALA, J.M. (2012): Results of the tests on bentonite (Part 2). CIEMAT Technical Report CIEMAT/DMA/2G207/07/12. 60pp.

## 7.3 Mechanické procesy

### 7.3.1 Eroze bentonitu mechanická (sufoze)

#### Popis:

Sufoze (v zahraniční literatuře označovaná jako piping) představuje proces, kdy dochází k vyplavování jemných částic z materiálu proudem vody (zejména takového, kde existuje rozdíl v tvaru, velikosti a typu částic), což často vede ke vzniku erozního kanálu a ve výsledku ke ztrátě objemu materiálu. Vlastní mechanickou erozi bentonitu poté představuje proces, kdy dochází k úbytku jílového materiálu vlivem kombinace jeho vlastností (zejména bobtnání a tvorba gelových fází na rozhraní bentonit/voda) a pohybu podzemní vody na rozhraní bentonit/voda. Tento typ také bývá často kombinován s chemickými vlivy a poté leží na pomezí mezi čistě mechanickou a čistě chemickou erozí (Vokál et al. 2010).

K tomu, aby mohla sufoze úspěšně probíhat a erozní kanál zůstal otevřený je třeba, aby bylo splněno několik podmínek:

- Tlak vody v puklině je větší než součet protitlaku z bentonitu a smykové únosnosti, pokud je vlastní tok vody omezen buď bobtnáním bentonitu nebo kompakovaným zásypem.
- Hydraulická vodivost bentonitu je tak nízká, že přítok vody do bentonitu postačuje k tomu, aby byl udržován dostatečně vysoký tlak vody (viz výše) a hydraulický gradient v bentonitu.
- Existuje místo po směru toku vody, kam je možné přemísťovat erodovaný materiál, aby erozní kanál stále zůstal otevřený.



K tomu, aby mohla úspěšně probíhat mechanická eroze bentonitu, musí být unášecí síla vyvolaná pohybem vody větší suma tření a přitažlivých sil mezi částicemi bentonitu a strukturou bentonitu (Vokál et al. 2010).

#### **Vliv na dlouhodobou bezpečnost:**

Vlastní mechanickou erozi bentonitu poté představuje proces, kdy dochází k úbytku jílového materiálu a může tedy dojít ke změně vlastností, ovlivňující bezpečnostní funkce bentonitu, a to především (viz kap. 3).

- Tlumící materiál musí zabránit mechanickému poškození UOS;
- Tlumící materiál musí omezit přístup vody a agresivních látek a zpomalit degradaci UOS;
- Nesmí dojít ke ztrátě retardačních vlastností použitého tlumícího materiálu vlivem působení korozních produktů UOS nebo tepelnou degradací.

#### **Dostupná data:**

Erozí bentonitu se zabýval Červinka et al. (2014, 2015 a 2016) v projektu BELBAR, kdy hodnotil i vliv rychlosti přítoku na uvolňování koloidů. Jinak se zabýval především erozí chemickou (viz 0).

#### **Nejistoty:**

Nepříliš probádaná oblast.

#### **Reference:**

VOKÁL A., HAVLOVÁ V., HERCÍK M., LANDA J., LUKIN D., LANDA J. (2010): Aktualizace referenčního projektu hlubinného úložiště radioaktivních odpadů v hypotetické lokalitě, III. etapa – Hodnocení dlouhodobé bezpečnosti, ÚJV Řež a.s. – divize Energoprojekt Praha, 2010

ČERVINKA R., GONDOLLI J., VIDENSKÁ K. (2014): Shrnutí dosažených výsledků v roce 2014. Zpráva projektu: Eroze bentonitu a její dopad na dlouhodobé chování inženýrských bariér hlubinného úložiště a transport radionuklidů. ÚJV Řež, a. s. ÚJV-14398.

ČERVINKA R., GONDOLLI J., VIDENSKÁ K. (2015A): Shrnutí dosažených výsledků v roce 2015. Zpráva projektu: Eroze bentonitu a její dopad na dlouhodobé chování inženýrských bariér hlubinného úložiště a transport radionuklidů. ÚJV Řež, a. s. ÚJV-14535.

ČERVINKA R., GONDOLLI J., VIDENSKÁ K. (2015B): Eroze bentonitu a její dopad na dlouhodobé chování inženýrských bariér hlubinného úložiště a transport radionuklidů. Závěrečná zpráva projektu. ÚJV Řež, a. s. ÚJV-Z44495.

### **7.3.2 Bobtnání bentonitu**

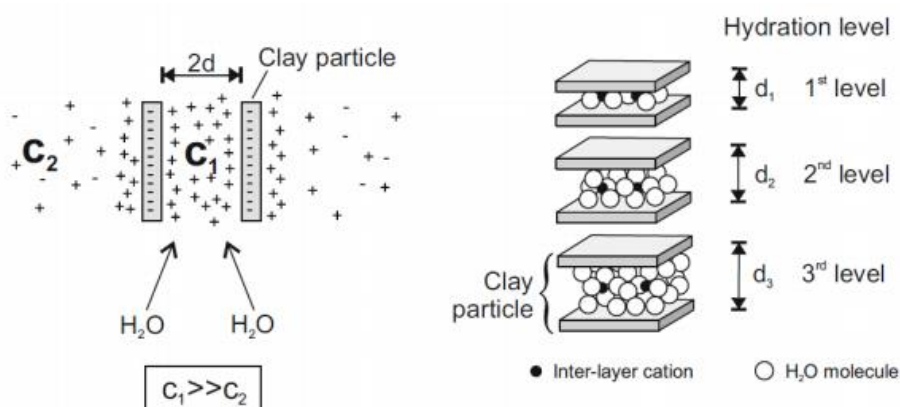
Bobtnání je jev spojený s přijímáním vody materiálem z okolí. Důsledkem bobtnání je buď vývoj bobtnacího tlaku (při bránění objemové změně) nebo změna objemu materiálu, závisící na odporu, který je této změně kladen. S bobtnáním, počátečním stavem (ne-homogenita, výskyt spar/ mezer/ volných prostor) souvisí také redistribuce hmoty jako důsledek bobtnání – přesunu hmoty z oblastí s vyšší objemovou hmotností do oblastí s objemovou hmotností nižší.

Predikce redistribuce hmoty – homogenizace – v podmínkách HÚ je složitou oblastí vyžadující jak experimentální, tak teoretický přístup (numerické modelování).

Nositelem bobtnací schopnosti je jílový minerál ze skupiny smektitů – montmorillonit. Jedná se o skupinu fylosilikátů s trojvrstevnatou stavbou struktury, kdy je mezi dvěma tetraedrickými vrstvami umístěna jedna oktaedrická, uspořádání vrstev je tedy 2:1. Mezi základnami tetraedrů vzniká mezivrstva. Minerály ze skupiny smektitů jsou schopné adsorbovat vodu v této mezivrstvě, čímž se od sebe jednotlivé vrstvy oddalují a materiál nabývá na objemu. Adsorbce probíhá formou hydratace výměnných kationtů suchého jílu. Dalším typem bobtnání je osmotické, které je založeno na rozdílu koncentrace iontů, principiálně kationtů, na povrchu vrstev a vodě v pórech (Madsen a Müller-Vonmoos, 1989). Na Obr. 15 jsou zobrazeny jednotlivé mechanismy bobtnání. Jednotlivá trojvrství se od sebe mohou oddálit až na více než 1,52 mikrometru, což odpovídá 3. bobtnacímu stupni (na Obr. 15). Míra oddálení jednotlivých vrstev závisí na výměnném potenciálu jednotlivých kationtů Madsen a Müller-Vonmoos, 1989).

Míra bobtnání závisí na výměnném kationtu v mezivrstvě. Běžnými výměnnými kationty v bentonitu jsou  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  a  $\text{K}^+$ . Zatímco u Mg a Ca bentonitů byla zaznamenána velmi podobná schopnost bobtnání, u Na-bentonitů byla tato schopnost významně výraznější.

Bentonity s vysokým bobtnacím potenciálem jsou schopné přijmout do mezivrství velké množství vody, tím vyvozují vysoký bobtnací tlak, který uzavírá póry, zvyšuje jejich tortuozitu a tím se snižuje propustnost (Anh a Jo, 2009). Bentonit s nejvyšším bobtnacím potenciálem je s  $\text{Na}^+$  výměnným kationtem. Další charakteristikou, na které závisí míra propustnosti bentonitu a bobtnací tlak, je jeho objemová hmotnost sušiny – materiál s vyšší objemovou hmotností sušiny vykazuje hodnoty vyšší bobtnací tlaky a logicky, nižší nasycené hydraulické vodivosti.



Obr. 15 Mechanismy bobtnání jílových minerálů ze skupiny smektitů. Vlevo je zobrazeno osmotické bobtnání, vpravo je zobrazeno bobtnání vlivem hydratace výměnných kationtů neboli krystalické bobtnání (Madsen a Müller-Vonmoos, 1989).

#### Vliv na dlouhodobou bezpečnost:

Při nízkém tlaku nebezpečí nedostatečného zatěsnění/ zahojení spár a mezer – zachování preferenčních cest.

Nadměrné namáhání/ porušení UOS (tlak na UOS).

Porušení prostorového uspořádání, změna polohy UOS.

Porušení bufferu vlivem nerovnoměrného zatížení nerovnoměrným bobtnáním.

Možné ovlivnění materiálu dlouhodobou interakcí s okolím (teplota, voda, další materiály) – snížení bobtnací schopnosti, a tím zvýšení propustnosti, schopnosti homogenizace, samohojení.

**Dostupná data:**

Data z výzkumu českých bentonitů shrnuje Hausmannová a kol. (2018). Více viz FEP 6.3.3.2 Bobtnání.

Vliv dlouhodobého zatížení 150 °C v suchém i plně nasyceném stavu (BCV\_2017) je zkoumán v rámci projektu H2020 EURAD (č. 847593), pracovní část HITEC (Influence Of Temperature On Clay-Based Material Behaviour). Součástí prací je měření za vyšších teplot (40, 60, 90 a 120 °C). Černochová a kol. (2021) uvádí výsledky po dvou letech řešení projektu.

Vlivem dlouhodobého zatížení 200 °C (BCV\_2017) se zabývá projekt TAČR Inženýrská bariéra 200C (TK01030031); Laufek a kol., 2021)

Při využití postupů bobtnacích testů, kdy není po celou dobu objem konstatní, může dojít, v závislosti na pořadí jednotlivých kroků zkoušky (zatížení, odtížení, sycení), k dosažení rozdílných výsledků, jak uvádí Svoboda a kol. (2022).

Komplexní problematikou mechanického chování bentonitů, homogenizací a numerickým modelováním se zabývá mezinárodní projekt „Bentonite mechanical evolution“ (BEACON; Euratom No. 745942). Dále, pro aplikace při zvýšených teplotách, také projekt „Numerické modelování a laboratorní charakterizace bentonitové bariéry v úložištích odpadu z jaderných zařízení v ČR“ (TAČR TK01010063). V projekt je mj. využíván český bentonit B75 a BCV.

Výstupem jsou informace „Deliverables“ (<https://www.beacon-h2020.eu/deliverables/>) a 2 články v přípravě – Svoboda a kol., (2022) a Najser a kol. (v přípravě).

**Nejistoty:**

Materiálové složení bufferu

Parametry a konstrukční řešení bufferu

Nejistoty související s předpovědí vývoje HÚ (sycení, jeho nehomogenita; numerické modely)

Vliv dlouhodobých interakcí s okolím (teplota, voda, další materiály).

**Reference:**

AHN H. S. A JO H. Y., (2009) “Influence of exchangeable cations on hydraulic conductivity of compacted bentonite,” Appl. Clay Sci., vol. 44, no. 1–2, pp. 144–150, Apr. 2009.

ČERNOCHOVÁ K., KAŠPAR V., KRUIS J., MAŠÍN D., NAJSER J., SVOBODA, J., VAŠÍČEK, R. (2021): WP 7 HITEC: Souhrn výstupů českých stran projektu EURAD, SÚRAO TZ 562/2021. Praha

ČERVINKA R., VAŠÍČEK R., VEČERNÍK P., KAŠPAR V. (2019): Kompletní charakterizace bentonitu BCV 2017. SÚRAO Technická zpráva 419/2019, Česká republika, 33 s

DONTSOVA K. M., NORTON L. D., JOHNSTON C. T., A BIGHAM J. M. (2004), “Influence of Exchangeable Cations on Water Adsorption by Soil Clays,” Soil Sci. Soc. Am. J., vol. 68, no. 4, pp. 1218–1227, Jul. 2004.

- HAUSMANNOVÁ, L., HANUSOVÁ, I., A DOHNÁLKOVÁ, M. (2018). Summary of the research of Czech bentonites for use in the deep geological repository – up to 2018, SÚRAO 309/2018/ENG Kašpar, V., Šachlová, Š., Hofmanová, E.; Komárková, B., Havlová, V.; Aparicio, C.; Černá, K., Bartak, D., Hlaváčková, V. (2021). Geochemical, Geotechnical, and Microbiological Changes in Mg/Ca Bentonite after Thermal Loading at 150 °C. *Minerals* 2021, 11, 965. <https://doi.org/10.3390/min11090965>
- KARNLAND, O.; OLSSON, S.; NILSSON, U. (2006). SKB Technical Report TR-06-30: Mineralogy and Sealing Properties of Various Bentonites and Smectite-Rich Clay Materials; Svensk Kärnbränslehantering AB: Stockholm, Sweden, 2006; p. 112
- LAUFEK, F.; HANUSOVÁ, I.; SVOBODA, J.; VAŠÍČEK, R.; NAJSER, J.; KOUBOVÁ, M.; ČURDA, M.; PTICEN, F., VACULÍKOVÁ, L., SUN H., MAŠÍN D. (2021). Mineralogical, Geochemical and Geotechnical Study of BCV 2017 Bentonite—The Initial State and the State following Thermal Treatment at 200 °C. *Minerals*. 2021, 11(8), ISSN 2075-163X.
- MADSEN F. T. A M. MÜLLER-VONMOOS M. (1989). “The swelling behaviour of clays,” *Appl. Clay Sci.*, vol. 4, no. 2, pp. 143–156, Jun. 1989.
- NAJSER J., MAŠÍN D., SVOBODA J., VAŠÍČEK R., HANUSOVÁ I., HAUSMANNOVÁ L., KRUIS J., KREJČÍ T., SUN H., (v přípravě). Homogenisation behavior of BCV bentonite – laboratory and numerical study; v přípravě
- SVOBODA J., MAŠÍN D., NAJSER J., VAŠÍČEK R., HANUSOVÁ I., HAUSMANNOVÁ L. (2022). BCV bentonite hydromechanical behaviour and modelling; *Acta Geotechnica*, manuscript no. AGEO-D-21-01152; v recenzním řízení

### 7.3.3 Pohyb UOS v bufferu

Pohyb UOS v bufferu není v principu samostatným přírodním procesem, ale jde o důsledek dalších procesů a vlastností – bobtnání, sycení, počátečního stavu systému (parametry UOS, bufferu), okolních podmínek daných horninovým masivem, tlaku vody a par, pevnostních a deformačních vlastností. Samostatně je zde uveden vzhledem ke své důležitosti v rámci hodnocení bezpečnosti.

Zatížení i odolnost konstrukcí je nutné uvažovat jak za homogenních „okrajových“ podmínek (rovnoměrné sycení po obvodu, homogenní těsnicí konstrukce) tak nehomogenních – typicky jednostranné sycení a tím i namáhání bobtnacím tlakem, popř. nehomogenní buffer při vodorovném systému (bentonitové tvárnice jako lože UOS a obsyp peletami). Při posuzování se uplatní zejména Mechanické vlastnosti (kap. 6.3.3).

#### **Vliv na dlouhodobou bezpečnost:**

Jakýkoliv pohyb – přesun či natočení UOS v bufferu by mělo za následek ovlivnění geometrie bufferu, tedy jistě oslabení těsnicí vrtvy v některé jeho části.

Pokud by došlo k pohybu před nasycením bufferu, mohlo by dojít k vývoji trhlin – dalších preferenčních cest.

#### **Dostupná data:**

Provedení předběžného výpočtu tlaku na UOS bylo provedeno v rámci projektu Výzkumná podpora pro bezpečnostní hodnocení HÚ (Hasal a kol., 2019).

**Nejistoty:**

Materiálové složení bufferu.

Parametry a konstrukční řešení bufferu.

Nejistoty související s předpovědí vývoje HÚ (sycení, jeho nehomogenita; numerické modely).

Nejistoty související s podmínkami v konkrétní lokalitě (hydrogeologie, mechanické vlastnosti horniny, napěťový stav v hornině).

**Reference:**

HASAL M., MICHALEC Z., BLAHETA R. (2019): Provedení předběžného výpočtu tlaku na UOS – Závěrečná zpráva. – MS SÚRAO, TZ 388/2019, Praha

## 7.4 Chemické procesy

Popis možných procesů na rozhraní kov/bentonit lze najít v práci Kaufhold et al. (2015). Při korozních reakcích se v první fázi uvolňují  $\text{Fe}^{2+}$  ionty a elektrony. Na dalších reakcích zpracovávajících tyto produkty závisí rychlost koroze. Vše schematicky shrnuje Obr. 16.

ÚOS	Reakční zóna	Bentonit
korozní závisí na osudu (spotřebě) uvolněných $\text{e}^-$ a $\text{Fe}^{2+}$ iontů	$\text{Fe}^0 \leftrightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$ $2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \leftrightarrow 2\text{OH}^- + \text{H}_2$ $\text{Fe}^{3+}_{\text{oct}} + \text{e}^- \leftrightarrow \text{Fe}^{2+}_{\text{oct}}$ $\text{SO}_4^{2-} + \text{X} + \text{ne}^- \leftrightarrow \text{SO}_3^{2-}, \text{S}^{2-}, \dots$ $\text{Fe}^{2+} + \text{nOH}^- \leftrightarrow \text{Fe}(\text{OH})_n$ $\text{Fe}^{2+} + \text{M-smt} \leftrightarrow \text{Fe-smt} + \text{M}^{2+}$ $\text{Fe}^{2+} + \text{Si/Al} \leftrightarrow \text{FeAl}_x\text{Si}_y\text{O}_z$	možný vliv typu bentonitu na reakce $\uparrow$ makroporozita $\rightarrow \uparrow$ množství vody obsah $\text{Fe}^{3+}$ ve struktuře obsah S, přítomnost mikroorganismů vliv pH na množství korozních produktů kationtová výměna (mezivrsteví) rozpouštěnost smektitu

Obr. 16 Schématické shrnutí možných korozních procesů na rozhraní kov/bentonit (upraveno z Kaufhold et al. 2019)

**Reference:**

KAUFHOLD, S., DOHRMANN, R., UFER, K., KOBER, F. (2019): Interactions of bentonite with metal and concrete from the FEBEX experiment: mineralogical and geochemical investigations of selected sampling sites. Clay Minerals 53, 745-763.

## 7.4.1 Chemické a mineralogické změny (bentonit)

### 7.4.1.1 Srážení a rozpouštění minerálních fází

#### Popis:

Procesy rozpouštění, včetně jejich vývoje v čase, mají vliv na materiály v úložišti. Změny chemického prostředí úložiště (např. změny pH a Eh) mohou měnit rychlost rozpouštění materiálů v úložišti (např. rozpouštění cementových materiálů).

Srážecí procesy, včetně jejich vývoje v čase, mají vliv na materiály v úložišti. Ke srážení může docházet, pokud v chemickém prostředí nastane prudká změna (např. velké chemické gradienty). Ke gradientům bude pravděpodobně docházet zejména v počátečních obdobích vývoje HÚ. Úložiště bude zatíženo maximální teplotou a to kolem 100 °C na vnějším rozhraní UOS, v důsledku čehož může dojít k rychlé dehydrataci a případně i k vysrážení minerálních solí. Dalším případem může být např. vstup vody o jiném složení (např. solanky) do prostředí HÚ.

#### Vliv na dlouhodobou bezpečnost:

Rozpouštění a srážení mohou významně ovlivnit dobu transportu radionuklidů v prostředí IB a stabilitu bariéry. Na druhé straně vlivem srážení minerálů může docházet ke změnám transportních cest (ucpávání pórů) či presipitaci fází, které mohou vázat radionuklidy.

#### Dostupná data:

Se srážením a rozpouštěním minerálních fází v procesu vývoje HÚ se zabývaly pouze práce, které hodnotily např. tepelné zatěžování bentonitu, např. Kolaříková (2005; 2010), Vinšová et al. (2008), Švandová et al. (2013), Laufek et al. 2021; Kašpar et al. 2021. S problematikou srážení či rozpouštění minerálních fází souvisí i řešení problematiky složení pórové vody bentonitu a jejího vývoje (např. Hofmanová et al. 2019 nebo Červinka et al. 2018).

#### Nejistoty:

Nebylo příliš sledováno.

#### Reference:

ČERVINKA R., GONDOLLI J., KLAJMON M., RUKAVIČKOVÁ L., VENCELIDES Z., ZEMAN J. (2018): Chování horninového prostředí / Příprava geochemického modelu úložiště – geochemické výpočty a model reakčního transportu. – MS SÚRAO, TZ 271/2018, Praha.

HOFMANOVÁ E., ČERVINKA R., VOPÁLKA D., BABOROVÁ L., BRÁZDA L., PECKOVÁ A., VETEŠNÍK A., VIGLAŠOVÁ E., VAŠÍČEK R. (2019): Transport radionuklidů z úložiště / vstupní parametry a procesní modely pro hodnocení transportu radionuklidů přes inženýrské bariéry: Závěrečná zpráva. – MS SÚRAO, ZZ 420/2019, Praha.

### 7.4.1.2 Ilitizace

#### Popis:

Jde o proces, při kterém se smektit mění na illit a ztrácí své původní vlastnosti, a to zejména v důsledku interakce s podzemní vodou za spolupůsobení dalších faktorů. Tyto změny jsou

velmi pomalé a uplatňují se tři základní děje: 1) přeměna smektitu reakcí s rozpuštěnými Al a K na illit, 2) přeměna smektitu na albit a 3) cementace jílu způsobená zřejmě redistribucí doplňkových minerálů. První dva typy reakcí jsou řízeny teplotou, ale pod tzv. kritickou teplotou (illitizace cca 130°C) jsou rychlosti těchto procesů zanedbatelné. Za zvýšené teploty dochází ke změnám v krystalové struktuře, které mohou vést k postupné transformaci montmorillonitu na beidellit, saponit a křemen. Dalšími transformacemi je pravděpodobný vznik illitu, díky kterému je celá tato transformace pojmenována jako proces illitizace (Kolaříková et al. 2005; Meunier et al. 1998). Rozsah a rychlost illitizace by závisela na koncentraci draslíku v systému. Mineralogické transformace smektitu na illit by potom negativně ovlivnily bobtnací tlak, hydraulickou vodivost a plasticitu bentonitové bariéry. Srážení křemene v průběhu illitizace by pak mohlo vést k termální cementaci bentonitu (Leupin et al. 2018; SKB 2010).

Proces illitizace je tedy významný buď v první etapě vývoje HÚ za působení teploty, která je obvykle volena tak, aby pravděpodobnost procesu illitizace byl snížen, nebo v etapě bez příspěvku teploty, kdy naopak bude spolupůsobit interakce s podzemní vodou za přítomnosti K a Al.

#### **Vliv na dlouhodobou bezpečnost:**

Mineralogické transformace smektitu na illit může negativně ovlivnit bobtnací tlak, hydraulickou vodivost a plasticitu bentonitové bariéry, a tudíž i významně ovlivnit bezpečnostní funkce bentonitu. Srážení křemene v průběhu illitizace by pak mohlo vést k termální cementaci bentonitu a ztrátě jeho plasticity, pufrací kapacity či retenčních vlastností.

#### **Dostupná data:**

Procesům illitizace, či spíše tepelného zatížení a vlivu saturačního media na českém bentonitu se věnovaly např. práce Kolaříkové et al. (2005; 2010), Vinšové et al. (2008) nebo Švandové et al. (2013). Dva recentní články se věnují tepelnému zatížení nad 130 °C, nikoli přímo illitizaci (Laufek et al. 2021; Kašpar et al. 2021).

V současné době probíhá projekt EJP EURAD HITEC.

#### **Nejistoty:**

Nedostatek dat pro bentonit českého původu.

#### **Reference:**

KAŠPAR V., ŠACHLOVÁ Š., HOFMANOVÁ E. ET AL. (2021): Geochemical, Geotechnical, and Microbiological Changes in Mg/Ca Bentonite after Thermal Loading at 150 °C (2021):. Minerals 2021, 11, 965.

KOLAŘÍKOVÁ ET AL. (2005): Thermal loading of smectite-rich rocks: Natural processes vs. laboratory experiments, Applied Clay Science 29, 215 – 223.

KOLAŘÍKOVÁ I., ŠVANDOVÁ J., PŘIKRYL R., VINŠOVÁ H., JEDINÁKOVÁ-KŘÍŽOVÁ V., ZEMAN J., (2010): Mineralogical changes in bentonite barrier within Mock-Up-CZ experiment. Applied Clay Science 47(1–2), 10-15.

LAUFEK, F., HANUSOVÁ I., SVOBODA J., VAŠÍČEK R., NAJSER J., KOUBOVÁ M., ČURDA M., PTICEN F., VACULÍKOVÁ L., SUN H., MAŠÍN D. (2021) Mineralogical, Geochemical and Geotechnical

Study of BCV 2017 Bentonite—The Initial State and the State following Thermal Treatment at 200 °C" *Minerals* 11, no. 8: 871. <https://doi.org/10.3390/min11080871>

LEUPIN O. ET AL. (2014): Montmorillonite stability under near-field conditions, TR 14-12, NAGRA.

MEUNIER A. ET AL. (1998): The reactivity of bentonites: a review. An application to clay barrier stability for nuclear waste storage, *Clay Minerals* 33, 187-196.

SKB (2010): Buffer, backfill and closure process report for the safety assessment SR-Site, TR 10-47, SKB.

ŠVANDOVÁ J., VIDENSKÁ K., PŘIKRYL R. (2013): Experimental evaluation of the influence of saturation media on the mineralogical and physicochemical stability of bentonites. *Applied Clay Science* 86, 1-10.

VINŠOVÁ H., JEDINÁKOVÁ-KŘÍŽOVÁ V., KOLAŘÍKOVÁ I., ADAMCOVÁ J., PŘIKRYL R., ZEMAN J. (2008): The influence of temperature and hydration on the sorption properties of bentonite. *Journal of Environmental Radioactivity* 99(2), 415-425.

### 7.4.1.3 Alterace korozními produkty

#### Popis:

Zvýšená koncentrace železa ovlivňuje fyzikálně-chemické vlastnosti bentonitu. Ne všichni autoři se shodují v důsledcích, často se lze setkat s tvrzením, že zvyšující se koncentrace Fe vede k vyšší hydraulické vodivosti a naopak nižšímu bobtnacímu tlaku a nižší kationové výměnné kapacitě (např. Smart et al. 2006; Torres et al. 2007). Naproti tomu přítomné korozní sloučeniny železa můžou vázat radionuklidy, které vykazují větší sorpční afinitu vůči těmto sloučeninám (Kozai 2001). Více je uvedeno v práci Červinky et al. (2015)

Perronnet et al. (2007) popsali korozní děje v bentonitu třístupňovým mechanismem:

1. Redukce strukturálního Fe vedoucí ke zvýšení hustoty náboje jílových vrstev. Ta je částečně kompenzována protony, což vede ke zvýšení pH vlivem přebývajících OH<sup>-</sup> iontů.
2. Zvýšená zásaditost prostředí vede k destabilizaci smektitu a tvorbě Si–Al–Fe gelu.
3. Difúze Fe<sup>2+</sup> iontů z koroze kovu do gelu zapříčiní vznik vrstevnatých silikátů bohatých na Fe. Při nižších teplotách (T < 100 °C) vznikají 7Å fáze (např. Fe-smektity, berthierin). Při vyšších teplotách (nad 150 °C) pak vznikají 14Å fáze (např. chlorit, saponit). Transformace smektitů na chlorit nebo serpentinit může znamenat ohrožení izolační funkce bentonitové bariéry, protože tyto fáze nemají schopnost bobtnat.

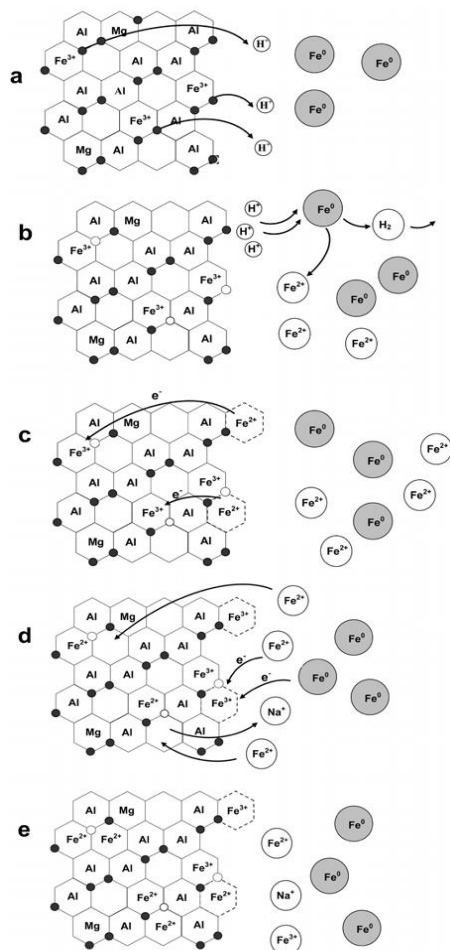
Alterace materiálu jílové bariéry je obvykle spojována se změnou pH prostředí (ovlivňuje stabilitu minerálů za daných podmínek) a v mnohem menší míře s vlivem transportu železa v roztoku (Gondolli et al. 2016).

Jednou z dalších možných alterací uváděných v literatuře je možnost redukce strukturně vázaného Fe(III) v jílových minerálech uvolněným Fe(II) – detailně viz Gondolli et al. (2016).



Autoři (Lantenois et al. 2005) na základě výsledků představili koncepční model destabilizace smektitu, který popisuje mechanismus destabilizace smektitu (Obr. 17).

Obr. 17 Koncepční model vedoucí k destabilizaci dioktaedrických smektitů jako výsledek jejich interakce s kovovým Fe. Převzato z Lantenois et al. (2005)



a) Deprotonace skupin  $MeFe^{3+}OH$

b) Oxidace kovového Fe jakožto výsledek jeho interakce s uvolněnými protony

c) Sorpce kationtů  $Fe^{2+}$  na okraje smektitových částic a redukce  $Fe^{3+}$  vázaného ve struktuře

d) Migrace kationtů  $Fe^{2+}$  v roztoku v mezivrstvi smektitu ke kompenzaci deficitu náboje vrstvy. Část této migrace vede k iontové výměně  $Fe^{2+}$  za  $Na^+$ . S postupem času migrují kationty  $Fe^{2+}$  v mezivrstvi do ditrigonálních dutin a dále do oktaedrické sítě k lokální kompenzaci deficitu náboje

e) Koexistence dioktaedrických a trioktaedrických domén v oktaedrické síti smektitu vede k její destabilizaci

### Vliv na dlouhodobou bezpečnost:

Změna smektitu vlivem interakce či difúze bentonitu s korozními produkty může vést k ohrožení izolační funkce bentonitové bariéry, protože tyto fáze nemají schopnost bobtnat.

### Dostupná data:

Detailní literární rešerše na téma rozhraní bentonit a UOS je uvedena v práci Gondolli et al. (2016). Informace o vlastnostech bentonitu v kontaktu s vrstvou korozních produktů je sledován v experimentálních projektech, a to s použitím jak českého bentonitu (BAM, BCV), tak zahraničního MX80 jsou k nalezení v pracích Dobrev et al. (2017a, b, 2018, 2020), Gondolli et al. (2018a,b). Transportní vlastnosti a jejich ovlivnění přítomností korozních produktů byly studovány v projektu, shrnutém v Hofmanová et al. (2019). V současné době v rámci projektu EJP EURAD probíhá modelování procesu pro 3 české experimenty v rámci WP ACED (Havlová et al., 2020).

**Nejistoty:**

Přestože se očekávají změny vlastností alterované jílové zóny, jednoznačné experimentální potvrzení konkrétních změn je dle dostupných publikací problematické, zejména u komplexních dlouhodobých experimentů. V některých případech byl pozorován pokles CEC a nárůst propustnosti (Carlson et al. 2007), v jiných nevýznamné změny v mineralogii a CEC, ale významná změna bobtnacích vlastností (Milodowski et al. 2009a, 2009b) nebo nevýznamná změna v CEC (ve srovnání s nealterovaným jílem), ale pokles podílu bobtnavých minerálů (Gaudin et al. 2009) apod.

**Reference:**

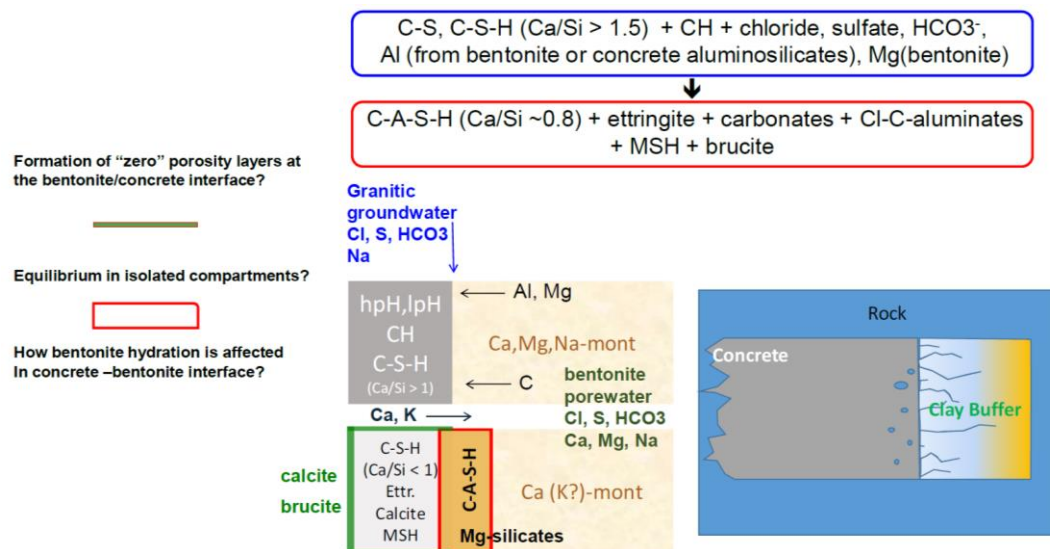
- CARLSON L., KARNLAND O., OLSSON S., RANCE A., SMART N. (2008): Experimental studies on the interaction between anaerobically corroding iron and bentonite. – SKB report R-08-28, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm, Sweden.
- ČERVINKA R., VOPÁLKA D., ADAM R., BRÁZDA L., DRTINOVÁ B., HOFMANOVÁ E., KITNEROVÁ J., RAMEŠOVÁ L. REIMITZ D., ŠIMÚTHOVÁ Z., ŠTAMBERG K., VETEŠNÍK A. (2015): Transport radionuklidů z úložiště / Vstupní parametry a procesní modely pro hodnocení transportu radionuklidů přes inženýrské bariéry: 1. průběžná zpráva. – MS SÚRAO, TZ 24/2015, Praha
- DOBREV D., GONDOLLI J., MENDOZA MIRANDA A. N., STEINOVÁ J., BURKARTOVÁ K., ZUNA M. (2020): Korozní zkouška v přírodním granitoidním prostředí. Zapojení v projektu Material Corrosion Test (MaCoTe), část zakázky č. 2 realizace a vyhodnocení MaCoTe experiment v Grimsel Test Site – MS SURAO, Technical report No .194/2017 Rev. č. 2. Praha.
- DOBREV D., GONDOLLI J., KOUŘIL M., STOULIL J., STRAKA M. (2017b): Korozní zkoušky s materiály navrženými pro konstrukci ukládacích obalových souborů – MS SURAO, Technical report, SÚRAO, Prague.
- DOBREV D., GONDOLLI J., MENDOZA MIRANDA A. N., STEINOVÁ J., BURKARTOVÁ K., ZUNA M. (2018): Korozní zkouška v přírodním granitoidním prostředí. Zapojení v projektu Material Corrosion Test (MaCoTe), část zakázky č. 2 realizace a vyhodnocení MaCoTe experiment v Grimsel Test Site – MS SURAO, Technical report No .194/2017 Rev. č. 1., Praha.
- DOBREV D., GONDOLLI J., MENDOZA MIRANDA A. N., STEINOVÁ J., ZUNA M. (2017a): Korozní zkouška v přírodním granitoidním prostředí. Zapojení v projektu Material Corrosion Test (MaCoTe), část zakázky č. 2 realizace a vyhodnocení MaCoTe experiment v Grimsel Test Site – MS SURAO, TZ 194/2017, Praha.
- GAUDIN A., GABOREAU S., TINSEAU E., BARTIER D., PETIT S., GRAUBY O., FOCT F., BEAUFORT D. (2009): Mineralogical reactions in the Tournemire argillite after in-situ interaction with steels. – Applied Clay Science, 43, 196–207.
- GONDOLLI J., DOBREV D., KAŠPAR V., KLAJMON M., STOULIL J. (2016): Chování UOS pro VJP a RAO / Korozní produkty – Věcný a časový harmonogram prací řešerše korozních a alteračních procesů na rozhraní železo-jíl. – MS SÚRAO TZ 61/2016, Praha.
- GONDOLLI J., KLAJMON M., KOUŘIL M. (2018A): Chování UOS pro VJP a RAO/Korozní produkty. Závěrečná zpráva. – MS SURAO, Final report No 329/2018, SÚRAO, Praha.

- GONDOLLI, J.; DOBREV, D.; KLAJMON, M.; MENDOZA, A.; ČERNOUŠEK, T.; KOUŘIL, M.; STOULIL, J. (2018B): Behaviour of Waste Package for Spent Nuclear Fuel and High-Level Waste: Corrosion Products (final report); Technical report 329/2018/ENG; Praha.
- Havlova V., Kiczka M., Mendoza Miranda A., Klajmon M., Wersin P., Pekala M. Jenni A., Hadi J., Samper J., Montenegro L., Mon A., Fabian M, Osan J., A. Dauzeres, D. Jacques (2020): Modelling of the steel-clay interface – approaches, first results and model refinements. Final version as of 28 08 2020 of deliverable D2.6 of the HORIZON 2020 project EURAD. EC Grant agreement no: 847593.
- HOFMANOVÁ E., ČERVINKA R., VOPÁLKA D., BABOROVÁ L., BRÁZDA L., PECKOVÁ A., VETEŠNÍK A., VIGLAŠOVÁ E., VAŠÍČEK R. (2019): Transport radionuklidů z úložiště / vstupní parametry a procesní modely pro hodnocení transportu radionuklidů přes inženýrské bariéry: Závěrečná zpráva. – MS SÚRAO, ZZ 420/2019, Praha
- KOZAI N., ADACHI Y., KAWAMURA S., INADA K., KOZAKI T., SATO S., OHASHI H., OHNUKI T., BANBA T. (2001): Characterization of Fe-montmorillonite: A Simulat of Buffer Material Accommodatin Overpack Corrosion Product. Journal of Nuclear Science and Technology 38, 1141–1143.
- LANTENOIS S. (2003): Réactivité fer métal/smectites en milieu hydraté à 80 °C. – PhD thesis, University of Orléans, France.
- MILODOWSKI, A. E., CAVE, M. R., KEMP, S. J., TAYLOR, H., GREEN, K. A., WILLIAMS, C. L., SHAW, R. A., GOWING, C. J. B., EATHERINGTON, N. D. (2009b): Mineralogical investigations of the interaction between iron corrosion products and bentonite from the NF-PRO Experiments (Phase 2). – SKB Technical report TR-09-03. Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm, Sweden.
- MILODOWSKI, A. E., CAVE, M. R., KEMP, S. J., TAYLOR, H., VICKERS B. P., GREEN, K. A., WILLIAMS, C. L., SHAW, R. A. (2009a): Mineralogical investigations of the interaction between iron corrosion products and bentonite from the NF-PRO Experiments (Phase 1). – SKB Technical report TR-09-02. Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm, Sweden.
- NEFF D., SAHEB M., MONNIER J., PERRIN S., DESCOSTES M., L'HOSTIS V., CRUSSET D., MILLARD A., DILLMANN P. (2010): A review of the archaeological analogue approaches to predict the long-term corrosion behaviour of carbon steel overpack and reinforced concrete structures in the French disposal systems. – Journal of Nuclear Materials, 402, 196–205.
- SMART, N.R., CARLSSON, L., HUNTER, F.M.I., KARNLAND, O., PRITCHARD, A.M., RANCE, A.P., WERME, L.O. (2006): Interactions Between Iron Corrosion Products And Bentonite. Serco report.
- TORRES, E., TURRERO, M.J., PEÑA, J., MARTÍN, P.L., ESCRIBANO, A., ALONSO, U., VILLAR, M.V. (2007): Interaction iron-compacted bentonite: corrosion products and changes in the properties of the bentonite. NF-PRO RTD2 Deliverable 2.3.7.

### 7.4.1.4 Alterace alkalickými produkty

#### Popis:

Geochemické reakce na rozhraní cementu a bentonitu jsou řízeny chemismem podzemní vody, chemickými vlastnostmi betonu (pH, mineralogie, ageing) a chemickými vlastnostmi bentonitu (vyměnitelné ionty, mineralogie, složení pórové vody), viz Obr. 18.



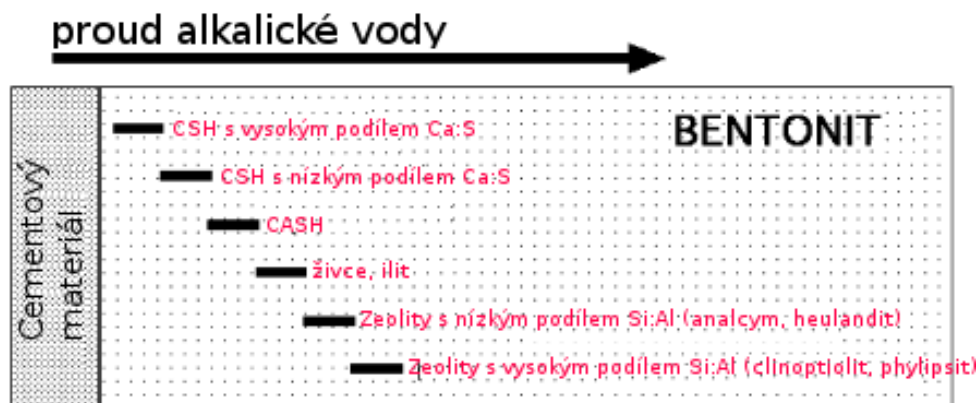
Obr. 18 Schéma geochemických interakcí na rozhraní beton – bentonit v betonové zátce v horninovém prostředí

Na základě Obr. 18 lze na rozhraní beton – bentonit uvažovat následující jevy:

- Karbonatace betonu a rozhraní beton – bentonit: rozpouštění portlanditu vlivem vysokého pH, srážení vápenatých minerálů (kalcit, aragonit, sádrovec) na povrchu betonu nebo na rozhraní materiálů.
- Kationtová výměna v montmorillonitu: rozpouštění montmorillonitu a přítomnost iontů K<sup>+</sup> může vést k ilitizačním procesům, následovaným srážením sekundárních fází. Při kontaktu betonu a bentonitu dochází v pórové vodě dlouhodobě k poklesu koncentrace Mg<sup>2+</sup> a nárůstu koncentrace Ca<sup>2+</sup>. Mg se vyměňuje a v alkalickém prostředí se vysráží jako brucit nebo M-S-H fáze
- Rozpouštění portlanditu, vznik zóny bohaté na vápník, vývoj C-S-H fáze a vznik C-A-S-H fází (C: CaO, S: SiO<sub>2</sub>, H: H<sub>2</sub>O, A: hliníky, SH: sírany) (Rosendorf 2016).
- Sulfátové a chloridové reakce v betonu: chloridy mohou reagovat s cementovými materiály za vzniku chlorohlinitanů nebo Friedelových solí, nebo mohou vstupovat do C-S-H fází. Rozpuštěné sírany mohou reagovat během rozpouštění portlanditu z betonu a hliníku z montmorillonitu za vzniku ettringitu.

Rozhraní cement – bentonit lze rozdělit na část bližší bentonitu a na část bližší cementovému materiálu, přičemž pH neošetřeného bentonitu se pohybuje okolo 8–9 a pH cementového výluhu je 12 a více. Již při pH > 10 dochází k rozpouštění minerálních fází bentonitu, zejména montmorillonitu, a v cementu dochází k přeměně v CSH fázi. Vzhledem k velkému množství sekundárních minerálů, které mohou vznikat při rozpouštění bentonitu v alkalickém prostředí a z toho plynoucích limitů experimentálních (detekce minerálů) i modelových (kvalita databáze, výpočetní možnosti) výstupů není úplně jednoduché popsat jevy, ke kterým dochází v systému

cement – bentonit. Přes nejasnosti ohledně reakcí na rozhraní vytvořili Savage et al. (2007) schéma popisující vznikající minerály, viz Obr. 19.



Obr. 19 Schéma vzniku minerálů na rozhraní cement – bentonit (Savage et al.2007)

V alkalickém prostředí dochází k rozpouštění montmorillonitu a také k dalším reakcím, které vedou ke vzniku sekundárních minerálů, rozpouštění montmorillonitu tedy není úplné. Srážení křemene při vyšším pH by pak mohlo vést k termální cementaci bentonitu (Havlová et al. 2018).

Dějům na rozhraní bariér beton – bentonit se věnovala řada evropských projektů (ECOCLAY I a II, NF-PRO, PEBS, CEBAMA) a v českých podmínkách v probíhajícím projektu Interakční fyzikální experimenty in-situ PVP Bukov (SURA).

#### **Vliv na dlouhodobou bezpečnost:**

Mineralogické změny bentonitu mohou negativně ovlivnit bobtnací tlak, hydraulickou vodivost a plasticitu bentonitové bariéry, a tím i významně ovlivnit bezpečnostní funkce bentonitu. Srážení křemene v průběhu illitizace by pak mohlo vést k termální cementaci bentonitu a ztrátě jeho plasticity, pufrací kapacity či retenčních vlastností.

#### **Dostupná data:**

V rámci projektu CEBAMA vznikly např. tyto výsledky Rosendorf et al. (2017) nebo Večerník et al. (2016).

Kromě toho byl testována i směs bentonitu a cementu jako alternativní buffer materiál (ABM) v rámci projektu Výzkumná podpora bezpečnostního hodnocení HÚ (Večerník et al. 2019).

Byly testovány různé směsi bentonitů a cementů, nejvíce však směs bentonit BCV + cement CEM I.

#### **Nejistoty:**

Není definováno, jaké typy cementových materiálů budou používány v HÚ (typy cementů, přesné složení betonů, vyžadované parametry a jejich limitní hodnoty). Další nejistotou je dlouhodobá stabilita, chemický a mineralogický vývoj cementových materiálů v dlouhodobém horizontu. Materiály, které je možno dnes studovat jsou připravovány čerstvé, případně mohou být pár desítek let staré, pro dlouhodobé hodnocení bezpečnosti je nutno zohlednit vývoj vlastností cementových materiálů v čase.

**Reference:**

- HAVLOVÁ V., PERTOLDOVÁ J., BUKOVSKÁ Z., MIXA P., MILICKÝ M., ŘÍHA J., HROCH T., ŠTĚDRÁ V., ČERVINKA R. (2018a): Hierarchie kritérií či indikátorů vhodnosti lokalit a způsob hodnocení lokalit. – MS SÚRAO TZ 285/2018, Praha.
- ROSENDORF T., HOFMANOVÁ E., VOPÁLKA D., VETEŠNÍK A., VEČERNÍK P., ČERVINKA R. (2017). Diffusion experiments on bentonite/cement interface: development of methodology and evaluation. Migration 2017: Booklet of abstracts.
- VEČERNÍK, P., HAUSMANNOVÁ, L., ČERVINKA, R., VAŠÍČEK, R., ROLL, M., HLOUŠEK, J., HAVLOVÁ, V. (2016). Interaction between cement and Czech bentonite under temperature load and in in-situ conditions: an overview of experimental program. Deliverable n° D4.08, CEBAMA: Draft of the 1st Annual Project Workshop Proceeding.
- VEČERNÍK P., DRTINOVÁ B., BÁRTA, J., BRÁZDA L., GALEKOVÁ E., HAVLOVÁ V., HOFMANOVÁ E., KAŠPAR V., KITTNEROVÁ J., KOLOMÁ K., ROSENDORF, T., VOPÁLKA D. (2019c): Transportní vlastnosti cementových materiálů – závěrečná zpráva. – MS SÚRAO, TZ 430/2019.

**7.4.1.5 Změna fází FeII/FEIII****Popis:**

Dominantním smektitem v bentonitu je montmorillonit, kde se Fe nachází spolu s Al a Mg v oktaedrickém vrstvě fylosilikátu. Toto Fe je náchylné k redoxním reakcím vlivem chemických nebo mikrobiálních procesů, a pokud je Fe(III) redukováno na Fe(II), ovlivní to i náboj vrstvy, a tedy také i řadu jeho důležitých vlastností. (Svensson a Hansen 2013).

Zastoupením Fe-bohatých fází i nabožením smektitu železem v oktaedrických pozicích se české bentonity odlišují od světových standardů i od Ca-bentonitů většiny evropských ložisek – viz FEP 6.3.5.1. Vliv obsahu Fe a změny v oxidačních stavech nebyly zatím studovány.

**Vliv na dlouhodobou bezpečnost:**

Změny ve struktuře bentonitu mohou ovlivnit změny vlastností, významné pro zajištění bezpečnostních funkcí (plasticita, CEC, sorpční vlastnosti).

**Dostupná data:**

Průměrné zastoupení Fe v bentonitu je uvedeno v Hausmanová et al. (2018).

**Nejistoty:**

Vliv obsahu Fe a změny v jeho oxidačních stavech nebyly zatím studovány.

**Reference:**

- HAUSMANNOVÁ L., HANUSOVÁ I., DOHNÁLKOVÁ M. (2018): Shrnutí výzkumu českých bentonitů pro hlubinné úložiště – do roku 2018. MS SÚRAO TZ 309/2018, Praha.
- SVENSSON, P.D., HANSEN, S. (2013): Redox Chemistry in Two Iron-Bentonite Field Experiments at Äspö Hard Rock Laboratory, Sweden: An XRD and Fe K-Edge Xanes Study. Clays Clay Miner. 61, 566–579 (2013). <https://doi.org/10.1346/CCMN.2013.0610609>

### 7.4.1.6 Změny minoritních fází, včetně organické hmoty

#### Popis:

Negativní ovlivnění prostředí, včetně inženýrských bariér, představuje v tomto případě především oxidace přítomných akcesorických sulfidů vedoucí k okyselení prostředí a změně chemismu podzemní vody (významný nárůst koncentrací síranů). V případě zvýšené přítomnosti pyritu je třeba, aby v materiálu byly přítomny také karbonáty, které budou efektivně neutralizovat kyselost produkovanou oxidací pyritu (Havlová et al. 2018).

Rozpuštěná organická hmota (DOC) může zvyšovat stabilitu jílových koloidních částic (Červinka et al., 2014). Zároveň však může být zdrojem živin pro mikroorganismy.

#### Vliv na dlouhodobou bezpečnost:

Přítomnost nestabilních minerálů může významně ovlivnit geochemickou rovnováhu prostředí v období provozu HÚ v oxidačních podmínkách a krátce po jeho uzavření, kdy se HÚ bude nacházet ve fázi přechodu z oxidačních do redukčních podmínek

#### Dostupná data:

Akcesorické minerály pro české bentonity jsou souhrně uvedeny v Hausmanová et al (2018). Obsah organické hmoty tu uveden není

Vliv jejich změn však nebyl rozsáhle studován.

#### Nejistoty:

Obsah minoritních složek je obvykle problematický, protože jejich obsah je obvykle na pomezí meze stanovitelnosti (zejména RTG metodami). Bentonit je přírodní produkt vzniklý přeměnou vulkanického materiálu. Složitost způsobená malou velikostí částic materiálu a jeho variabilita jako přírodního produktu činí ineralogickou interpretaci často náročným. Potíže se vyskytují při identifikaci špatně krystalických jílových minerálů, jílových minerálů smíšených vrstev, hydroxyinterkalovaných jílových minerálů a špatně krystalických akcesorických minerálů, jakož i při jejich kvantifikaci. Techniky přípravy vzorků a mineralogické metody používané pro charakterizaci mohou také způsobit variabilitu v uváděných mineralogických složeních.

#### Reference:

HAVLOVÁ V., PERTOLDOVÁ J., BUKOVSKÁ Z., MIXA P., MILICKÝ M., ŘÍHA J., HROCH T., ŠTĚDRÁ V., ČERVINKA R. (2018a): Hierarchie kritérií či indikátorů vhodnosti lokalit a způsob hodnocení lokalit. – MS SÚRAO TZ 285/2018, Praha.

ČERVINKA R., GONDOLLI J., VIDENSKÁ K. (2014): Shrnutí dosažených výsledků v roce 2014. Zpráva projektu: Eroze bentonitu a její dopad na dlouhodobé chování inženýrských bariér hlubinného úložiště a transport radionuklidů. – Zpráva ÚJV Řež, a. s., ÚJV-14398.

### 7.4.1.7 Chemická eroze (uvolnění koloidů)

#### Popis:

Čistě chemická eroze, tedy taková, jež by byla způsobena výhradně chemickým vlivem, se v prostředí úložiště nepředpokládá. Přesto nelze vyloučit vliv chemických procesů na stabilitu bentonitu a akcesorických minerálů, jež mohou ve výsledku vést zejména ke kombinované chemicko-mechanické erozi. Jedná se zejména o procesy, průniku podzemní vody o výrazně odlišném chemickém složení, než má rovnovážná voda v kontaktu s bentonitem, do bentonitové bariéry nebo bobtnání bentonitu do prostor obsahujících takovou vodu (např. puklin na rozhraní bentonitu a granitu). V tomto případě může docházet k ovlivnění podmínek tvorby a stability bentonitového solu a gelu vedoucí ke změně koloidního chování. Při uplatnění tohoto scénáře dochází vlivem nízké hustoty bentonitu a vysoké hydratace k postupnému oddělování částic a tyto mohou být poté transportovány proudící vodou případně mohou difundovat jako volné částice. Výsledkem je poté úbytek bentonitu v takto exponovaném místě.

a iontová síla vody, zejména pak kritické koagulační koncentrace jednotlivých iontů určující hranici mezi stabilní a nestabilní fází. Důležitý je zejména chemismus bentonitu a přítomnost akcesorických minerálů kontrolujících kritické koagulační koncentrace daných iontů.

Při uvolnění radionuklidů z odpadu se mohou tvořit tzv. pravé koloidy radionuklidů. Severa a Bár (1985) definují pravé koloidy radionuklidů jako těžko rozpustné sloučeniny radionuklidu koloidního charakteru.

(Pseudo) koloidy (koloidy jiné než pravé koloidy radionuklidů) se mohou skládat z malých minerálních fragmentů, bakterií, virů, kapiček organických látek a větších organických molekul. Některé koloidy vznikají chemickými reakcemi, které srážejí minerály; jiné jsou generovány povrchovými reakcemi, které disagregují a uvolňují malé částice z povrchů.

Koloidy vznikají několika mechanismy: Primární tvorba anorganických koloidů je řízena především fyzikální fragmentací složek hostitelské horniny v kontaktu s podzemní vodou (Degueldre et al., 1996/I). Vytvořené koloidy mohou být dále erodovány na menší částice (Lerman 1976).

Stabilita jílových koloidů je zejména ovlivněna iontovou silou a obsahem dvoumocných kationtů v podzemních vodách. I hodnota pH hraje určitou roli. Rychlost eroze bentonitu je ovlivněna rychlostí proudící vody. Rychlost eroze bentonitu je ovlivněna velikostí pukliny a bobtnání do volných prostor (puklin) probíhá zejména ve fázi saturace bentonitu (Červinka et al. 2015b).

#### Vliv na dlouhodobou bezpečnost:

Vznik koloidů a jejich transport, včetně navázaných radionuklidů, je považována za významný, byť jeho detaily nebyly zcela popsány. Byl např. zařazen do normálního scénáře při hodnocení bezpečnosti ve Vokál et al. (2010a,b).

#### Dostupná data:

Diskuze na toto téma je vedena v pracích Kahoun et al (2011) a Vokál et al. (2010a,b). Erozi bentonitu se věnoval ve svých pracích Červinka et al (2014, 2015a,b). Tyto práce zahrnovaly následující oblasti výzkumu

- porozumění hlavním mechanismům eroze bentonitových tlumících a těsnících materiálů;



- studii stability koloidních jílových částic za různých geochemických podmínek;
- výzkum interakce koloidních částic s radionuklidy a okolním hostitelským prostředím.

**Nejistoty:**

Nejistoty chemické eroze bentonitu jsou velmi dobře shrnuty v práci Červinka et al. (2015b).

Mechanismus eroze není zcela jasně popsán a je třeba se tímto tématem zabývat. Je nutno ověřit, zda eroze představuje významný problém pro bezpečnost HÚ. Není zcela jasná role dvojmocných kationtů Ca, Mg. Ukazuje se za poměrně významné doplnit údaje z hydrochemie, především analýzy podzemních vod z relevantních hloubek (při současné koncepci hlubinného úložiště z hloubek více než 500 m) a relevantních horninových masivů. Je vhodné ověřit závislost eroze bentonitu na rychlosti proudění vody, velikosti pukliny a obsahu kationtů v podzemní vodě.

**Reference:**

- ČERVINKA R., GONDOLLI J., VIDENSKÁ K. (2014): Shrnutí dosažených výsledků v roce 2014. Zpráva projektu: Eroze bentonitu a její dopad na dlouhodobé chování inženýrských bariér hlubinného úložiště a transport radionuklidů. ÚJV Řež, a. s. ÚJV-14398.
- ČERVINKA R., GONDOLLI J., VIDENSKÁ K. (2015A): Shrnutí dosažených výsledků v roce 2015. Zpráva projektu: Eroze bentonitu a její dopad na dlouhodobé chování inženýrských bariér hlubinného úložiště a transport radionuklidů. ÚJV Řež, a. s. ÚJV-14535.
- ČERVINKA R., GONDOLLI J., VIDENSKÁ K. (2015B): Eroze bentonitu a její dopad na dlouhodobé chování inženýrských bariér hlubinného úložiště a transport radionuklidů. Závěrečná zpráva projektu. ÚJV Řež, a. s. ÚJV-Z44495.
- DEGUELDRE C., GRAUER R. AND LAUBE A. (1996/II); Colloid properties in granitic groundwater systems. II: Stability and transport study. Applied Geochemistry. Vol 11. pp. 697-710. Elsevier Science Ltd.,
- DEGUELDRE C., PFEIFFER H.-R., ALEXANDER W. WERNLI B. AND BREUTSCH R. (1996/I); Colloid properties in granitic groundwater systems. I: Sampling and characterisation. Applied Geochemistry, Vol 11. pp. 677-695. Elsevier Science Ltd.,
- LERMAN A. (1979); GEOCHEMICAL PROCESS, WATER AND SEDIMENT ENVIRONMENTS. WILEYINTERSCIENCE PUBLICATION, MCCARTHY, J.F. AND ZACHARA, J.M. (1989) Subsurface Transport of Contaminants. Environmental Science & Technology, 23, 496-502.,
- KAHOUN ET AL. (2011): Aktualizace referenčního projektu hlubinného úložiště radioaktivních odpadů v hypotetické lokalitě, V. etapa – Nejistoty řešení hlubinného úložiště a návrh dalších prací, ÚJV Řež a.s. – divize Energoprojekt Praha, 2011
- SEVERA J., BÁR J. (1985): Kontaminace radioaktivními látkami a dekontaminace. Československá komise pro atomovou energii, 1985; INIS-mf-10587.,
- VOKÁL ET AL. (2010A): Aktualizace referenčního projektu hlubinného úložiště radioaktivních odpadů v hypotetické lokalitě, III. etapa – Studie Zadávací bezpečnostní zprávy, ÚJV Řež a.s. – divize Energoprojekt Praha, 2010
- VOKÁL A., HAVLOVÁ V., HERCÍK M., LANDA J., LUKIN D., LANDA J. (2010B): Aktualizace referenčního projektu hlubinného úložiště radioaktivních odpadů v hypotetické lokalitě, III.

etapa – Hodnocení dlouhodobé bezpečnosti, ÚJV Řež a.s. – divize Energoprojekt Praha, 2010

#### 7.4.1.8 Změna vlastností vlivem záření

##### Popis:

Vzhledem k tomu, že radiační stabilita anorganických látek je obecně velmi vysoká, nepředpokládáme, že by ionizující záření přímo ovlivnilo vlastnosti bentonitu nebo indukovalo jeho chemické změny. Pokud bude v systému docházet k radiačně indukovaným změnám, bude to dáno radiolýzou plynů a pórového roztoku bentonitu.

V literatuře lze najít příklady, jako např. v práci CHenga et al. (2022). Bentonit byl ozařován  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -paprsky v dávkovém příkonu 10 kGy/h pro dosažení dávek ozáření 1, 2, 3 MGy a byl charakterizován tak, aby vyhodnotil jeho stabilitu před a po ozáření a pochopil mechanismus poškození zářením. Struktura bentonitu byla mírně ovlivněna vysokými dávkami ozáření a adsorpční kapacita U(VI) ozářeného bentonitu byla snížena oproti surovému bentonitu. Informace o žádné podobné studii v ČR jsme nenašli.

Změny v systému v tomto případě budou dány interakcí primárních produktů radiolýzy vody s ostatními složkami systému. Pro koncentrované roztoky ( $c > 1 \text{ mol.l}^{-1}$ ) nabývá na významu i přímá interakce ionizujícího záření s rozpuštěnými ionty.

Vliv produktů radiolýzy vody na bentonit by mohl být dvojitý. Za prvé by mohlo docházet k přímým reakcím mezi produkty radiolýzy vody a bentonitem. Např. pokud bude bentonit obsahovat pyrit, může docházet k jeho oxidaci (Lefticariu et al., 2010) produkty radiolýzy vody. Za druhé by bentonit mohl být ovlivněn produkty interakce rozpuštěných složek s produkty radiolýzy vody v systému (např. interakce bentonitu s radiolyticky oxidovanými korozními produkty). Jak již bylo řečeno výše, k přímému ovlivnění vlastností bentonitu vlivem IZ by nemělo dojít vzhledem k vysoké radiační stabilitě anorganických látek (Dobrev et al. 2015).

##### Vliv na dlouhodobou bezpečnost:

Vliv na korozi UOS, případně oxidaci složek bentonitu (viz 7.4.1.5, 7.4.1.6)

##### Dostupná data:

Nejsou dostupná data pro český bentonit. Pro řádný rozbor probíhající reakci v systému a jejich vzájemné ovlivnění by bylo nutné provést numerické modelování tohoto systému, který je navíc vícefázový a otevřený. Tvorba takového modelu a jeho verifikace však přesahuje rámec tohoto projektu.

##### Nejistoty:

Pro řádný rozbor probíhající reakci v systému a jejich vzájemné ovlivnění by bylo nutné provést numerické modelování tohoto systému, který je navíc vícefázový a otevřený. Tvorba takového modelu a jeho verifikace však přesahuje rámec tohoto projektu.

**Reference:**

- DOBREV D., GONDOLLI J., KÁRNÍK D., KOUŘIL M., STOULIL J., KOTNOUR P., MULLER J., LOVECKÝ M., ŠIK J., MACÁK P., MATAL O., ČERMÁK J., KRÁL L. (2015): Výzkum a vývoj ukládacího obalového souboru pro hlubinné ukládání vyhořelého jaderného paliva do stádia realizace vzorku. 1. Průběžná zpráva. Zpráva ŠJs, a.s. Ae15534/dok Rev. 1. Orlík, 2015.
- CHENG, J., GU, R., HE, P. ET AL. (2022): Effect of high-dose  $\gamma$ -ray irradiation on the structural stability and U(VI) adsorption ability of bentonite. J Radioanal Nucl Chem 331, 339–352 (2022). <https://doi.org/10.1007/s10967-021-08117-9>
- LEFTICARIU L., PRATT L. A., LAVERNE J. A., SCHIMMELMANN A. (2010): Anoxic pyrite oxidation by water radiolysis products – A potential source of biosustaining energy. Earth and Planetary Science Letters 292, 57-67

## 7.4.2 Chemické rovnováhy a kinetiky

### 7.4.2.1 Změna chemismu pórové vody (i na rozhraní s horninou)

**Popis:**

Z geochemického hlediska je složení pórové vody bentonitu ovlivněno zejména složením pevné fáze (bentonitu), kapalně fáze (okolní podzemní voda) a plynné fáze (zejména parciální tlaky  $\text{CO}_2$  a  $\text{O}_2$ ), dále kompakcí bentonitu a rychlostí difúze specií podzemní vody skrz bentonit. Rovněž následující procesy by měly být vzaty v úvahu: rozpouštění příměsí obsažených v bentonitu (zejména se jedná o dobře rozpustné sole, např. NaCl, KCl, sádrovec, celestit), iontová výměna kationtů v mezivrstvi jílových minerálů (tzv. „*layer-site*“), protonizace a deprotonizace povrchových hydroxylových skupin (tzv. „*edge-site*“), oxidačně-redukční potenciál podle nejsilnějšího páru (např. Fe(II)/Fe(III)) a v neposlední řadě dlouhodobá stabilita minerálních fází (rozpouštění, srážení) a jejich možná transformace (např. termická přeměna smektitu na illit; Červinka a Hanuláková 2013).

Ke změně složení pórové může dojít např. při intruzi vody výrazně jiného složení, než má rovnovážná voda v kontaktu s bentonitem. Pro Ca-Mg bentonit je vhodnější podzemní voda s převahou Ca, Mg oproti Na, K (Havlová et al. 2018). Při kontaktu s vodou o vysokém obsahu  $\text{K}^+$  může dojít k procesu illitizace.

**Vliv na dlouhodobou bezpečnost:**

Složení pórové vody je klíčovým faktorem, který bude ovlivňovat řadu procesů probíhajících v HÚ (např. ovlivnění bobtnacích tlaků jílových minerálů, rychlost koroze obalového souboru, rozpustnosti, difúze a sorpce radionuklidů – ovlivnění distribučních koeficientů).

**Dostupná data:**

Chemismu bentonitové pórové vodě se věnují zejména práce Vokál et al. 2006; Červinka a Hanuláková 2013; částečně Hofmanová et al. 2019)

**Nejistoty:**

Ad 6.3.5.2.

**Reference:**

- ČERVINKA R., HANULÁKOVÁ D. (2013): Laboratorní výzkum tlumících, výplňových a konstrukčních materiálů. Geochemické modelování – bentonitová pórová voda. Zpráva ÚJV Řež, a. s., 14269, 111 s.
- HAVLOVÁ V., PERTOLDOVÁ J., BUKOVSKÁ Z., MIXA P., MILICKÝ M., ŘÍHA J., HROCH T., ŠTĚDRÁ V., ČERVINKA R. (2018a): Hierarchie kritérií či indikátorů vhodnosti lokalit a způsob hodnocení lokalit. – MS SÚRAO TZ 285/2018, Praha.
- HOFMANOVÁ E., ČERVINKA R., VOPÁLKA D., BABOROVÁ L., BRÁZDA L., PECKOVÁ A., VETEŠNÍK A., VIGLAŠOVÁ E., VAŠÍČEK R. (2019): Transport radionuklidů z úložiště / vstupní parametry a procesní modely pro hodnocení transportu radionuklidů přes inženýrské bariéry: Závěrečná zpráva. – MS SÚRAO, ZZ 420/2019, Praha.
- VOKÁL A. ET AL. (2006): Výzkum procesů pole blízkých interakcí hlubinného úložiště vyhořelého jaderného paliva a vysoce aktivních odpadů. Analýza zahraničních poznatků o migraci vybraných radionuklidů přes materiály blízkých interakcí. Průběžná technická zpráva č. 1. ÚJV Řež, a. s., Příloha, TZ\_3\_3.1.

**7.4.2.2 Ko-precipitace fází radionuklidů s minerály****Popis:**

Za určitých podmínek může docházet jednak k precipitaci látek jako takových, a to za podmínky, kdy je dosaženo nasycení roztoku (např.  $\text{RaSO}_4$ ), jednak k zachycení ve srážejících se fázích, jako jsou například oxyhydroxidy Fe (koprecipitace). K vazbě do krystalové mřížky může docházet buď přímo, nebo při krystalizaci původně amorfních fází, v nichž byly prvky imobilizovány.

Specifikaci procesu podal např. Curti (1997) – viz Obr. 20

<b>COPRECIPITATION</b> The trapping of foreign chemical components in a solid of stoichiometric composition	<b>ISOMORPHOUS REPLACEMENT (SOLID SOLUTION)</b>	The incorporation of foreign ions in crystal lattice sites usually occupied by a major ion of the solid.
	<b>INCORPORATION IN CRYSTAL DEFECTS</b>	Incorporation of foreign ions, atoms or molecules outside the crystal lattice positions (e.g. in vacancies or dislocations). For an amorphous compound, any incorporation at atomic scale.
	<b>NON-UNIFORM INCORPORATION</b>	The trapping of discrete particles (e.g. colloids) in a growing solid.

Obr. 20 Sxchéma procesu koprecipitace

**Vliv na dlouhodobou bezpečnost:**

Spíše minoritní, pro specifické radionuklidy, jako je Ra

**Dostupná data:**

Pro české prostředí nejsou dostupné.

Rešerši a podrobný popis procesů s rozsáhlým citačním aparátem poskytuje např. Curti et al. (1997).

**Nejistoty:**

Proces není pro český bentonit popsán.

**Reference:**

CURTI, ENZO. (1997): Coprecipitation of radionuclides: Basic concepts, literature review and first applications. PSI Report 97-10. PSI, Switzerland.

### 7.4.2.3 Snížení obsahu kyslíku po uzavření úložiště

**Popis:**

V průběhu 1. fáze vývoje HÚ může být kyslík spotřebováván aerobní korozí UOS (spíše zanedbatelná), oxidací Fe minerálů v bentonitu (Wersin et al., 1994), (Puigdomenech et al., 2001), (Grandia et al., 2006), (Giroud et al., 2018). mikrobiální aktivitou v bentonitu (Kotelnikova & Pedersen, 1998) (Giroud et al., 2018). I oxidace sulfidů v tlumících materiálech může přispívat ke spotřebě kyslíku a mohla by produkovat síran a thiosíran (Landolt et al., 2009).

(Wersin et al., 1994) navrhli dva hlavní procesy zodpovědné za spotřebu  $O_2(g)$  v tlumících materiálech, kterými byly (1) difúze do okolní horniny a (2) reakce s minerálními fázemi existujícími ve výplňových a zásypových materiálech. Předpověděli, že anoxické podmínky se v tlumícím materiálu obnoví v rozmezí 7 až 290 let po uzavření úložiště, v závislosti na hodnotě přijaté pro nejnejistější parametr: reaktivní povrch přítomných minerálů.

V rámci Microbe-REX (Kotelnikova & Pedersen, 1998) zjistili, že mikrobiální organismy významně přispívají k vyčerpání kyslíku, což jsou předpokládané doby potřebné pro spotřebu 500 pM rozpuštěného kyslíku v rozmezí od 9 dnů do 4 let.

(Grandia et al., 2006) použili modelovací přístup k začlenění geochemických procesů, jako je oxidace pyritu, sideritu, organické hmoty nebo jiných Fe(II) fází, do modelování spotřeby kyslíku ve výplňových materiálech v prostředí HÚ v krystalických horninách. Očekává se, že doba spotřeby kyslíku v tlumících materiálech bude velmi krátká (měsíce) ve srovnání s jinými zájmovými hydrologickými a geochemickými procesy (tisíce let) v případě geochemických procesů. Na druhé straně při absenci geochemických procesů mohou aerobní podmínky převládat po více než 5000 let.

Wersin revidoval své výsledky v (Wersin et al., 2007) tak, že časový horizont pro vyčerpání  $O_2$  bude pravděpodobně několik let až několik desetiletí.

Kombinované výsledky in-situ monitorování v experimentu FE-G v Mont Terri URL (jílové horninové prostředí), modelování a specializované laboratorní experimenty v (Tomonaga et al., 2019) a (Giroud et al., 2018) ukazují, že anoxických podmínek může být dosaženo ve

výplňových materiálech během několika týdnů až maximálně několika měsíců (v experimentu FE-G 5 měsíců) po uzavření, což je mnohem rychleji, než se dříve odhadovalo.

(Giroud et al., 2018) a následně (Tomonaga et al., 2019) považují procesy aerobní koroze a oxidace pyritu za zanedbatelné a příspěvek mikroorganismů za nejasný. Za nejdůležitější procesy řídící chování  $O_2$  v tlumících materiálech považovali procesy výměnné reakce plynu s bentonitovou pórovou vodou a adsorpce na minerálních površích

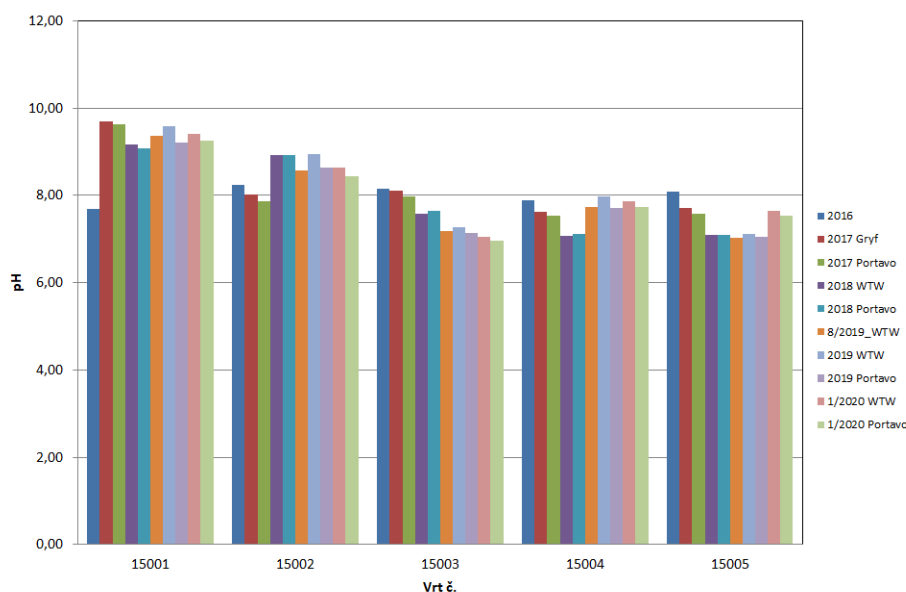
#### **Vliv na dlouhodobou bezpečnost:**

Obsah kyslíku v tlumících materiálech bude ovlivňovat především následující procesy

- Korozi UOS (procesy na rozhraní): přítomnost  $O_2$  ovlivňuje charakter koroze a typ vznikajících korozních produktů, jež mají vliv na odolnost UOS a zachování jeho dlouhodobé bezpečnostní funkce (*Zadržet radioaktivní odpad v obalovém souboru a Zpomalit migraci radionuklidů od radioaktivního odpadu do životního prostředí*) – vliv však spíše zanedbatelný
- Vývoj chemismu bentonitové pórové vody: vznikající pórová voda a její složení ovlivňují speciaci radionuklidů a tím i bezpečnostní funkci tlumícího materiálu, a to je *Zpomalit migraci radionuklidů od radioaktivního odpadu do životního prostředí*
- Speciace radionuklidů v pórové vodě bentonit: přítomnost  $O_2$  ovlivňuje formu radionuklidu a jeho mobilitu. ad Vývoj chemismu podzemní vody, tím i bezpečnostní funkci tlumícího materiálu, a to *Zpomalit migraci radionuklidů od radioaktivního odpadu do životního prostředí*

#### **Dostupná data:**

Data pro spotřebu kyslíku v prostředí výplňových materiálů pro české prostředí prakticky chybí. Některé informace by bylo možné použít z výsledků in situ experimentů, které zahrnovaly kompaktní bentonit (např. MACOTE; Dobrev et al., 2020 – viz Obr. 21), kde je však bentonit obsažen jen v limitovaném množství. Nicméně i zde je poměrně rychle dosaženo anaerobního prostředí ve vrtech.



Obr. 21 Porovnání hodnot pH v jednotlivých vrtech v čase. V roce 2017 bylo provedeno měření dvěma přístroji Gryf a Portavo a v následujících letech přístroji WTW a Portavo (Dobrev et al. 2020)

### Nejistoty:

Spotřeba  $O_2$  v prostředí kompaktovaného bentonitu se problematicky měří in situ a stanovuje ve vzorcích z experimentů. V českém prostředí je jen minimum informací o obsahu  $O_2$  v prostředí kompaktovaného bentonitu a jeho spotřebě. Stejně tak je komplikovaná definice, které procesy jsou zodpovědné za spotřebu kyslíku. Vliv může mít složení bentonitu, počáteční stav (kompakce, obsah minerálů Fe, přítomnost mikroorganismů apod.)

Proces není pro český bentonit popsán.

### Reference:

- DOBREV D., MIRANDA MENDOZA A., STOULIL J., STEINOVÁ J. (2020): Korozní zkouška v přírodním granitoidním prostředí. – MS SURAO TZ 194/2017, rev.č.3, SURAO, Praha.
- GIROUD, N., TOMONAGA, Y., WERSIN, P., BRIGGS, S., KING, F., VOGT, T., & DIOMIDIS, N. (2018). On the fate of oxygen in a spent fuel emplacement drift in Opalinus Clay. *Applied Geochemistry*, 97, 270–278. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2018.08.011>
- GRANDIA, F., DOMENECH, C., ARCOS, D., & DURO, L. (2006). *Assessment of the oxygen consumption in the backfill Geochemical modelling in a saturated backfill*. <http://www.skb.se/upload/publications/pdf/R-06-106webb.pdf>
- KOTELNIKOVA, S., & PEDERSEN, K. (1998). *Microbial  $O_2$  consumption in the Aespoe tunnel*. [http://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig\\_q=RN:30052487](http://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:30052487)
- LANDOLT, D., DAVENPORT, A., PAYER, J., & SHOESMITH, D. (2009). *Review of Materials and In, Corrosion Issues Regarding Canisters for Disposal of Spent Fuel and High-level Waste., Opalinus Clay*.
- MALMSTROEM, M., BANWART, S., DURO, L., WERSIN, P., & BRUNO, J. (1995). *Biotite and chlorite weathering at 25 degrees C: the dependence of pH and (bi)carbonate on weathering*

*kinetics, dissolution stoichiometry, and solubility; and the relation to redox conditions in granitic aquifers.* [http://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig\\_q=RN:26046742](http://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:26046742)

PUIGDOMENECH, I., AMBROSI, J. P., EISENLOHR, L., LARTIGUE, J. E., BANWART, S. A., BATEMAN, K., MILODOWSKI, A. E., WEST, J. M., GRIFFAULT, L., GUSTAFSSON, E., HAMA, K., YOSHIDA, H., KOTELNIKOVA, S., PEDERSEN, K., MICHAUD, V., TROTIGNON, L., RIVAS PEREZ, J., & TULLBORG, E. L. (2001). *O<sub>2</sub> depletion in granitic media The Rex project.* <http://www.skb.se/uploads/pdf/TR-01-05webb.pdf>

SHOJI, T., LU, Z., & PENG, Q. (2011). 6 - Factors affecting stress corrosion cracking (SCC) and fundamental mechanistic understanding of stainless steels. In V. S. Raja & T. B. T.-S. C. C. Shoji (Eds.), *Woodhead Publishing Series in Metals and Surface Engineering* (pp. 245–272). Woodhead Publishing. <https://doi.org/https://doi.org/10.1533/9780857093769.3.245>

TOMONAGA, Y., GIROUD, N., BRENNWALD, M. S., HORSTMANN, E., DIOMIDIS, N., KIPFER, R., & WERSIN, P. (2019). On-line monitoring of the gas composition in the Full-scale Emplacement experiment at Mont Terri (Switzerland). *Applied Geochemistry*, 100, 234–243. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2018.11.015>

WERSIN, P., BIRGERSSON, M., OLSSON, S., KARNLAND, O., & SNELLMAN, M. (2007). *Impact of corrosion-derived iron on the bentonite buffer within the KBS-3H disposal concept The Olkiluoto site as case study.* [http://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig\\_q=RN:40052160](http://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:40052160)

WERSIN, P., SPAHIU, K., & BRUNO, J. (1994). *Time evolution of dissolved oxygen and redox conditions in a HLW repository.* [http://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig\\_q=RN:25062524](http://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:25062524)

#### 7.4.2.4 Interakce plynů

##### Popis:

Současné znalosti ohledně interakcí plyn-kapalina-inženýrské bariéry v souvislosti s tvorbou a migrací plynu byly shrnuty zejména v rámci projektu FORGE. Předpokládány jsou 3 hlavní fáze vývoje systému (Norris S. edit. 2010 v Dobrev et al. 2015):

1. Množství vytvořeného plynu je malé a plyn se rozpouští v kapalně fázi porézního materiálu (saturovaný bentonit) a je dále transportován difúzí do okolního prostředí.
2. V případě, že množství vytvořeného plynu je vyšší, než je difúzní transportní kapacita rozpuštěného plynu, dochází k tvorbě plynné fáze (izolované bubliny plynu). S nárůstem množství vytvořeného plynu dochází i k nárůstu tlaku plynné fáze, což může vést k postupné desaturaci bentonitu.
3. S další tvorbou plynu dochází ke spojení jednotlivých bublin plynu a vzniku souvislé plynné fáze. Plyn je saturovaným bentonitem odváděn advekcí v podobě dvoufázového toku. V případě, že ani tento způsob nestačí k odvádění vznikajícího plynu, dochází k dalšímu nárůstu tlaku až je tento tlak vyšší než celkový tlak v saturovaném bentonitu a dojde k vytvoření otevřené preferenční cesty pro plyn. Po vytvoření této vysoce vodivé cesty dojde k výraznému poklesu tlaku plynu a díky schopnosti samohojení bentonitu má tato preferenční cesta tendenci se uzavřít. Tento proces se může opakovat do té doby, dokud tvorba plynu



neklesne dostatečně nízko na to, aby vznikající plyn bylo možné odvádět prostřednictvím pórové vody.

Případy, kdy dochází ke vzniku plynné fáze, představují z hlediska bezpečnosti HÚ problematické situace, protože dochází k narušení bezpečnostních funkcí bentonitové bariéry. Její desaturace vede k poklesu těsnicí schopnosti a vznik plynem generovaných preferenčních cest poté k možnosti rychlejší migrace radionuklidů. Migrující plyn může současně působit jako transportní médium pro radionuklidy nebo koloidní jílové částice (např. s nasorbovanými radionuklidy) (Norris S. edit. 2013).

Z výsledků projektu FORGE vyplývá (Norris S. edit. 2013), že v nesaturovaném či částečně saturovaném bentonitu je dvoufázový tok dominantním transportním mechanismem.

#### **Vliv na dlouhodobou bezpečnost:**

Vzhledem k nejistotám, spojeným s produkcí plynu v HÚ, nelze významn reakce plynů s okolím blíže posoudit.

#### **Dostupná data:**

Současné znalosti ohledně interakcí plyn-kapalina-inženýrské bariéry v souvislosti s tvorbou a migrací plynu byly shrnuty zejména v rámci projektu FORGE (Norris et al. edit 2013). V českých projektech byla sledována spíše migrace plynu bentonitovými materiály (Mendoza 2019; Svoboda st al. 2019).

#### **Nejistoty:**

Vlastní produkce vodíku či jiných plynů a jejich následné chování v inženýrských bariérách (zejména v bentonitu) a případný vliv na probíhající korozi jsou zatíženy významnou nejistotou. V českém konceptu nebyl problém interakce plynů studován.

#### **Reference**

- DOBREV D., GONDOLLI J., KÁRNÍK D., KOUŘIL M., STOULIL J., KOTNOUR P., MULLER J., LOVECKÝ M., ŠIK J., MACÁK P., MATAL O., ČERMÁK J., KRÁL L. (2015): Výzkum a vývoj ukládacího obalového souboru pro hlubinné ukládání vyhořelého jaderného paliva do stádia realizace vzorku. 1. Průběžná zpráva. Zpráva ŠJs, a.s. Ae15534/dok Rev. 1. Orlík, 2015.
- MENDOZA MIRANDA, A. N. (2019): Hydrogen transport experiments in bentonit, – MS SÚRAO, TZ 383/2019/EN. Prague.
- NORRIS S. (EDIT.) (2013): NORRIS S., LEMY F., DEL HONEUX C.-A., VOLCKAERT G., WEETJENS E., WOUTERS K., WENDLING J., DYMITROWSKI M., PELLEGRINI D., SELLIN P., JOHNSON L., SENTIS M. HARRINGTON J. (2013): Synthesis Report: Updated Treatment of Gas Generation and Migration in the Safety Case, EC FORGE Project Milestone M68, 126 str.

### **7.4.3 Chemická interakce a degradace (betonové konstrukce)**

#### **Popis:**

Mezi hlavní procesy poškozující beton a ovlivňující jeho odolnost patří praskání a drobení, otěr, vyluhování, působení síranů, reakce křemíku s alkáliemi, karbonatce (Večerník et al., 2016). K chemickým interakcím a degradaci materiálu může dojít pouze za přítomnosti vody, tudíž k těmto jevům bude docházet až při/po saturaci úložiště vodou. Při interakci s vodou dochází

k postupnému rozpouštění cementových minerálních fází. V závislosti na rychlosti výměny vody v cementovém materiálu a okolí pak dochází k jejich vymývání a cementový materiál/beton je tak postupně ochuzován o tyto minerální fáze (Ochs et al., 2015).

Síranové působení – dochází k reakci vápenatých iontů z minerálních fází cementu a síranových iontů z vodného prostředí a vzniká nová minerální fáze, ettringit, která má větší objem a může způsobovat rozpínání materiálu a jeho praskání.

Karbonatace betonu – dochází při ní ke snižování pH matrice v důsledku reakce mezi  $\text{CO}_2$  a fázemi matrice obsahujícími vápník. Karbonatace může spotřebovávat  $\text{Ca(OH)}_2$  a CSH fáze.

Alkalická reakce kameniva – obvykle označuje nežádoucí reakci mezi určitými formami oxidu křemičitého přítomnými v betonovém kamenivu a alkalickou pórovou vodou přítomnou v cementovém prostředí, která vede k alkalicko-křemičité reakci (Potts a Potter, 2021). Existuje také forma reakce, která probíhá mezi uhličitany a alkalickou pórovou vodou, označovaná jako alkalická uhličitánové reakce (Sims a Poole, 2003). Tyto reakce vytvářejí gel, který absorbuje vodu a objemově se rozpíná, což vede k praskání betonu. K těmto reakcím obvykle dochází, pokud jsou oxid křemičitý nebo uhličitany dodávány prostřednictvím kameniva, takže je nepravděpodobné, že by k nim docházelo v materiálech použitých v HÚ, neboť by měly splňovat vstupní kritéria, která toto působení vyloučí.

#### **Vliv na dlouhodobou bezpečnost:**

Betonové/cementové materiály a z nich vytvořené konstrukce nemají dlouhodobou bezpečnostní funkci. Je nutno zmírnit/zabránit transportu radionuklidů případnými preferenčními cestami vzniklými po degradaci těchto prvků a zmírnit negativní interakce s materiály IB, zejména bentonitem.

#### **Dostupná data:**

Interakce cementových materiálů s vodou byly studovány v projektu SÚRAO – Hodnocení bezpečnosti HÚ, Transport 5 (Večerník et al., 2016).

#### **Nejistoty:**

Není stanovena specifikace složení cementových materiálů/betonů pro aplikaci v HÚ. Nejistotou také může být dostupnost některých surovin (např. elektrárenské popílků) v době výstavby a provozu úložiště.

Procesy závisí na chemickém složení podzemní vody a rychlosti její výměny v cementovém materiálu s okolím.

#### **Reference:**

OCHS M., MALLANTS D., WANG L. (2015): Radionuclide and metal sorption on cement and concrete. Topics in Safety, Risk, Reliability and Quality, no. 29, 1 edn, Springer, Switzerland.

POTTS A. A POTTER D. (2021): Deliverable D7.2.2: Reference package and factors affecting package evolution and degradation. PREDIS project – grant agreement No. 945098.

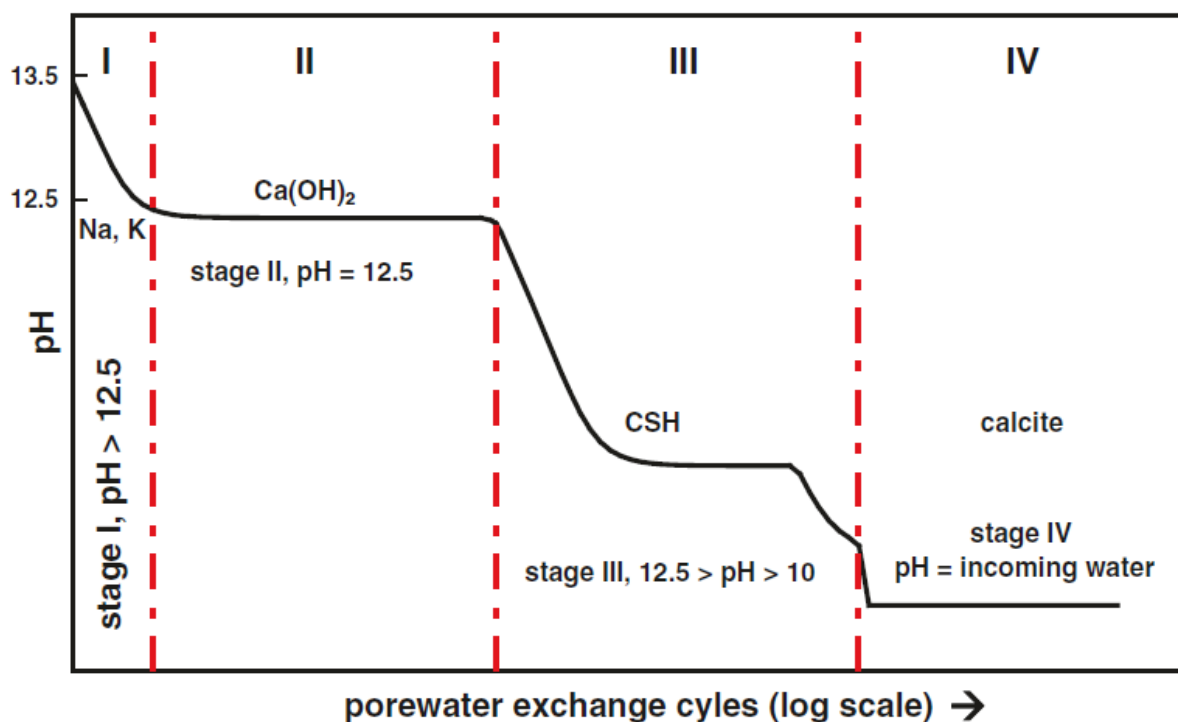
SIMS I. A POOLE A. (2003): Alkali–aggregate reactivity; in *Advanced Concrete Technology*, J. Newman and B. S. Choo, Eds. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2003, pp. 1–37.

VEČERNÍK P., DRTINOVÁ B., ADAM R., BABOROVÁ L., BRÁZDA L., FILIPSKÁ H., HAVLOVÁ V., KITTNEROVÁ J., KOZEMPEL J., PODOJIL A., VOPÁLKA D., ZAVADILOVÁ A. (2016): *Transportní vlastnosti cementových materiálů*, TZ 42/2016, SÚRAO, Praha.

### 7.4.3.1 Rozpouštění/srážení (betonové konstrukce)

#### Popis:

Beton, jehož pojivem je cement je vícefázový, porézni, silně bazický materiál. Hodnoty pH se v čerstvém materiálu pohybují kolem 13. Beton je tedy díky své mineralogické a chemické povaze přirozeně v nerovnováze se svým prostředím. Chemická povaha matrice je také klíčovým parametrem odolnosti betonu vůči okolnímu vodnému prostředí a chemické složení hydratovaných cementových fází určuje chemickou stabilitu tohoto materiálu (Alexander et al., 2013). Při interakci s vodou dochází k postupnému rozpouštění cementových minerálních fází. V závislosti na rychlosti výměny vody v cementovém materiálu a okolí pak dochází k jejich vymývání a cementový materiál/beton je tak postupně ochuzován o tyto minerální fáze. Interakci cementového materiálu s vodou schematicky znázorňuje Obr. 22 (Ochs et al., 2015). Vlivem změn koncentrace jednotlivých složek a pH loužícího roztoku může docházet také ke zpětné precipitaci solí (Večerník et al., 2016). Kromě výluhu alkálií a rozpouštění  $(\text{CaOH})_2$  a CSH fází dochází k rozpouštění i dalších složek cementu, např. sloučenin hliníku a železa (Aft, Afm). Hlavní složkou Aft je ettringit obsahující síranové ionty. Ettringit nepatří mezi příliš stabilní minerály – jeho degradaci může způsobit vyšší teplota nebo vyšší koncentrace alkálií. Při pH pod 10,5 dochází k rozkladu na sírany a hydroxidy kovů. (Lagerblad a Ab 2001).



Obr. 22: Schematické zobrazení vývoje pH v pórové vodě a rozpouštění minerálních fází při degradaci cementu. Hodnoty na osách pH a cykly výměny vody v pórech (respektive čas) jsou orientační a závisí na mnoha faktorech, jako je rychlost výměny pórů, agresivita prostředí a teplota (Ochs et al., 2015)

K rozpouštění a srážení minerálních fází může dojít pouze pomocí fyzikálních a chemických procesů za přítomnosti vody, tudíž k těmto jevům bude docházet až při/po saturaci úložiště vodou. V prvních fázích vývoje úložiště procesy rozpouštění a srážení nemohou probíhat. Tyto děje mohou nastat až po nasycení materiálů vodou a budou ovlivňovány teplotou okolí (zvýšená při produkci zbytkového tepla z VJP, nebo teplota okolí v poslední fázi).

#### Vliv na dlouhodobou bezpečnost:

Betonové/cementové materiály a z nich vytvořené konstrukce nemají dlouhodobou bezpečnostní funkci. Rozpuštěné minerální fáze budou interagovat s okolím, je proto nutno zohlednit možné negativní interakce s materiály IB, zejména bentonitem.

#### Dostupná data:

Data o rozpouštění/srážení cementových materiálů specifická pro český koncept HÚ nejsou k dispozici, obecně jsou procesy popsány v Ochs et al. (2015).

#### Nejistoty:

Není definováno složení cementových materiálů/betonů pro aplikaci v HÚ. Z obecných znalostí je možno předpovídat chování použitých cementových materiálů/betonů. Procesy rozpouštění a srážení závisí na vlastnostech materiálů a podzemní vody a rychlosti její výměny v cementovém materiálu s okolím a na teplotě prostředí.

**Reference:**

ALEXANDER M., BERTRON A., DE BELIE N.(2013): Performance of Cement-Based Materials in Aggressive Aqueous Environment, State-of-the-Art Report, RILEM TC 211 – PAE, 464 s.

OCHS M., MALLANTS D., WANG L. (2015): Radionuclide and metal sorption on cement and concrete. Topics in Safety, Risk, Reliability and Quality, no. 29, 1 edn, Springer, Switzerland.

VEČERNÍK P., DRTINOVÁ B., ADAM R., BABOROVÁ L., BRÁZDA L., FILIPSKÁ H., HAVLOVÁ V., KITTNEROVÁ J., KOZEMPEL J., PODOJIL A., VOPÁLKA D., ZAVADILOVÁ A. (2016): Transportní vlastnosti cementových materiálů, TZ 42/2016, SÚRAO, Praha.

**7.4.3.2 Karbonatace (betonové konstrukce)****Popis:**

Karbonatace je chemický proces, jehož důsledkem je snížení pH a degradace materiálu působením oxidu uhličitého. Při karbonataci dochází k reakci mezi oxidem uhličitým (obvykle, ale ne vždy z atmosféry) a fázemi obsahujícími Ca, které jsou přítomny v mikrostruktuře hydratovaného cementu, konkrétně hydroxidem vápenatým a CSH fázemi (Uras et al., 2021; Večerník et al., 2016). Portlandit reaguje za vzniku uhličitanu vápenatého. Touto reakcí se snižuje pH v materiálu a dochází i ke změnám ve strukturních a mechanických vlastnostech. Ve stavební praxi je karbonatace betonu sledována s ohledem na korozi ocelové výztuže, neboť tento proces výrazně zvyšuje riziko koroze výztuže (Večerník et al., 2020). Proces karbonatace lze rozdělit do tří hlavních kroků: rozpouštění fází obsahující vápník do pórové vody, adsorpce uhličitanových iontů a následné vysrážení uhličitanu vápenatého (Šavija a Luković, 2016), detailně ni proces popisují Fernandez Bertos et al., 2004. Tvorba uhličitanu vápenatého je také spojena s objemovou roztažností což může mít za následek a zmenšení objemu pórů případně až praskání cementu. Samotná karbonatace není pro beton příliš škodlivá, ve skutečnosti je pevnost v tlaku karbonatovaného betonu vyšší než u betonu, u kterého nedošlo ke karbonataci. Ale protože karbonatace je úzce svázána s dalšími procesy poškozujícími beton a zahrnuje velké chemické změny v zasaženém betonu, je zahrnována mezi poškozující procesy (Večerník et al., 2016).

V první fázi vývoje úložiště, kdy bude v materiálech přítomen vzdušný CO<sub>2</sub>, může v kombinaci s vlhkostí prostředí ke karbonataci docházet ve větší míře než ve fázích vývoje úložiště, kdy jsou materiály prosyceny podzemní vodou, kdy jsou uhličitany rozpuštěny ve vodě a jejich obsah je určován složením podzemní vody a rovnováze s okolními materiály (hornina, bentonit).

**Vliv na dlouhodobou bezpečnost:**

Betonové/cementové materiály a z nich vytvořené konstrukce nemají dlouhodobou bezpečnostní funkci.

**Dostupná data:**

Data o procesech karbonatace cementových materiálů specifická pro český koncept HÚ nejsou k dispozici. Karbonatace cementových materiálů je/bude studována v projektu TAČR ALMARA (Večerník et al., 2020).

**Nejistoty:**

Není definováno složení cementových materiálů/betonů pro aplikaci v HÚ.

Karbonatace závisí na přítomnosti oxidu uhličitého a chemickém složení podzemní vody a rychlosti její výměny v cementovém materiálu s okolím.

**Reference:**

FERNÁNDEZ BERTOS M., SIMONS S. J. R., HILLS C. D., CAREY P. J. (2004): A review of accelerated carbonation technology in the treatment of cement-based materials and sequestration of CO<sub>2</sub>; J. Hazard Mater. 112(3): 193-205.

ŠAVIJA B., LUKOVIĆ M. (2016): Carbonation of cement paste: Understanding, challenges, and opportunities, Constr. Build. Mater., vol. 117, pp. 285–301.

URAS S., ZOVINI CH., PARATORE A., TITS J., PFINGSTEN W., DÄHN R., MEEUSSEN H., SEETHARAM S. (2021): Deliverable D7.1: State of The Art in packaging, storage, and monitoring of cemented wastes 2021-02-23 version 0.9, PREDIS project – grant agreement No. 945098.

VEČERNÍK P., DRTINOVÁ B., ADAM R., BABOROVÁ L., BRÁZDA L., FILIPSKÁ H., HAVLOVÁ V., KITTNEROVÁ J., KOZEMPEL J., PODOJIL A., VOPÁLKA D., ZAVADILOVÁ A. (2016): Transportní vlastnosti cementových materiálů. TZ 42/2016, SÚRAO, Praha.

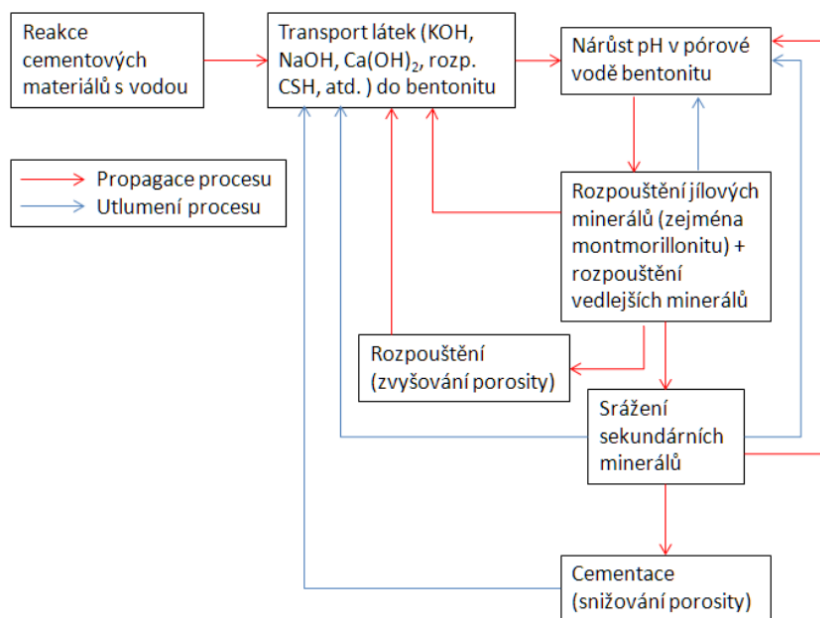
VEČERNÍK P., APARICIO C., DOBREV D., FABIÁN P., GRIČ L., HALODOVÁ P., HAVLOVÁ V., HLAVÁČKOVÁ V., KISELOVÁ M., KOUŘIL M., MENDOZA MIRANDA A., PARMA P., STOULIL J., ŠEVCŮ A. (2020): Projekt ALMARA – State of the art. Příloha 1: Roční zprávy projektu FW01010115 Alternativní materiály pro ukládání radioaktivních odpadů z vyřazování (ALMARA). ÚJV Řež, a.s., 2020

### 7.4.3.3 Změna mineralogie (betonové konstrukce)

**Popis:**

Interakce hydratované cementové fáze s podzemní vodou závisí na jejich vzájemném poměru, porositě, propustnosti a zejména na složení cementu. Cement v čerstvé podzemní vodě podléhá loužení Ca(OH)<sub>2</sub> a rozpuštění CSH fází a tím dochází k degradaci betonu. V salinních vodách je rozpouštění pomalejší. Mezi betonem a podzemní vodou může dojít rovněž k chloridovým interakcím, jež vedou k přeměně hlinitanových fází na jiné komplexy. Při interakcích s bentonitem může docházet ke vzniku sekundárních minerálů a dalším doprovodným jevům, které mohou být ovlivněny rovněž fyzikálními podmínkami, zejména teplotou a pH. V podmínkách vysoce alkalického pH může docházet ke změnám v poměru vápníku a křemíku ve složení C(A)SH fází cementu (Červinka a Vopálka 2015). Procesy přitom nejsou jednosměrné, ale ovlivňují se navzájem (Obr. 23), což je nutno zohlednit např. v geochemickém modelování (Šťástka et al. 2018). Při síranovém působení dochází k reakci

vápenatých iontů a síranových iontů za vzniku ettringitu jako nové minerální fáze. Při karbonataci vznikají minerální fáze uhličitanu vápenatého (kalcit, aragonit). Tvorba uhličitanu vápenatého je také spojena s objemovou roztažností a možným poškozením cementových materiálů (Šavija a Lukovič, 2016). Obecně pak k mineralogickým změnám dochází při interakci/loužení vodou (Ochs et al., 2015).



Obr. 23: Schéma interakce cementových materiálů a bentonitu – změny mineralogických, chemických a fyzikálních vlastností

Změny mineralogie souvisí s rozpouštěním složek cementu/betonu, srážením nových minerálních fází a s průběhem chemických reakcí, k nimž může dojít pouze za přítomnosti vody. K těmto jevům tedy bude docházet až při/po saturaci úložiště vodou. V prvních fázích vývoje úložiště tyto procesy nemohou probíhat. Mohou nastat až v následných fázích vývoje HÚ po nasycení materiálů vodou.

#### Vliv na dlouhodobou bezpečnost:

Betonové/cementové materiály a z nich vytvořené konstrukce nemají dlouhodobou bezpečnostní funkci. Je nutno zmírnit/zabránit transportu radionuklidů případnými preferenčními cestami vzniklými po degradaci těchto prvků.

#### Dostupná data:

Interakce cementových materiálů s vodou a mineralogické změny byly studovány v projektu SÚRAO – Hodnocení bezpečnosti HÚ, Transport 5 (Večerník et al., 2016).

#### Nejistoty:

Není stanovena specifikace složení cementových materiálů/betonů pro aplikaci v HÚ. Z obecných znalostí je možno předpokládat mineralogické složení použitých cementových

materiálů/betonů a jejich následné mineralogické změny. Změny mineralogie závisí na chemickém složení podzemní vody a rychlosti její výměny v cementovém materiálu s okolím.

#### Reference:

ČERVINKA R., VOPÁLKA D. (2015): Transport radionuklidů z úložiště / Vstupní parametry a procesní modely pro hodnocení transportu radionuklidů přes inženýrské bariéry, 1. průběžná zpráva, SÚRAO, Praha.

OCHS M., MALLANTS D., WANG L. (2015): Radionuclide and metal sorption on cement and concrete. Topics in Safety, Risk, Reliability and Quality, no. 29, 1 edn, Springer, Switzerland.

ŠAVIJA B A LUKOVIČ M. (2016): Carbonation of cement paste: Understanding, challenges, and opportunities, Constr. Build. Mater., vol. 117, pp. 285–301.

ŠŤÁSTKA J., SVOBODA J., PACOVSKÁ D., VEČERNÍK P., ČERVINKA R. (2018): Provedení rešerše obdobných experimentů, návrh případných úprav technického provedení. TZ 228/2018, SÚRAO, Praha.

#### 7.4.3.4 Produkty degradace betonu

##### Popis:

Cementové materiály, v závislosti na technologii přípravy, jsou více či méně odolné vůči degradaci. Relativně agresivní vůči nim jsou měkké vody s nízkým obsahem minerálů, uhličitě vody s volným CO<sub>2</sub>, vody s vysokým obsahem chloridů, dusičnanů a síranů a také vody silně kyselé či zásadité. Procesy koroze (degradace) běžného silikátového betonu či malty lze rozdělit do tří skupin (Svoboda et al. 2013):

1) Koroze I. druhu: spočívá ve vyluhování některé složky, nejčastěji hydroxidu vápenatého. V důsledku vyluhování se zvětšují póry a zhoršují se mechanické vlastnosti. Korozi I. druhu způsobují zejména měkké (tzv. hladové) vody.

2) Koroze II. druhu: je vznik rozpustnějších látek z látek méně rozpustných. Tento typ koroze způsobují kyselé vody, které mohou rozpouštět i vápenaté křemičitanu a hlinitanu. Patří sem také přeměna CaCO<sub>3</sub> na rozpustnější vápenaté soli.

3) Koroze III. druhu: je dána rozpínáním vyvolaným krystalizací nebo jiným mechanismem tvorby objemnějších produktů. V pórech a kapilárách potom vzniká vnitřní pnutí vedoucí až ke vzniku trhlin a oslabení struktury materiálu. Sem spadá působení síranových iontů za vzniku již ettringitu. Přeměna z fáze o vysoké hustotě na fázi s nízkou hustotou, ale větším objemem, může způsobovat rozpínání materiálu a jeho praskání. V menším rozsahu působí tento druh koroze i hořečnaté ionty, kdy reakcí s Ca(OH)<sub>2</sub> vzniká objemnější Mg(OH)<sub>2</sub>.

Při rozpouštění portlanditu a dalších vápenatých minerálů dochází v okolí degradovaného cementového materiálu ke vzniku zóny bohaté na vápník, při reakci chloridů s cementovými materiály může dojít ke vzniku chlorohlinitanů nebo Friedelových solí, nebo mohou vstupovat do CSH fází (Rosendorf 2016). Degradacími produkty cementu/betonu jsou tvořeny při degradačních procesech, tj, loužení a srážení minerálních fází, síranovým působením, karbonataci, alkalické reakci kameniva a interakci mezi přítomnou vodou a dalšími materiály



prostředí (Večerník et al., 2016; Šavija a Lukovič, 2016; Ochs et al., 2015). K interakcím a degradaci materiálu může dojít pouze za přítomnosti vody, tudíž k těmto jevům bude docházet až při/po saturaci úložiště vodou.

#### **Vliv na dlouhodobou bezpečnost:**

Betonové/cementové materiály a z nich vytvořené konstrukce nemají dlouhodobou bezpečnostní funkci. Je nutno zohlednit možné negativní interakce produktů degradace betonu s materiály IB, zejména bentonitem.

#### **Dostupná data:**

Interakce cementových materiálů s vodou a jejich mineralogické/materiálové změny byly studovány v projektu SÚRAO – Hodnocení bezpečnosti HÚ, Transport 5 (Večerník et al., 2016).

#### **Nejistoty:**

Není specifikováno složení cementových materiálů/betonů pro aplikaci v HÚ. Z obecných znalostí je možno předpokládat průběh a produkty degradace použitých cementových materiálů/betonů.

#### **Reference:**

OCHS M., MALLANTS D., WANG L. (2015): Radionuclide and metal sorption on cement and concrete. Topics in Safety, Risk, Reliability and Quality, no. 29, 1 edn, Springer, Switzerland.

ŠAVIJA B A LUKOVIČ M. (2016): Carbonation of cement paste: Understanding, challenges, and opportunities, Constr. Build. Mater., vol. 117, pp. 285–301.

SVOBODA L. ET AL. (2013): Stavební hmoty, 3.vydání – elektronické, Praha, 2013, ISBN 978-80-260-4972-2

ROSENDORF T. (2016): Studium difúze radionuklidů kompaktovaným bentonitem ovlivněné jinými bariérovými materiály. Diplomová práce. FJFI ČVUT Praha.

VEČERNÍK P., DRTINOVÁ B., ADAM R., BABOROVÁ L., BRÁZDA L., FILIPSKÁ H., HAVLOVÁ V., KITTNEROVÁ J., KOZEMPEL J., PODOJIL A., VOPÁLKA D., ZAVADILOVÁ A. (2016): Transportní vlastnosti cementových materiálů, TZ 42/2016, SÚRAO, Praha.

### **7.4.3.5 Produkce alkalických roztoků (betonové konstrukce)**

#### **Popis:**

Složení cementové pórové vody závisí na mnoha parametrech, např. na počáteční koncentraci vodné fáze, která je v kontaktu s cementem, na složení cementu nebo na degradaci pevné fáze. V prvních fázích vývoje úložiště je voda v betonových konstrukcích přítomna pouze voda použitá při tvorbě betonové záměsi a z většiny je spotřebována na hydratační procesy, je tedy přítomna v pórech materiálu a ve struktuře materiálu. Teprve při nasycení inženýrských bariér

vodou může dojít k produkci alkalických roztoků loužením cementových materiálů. Během re-saturace se bude cementová pórová voda ekvilibrovat s okolní vodou, finální složení bude dáno obsahem alkálií (KOH, NaOH) a rovnováhou s portlanditem, která povede ke vzniku hyperalkalického systému ( $\text{pH} > 12,5$ ) u běžných betonů/cementových materiálů (Ochs et al., 2015), viz Obr. 22. Při vývoji cementových směsí/betonů se sníženým pH výluhu je cíleno na hodnoty  $\text{pH} < 11,5$  (Kratochvíle et al., 2019; Pernicová et al., 2019).

#### **Vliv na dlouhodobou bezpečnost:**

Alkalické roztoky mohou degradovat inženýrskou bariéru na bázi bentonitu. Degradace a alterace montmorillonitu mohou významně negativně ovlivnit vlastnosti bentonitu důležité pro správnou funkci bentonitové inženýrské bariéry. Pro minimalizaci těchto vlivů jsou vyvíjeny cementové směsi/betony se sníženým pH výluhu.

#### **Dostupná data:**

Interakce cementových materiálů s vodou a chemická charakterizace interagované kapaliny byly studovány v projektu SÚRAO – Hodnocení bezpečnosti HÚ, Transport 5 (Večerník et al., 2016). Stanovení pH výluhů bylo studováno při vývoji low pH betonů (Kratochvíle et al., 2019; Pernicová et al., 2019).

#### **Nejistoty:**

Produkcí alkalických výluhů ovlivní složení cementových materiálů/betonů, složení interagující (podzemní, případně bentonitové) vody a rychlost její výměny v pórovém objemu betonu. Přesné složení cementových materiálů/betonů určených pro aplikaci v HÚ není definováno.

#### **Reference:**

KRATOCHVÍLE L., KOLÍSKO J., DOBIÁŠ D., ČÍTEK D., MANDLÍK T., HURTIG K. (2019): Příprava, složení a vlastnosti malty se sníženým pH (LPM), MS SÚRAO TZ 369/2019, 14 s.

OCHS M., MALLANTS D., WANG L. (2015): Radionuclide and metal sorption on cement and concrete. Topics in Safety, Risk, Reliability and Quality, no. 29, 1 edn, Springer, Switzerland.

PERNICOVÁ R., ČÍTEK D., DOBIÁŠ D., MANDLÍK T., KRATOCHVÍLE L., KOLÍSKO J. (2019): Vývoj betonu se sníženým pH, MS SÚRAO TZ 415/2019, 45 s.

### **7.4.3.6 Koroze kovů (svorník, železobeton)**

#### **Popis:**

Běžný beton/železobeton je vysoce alkalický materiál. Při pH vyšším než 10,5 je na povrchu ocelových výztuží vytvořen film produktů pasivace, který zabraňuje další korozi oceli, ztrátou vyššího pH tak narůstá riziko koroze výztuže. Když je pasivační film porušen, může nastat koroze výztuže (Macháček 2006). Aby korozní reakce mohla probíhat, musí být přítomny voda a kyslík. Rychlá koroze nastane, když se pH (alkalita) betonu sníží, např. karbonatací, sulfatací apod., nebo když se do betonu zavedou agresivní chemikálie, nebo je výztuž tvořena různými

kovy. Další příčinou mohou být bludné proudy a místní koncentrační články dané nerovnoměrným chemickým prostředím (Macháček 2006). Vliv na korozi ocelových prvků (výztuže, svorníků) v cementovém materiálu má také přítomnost a působení chloridových iontů, kdy je porušen pasivující film na jejich povrchu. Překročením kritické koncentrace při daném pH a daném potenciálu dochází k lokálnímu porušení pasivní vrstvy a iniciaci bodové koroze. Bennett a Gens (2008) uvádějí hraniční hodnotou obsahu chloridů v alkalickém prostředí pro koncentrace 500 mg/l elektrolytu, což samozřejmě závisí na teplotě a oxidační schopnosti prostředí. Filmy na pasivované výztuži jsou díky působení chloridových iontů rychle porušovány a vzniká důlková koroze a koroze na malých ploškách oceli vystavených působení chloridů. V tomto případě se chloridové ionty neúčastní korozní reakce, ale narušují pasivační vrstvu, která chrání ocel, a urychlují tak korozi. Chloridové ionty ale také interagují se železem za vzniku  $\text{FeCl}_3$ , který je nestabilní a vede ke vzniku expanzivního produktu  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  (Fuller et al., 2019). Korozní procesy v alkalickém prostředí jsou popsány ve zprávě Večerník et al. (2020).

K výrazné korozi ocelových prvků v betonu tedy může dojít v kombinaci přítomnosti vody a kyslíku a v prostředí s pH menším než 10,5. V prvních fázích vývoje úložiště (aerobní prostředí, bez přítomnosti vody) nebude splněna podmínka přítomnosti vody mimo přirozené vlhkosti a nízkého pH cementového prostředí. V dalších fázích vývoje HÚ již bude systém anaerobní a nasycený vodou, bude tedy záležet na době, kdy dojde k degradaci cementových fází a poklesu pH. Poté již budou korozní procesy probíhat za podmínek blízkých bentonitovému prostředí. Laboratorní studium korozních dějů v prostředí bentonitu a cementu je popsáno v technické zprávě SÚRAO 406/2019 (Dobrev et al., 2019).

#### **Vliv na dlouhodobou bezpečnost:**

Betonové/cementové materiály (železobeton) a z nich vytvořené konstrukce obsahující kovové prvky nemají dlouhodobou bezpečnostní funkci, obdobně jako další ocelové konstrukční prvky.

Ovlivnění ostatních inženýrských bariér degradací/korozí ocelových konstrukčních materiálů bude, s ohledem na jejich malé množství, pravděpodobně málo významné.

#### **Dostupná data:**

Laboratorní studium korozních dějů v prostředí bentonitu a cementu je popsáno v technické zprávě SÚRAO 406/2019 (Dobrev et al., 2019). Korozní procesy v alkalickém prostředí jsou studovány v projektu ALMARA Večerník et al. (2020), výsledky zatím, s ohledem na počáteční fáze projektu, nejsou dostupné.

#### **Nejistoty:**

Nejistotou je užití (zda a v jakém množství) budou používány železobeton, případně další ocelové konstrukční prvky.

Nejistoty v případě koroze kovových materiálů jsou ve vývoji prostředí úložiště, resp. cementových materiálů, tj. kdy dojde k poklesu pH a tím k porušení pasivní vrstvy na ocelových prvcích.

**Reference:**

- BENNETT D.G. A GENS, R. (2008): Overview of European concepts for high-level waste and spent fuel disposal with special reference waste container corrosion, *Journal of Nuclear Materials* 379: 1–8.
- DOBREV D., KOUŘIL M., MENDOZA MIRANDA A. N. (2019): Korozní zkouška v alkalickém prostředí, TZ406/2019 SÚRAO.
- FULLER A., NEALL F., FERREIRA M., KUOSA H., HAYES M., RASBURN J. (2019): Review of the Durability of Concretes for ILW Containers and HLW/SF Buffers; *Radioactive Waste Management, RWM/Contr/19/007/2*.
- MACHÁČEK T. (2006): Korozní železobetonových konstrukcí a způsob jejich ochrany, *Silnice Železnice číslo 1/2006*.
- VEČERNÍK P., APARICIO C., DOBREV D., FABIÁN P., GRIČ L., HALODOVÁ P., HAVLOVÁ V., HLAVÁČKOVÁ V., KISELOVÁ M., KOUŘIL M., MENDOZA MIRANDA A., PARMA P., STOULIL J., ŠEVCŮ A. (2020): Projekt ALMARA – State of the art. Příloha 1: Roční zprávy projektu FW01010115 Alternativní materiály pro ukládání radioaktivních odpadů z vyřazování (ALMARA); ÚJV Řež, a. s.

**7.4.3.7 Korozní kovů – pevné korozní produkty (svorník, železobeton)****Popis:**

Ke korozi ocelových prvků v betonu, tj. ocelové výztuže v železobetonu nebo ocelových svorníků a kotev fixovaných cementovými pojivy, může dojít v kombinaci přítomnosti vody a kyslíku a v prostředí s pH menším než 10,5. V prvních fázích vývoje úložiště (aerobní prostředí, bez přítomnosti vody) nebude splněna podmínka přítomnosti vody mimo přirozené vlhkosti a nízkého pH degradovaného cementového prostředí. V dalších fázích vývoje HÚ již bude systém anaerobní a nasycený vodou, bude tedy záležet na době, kdy dojde k degradaci cementových fází a poklesu pH. Poté již budou korozní procesy probíhat za podmínek blízkých bentonitovému prostředí. Laboratorní studium korozních dějů v prostředí bentonitu a cementu je popsáno v technické zprávě SÚRAO 406/2019 (Dobrev et al., 2019). Vznik korozních produktů bude záviset na charakteru okolního prostředí. Korozními produkty mohou být klasické rzi (oxo-hydroxidy železa), hematit atd., vznikat mohou i křemičitanové korozní produkty (Dobrev et al. 2020). Korozní procesy jsou studovány zejména v bentonitu v souvislosti s korozními procesy UOS.

**Vliv na dlouhodobou bezpečnost:**

Betonové/cementové materiály (železobeton) a z nich vytvořené konstrukce obsahující kovové prvky nemají dlouhodobou bezpečnostní funkci, obdobně jako další ocelové konstrukční prvky.

Ovlivnění ostatních inženýrských bariér degradací/korozí ocelových konstrukčních materiálů bude, s ohledem na jejich malé množství, pravděpodobně málo významné.

**Dostupná data:**

Nebyl prováděn specifický výzkum koroze kovových materiálů v cementovém prostředí pro český koncept HÚ. Korozní produkty lze odhadovat na základě výzkumu koroze materiálů v betonu.

**Nejistoty:**

Nejistotou je užití (zda a v jakém množství) budou používány železobeton, případně další ocelové konstrukční prvky.

Nejistoty v případě koroze kovových materiálů jsou ve vývoji prostředí úložiště, resp. cementových materiálů, tj. kdy dojde k poklesu pH a tím k porušení pasivní vrstvy na ocelových prvcích.

**Reference:**

DOBREV D., KOUŘIL M., MENDOZA MIRANDA A. N. (2019): Korozní zkouška v alkalickém prostředí, TZ406/2019 SÚRAO.

DOBREV D., GONDOLLI J., KOUŘIL M., MENDOZA MIRANDA A.N., STOULIL J. STRAKA M. (2020): Korozní zkoušky s materiály navrženými pro konstrukci ukládacích obalových souborů, SÚRAO TZ 248/2018 Rev. č. 1

### 7.4.3.8 Koroze kovů – produkce plynů (svorník, železobeton)

**Popis:**

Při korozi kovových materiálů může dojít i k produkci plyných produktů. Za předpokladu, že v průběhu vývoje prostředí bude koroze probíhat za anaerobních podmínek, bude vznikat i vodík. Ke korozním procesům bude docházet zejména po degradaci cementových materiálů a při kontaktu s bentonitovou bariérou. Vzhledem k předpokládaným korozním rychlostem by vývoj vodíku měl být relativně minimální (Pellegrini et al. 2013).

**Vliv na dlouhodobou bezpečnost:**

Železobeton a konstrukce obsahující kovové prvky nemají dlouhodobou bezpečnostní funkci.

Ovlivnění ostatních inženýrských bariér degradací/korozí ocelových konstrukčních materiálů a možnou produkcí plynů bude, s ohledem na jejich malé množství, pravděpodobně málo významné.

**Dostupná data:**

Nebyl prováděn specifický výzkum koroze kovových materiálů v cementovém prostředí pro český koncept HÚ. Korozní procesy a možný vývoj plynů lze odhadovat na základě výzkumu koroze kovových materiálů v betonu.

**Nejistoty:**

Nejistotou je užití (zda a v jakém množství) budou používány železobeton, případně další ocelové konstrukční prvky.

Nejistoty v případě koroze kovových materiálů a produkce plynů jsou ve vývoji prostředí úložiště, resp. cementových materiálů.

**Reference:**

PELLEGRINI D., DOBREV D. STAMMOSE D., VOKÁL V. (2013): FORGE Work Package 2 Final Report – Experimental Studies on Hydrogen Generation by Corrosion, EC FORGE Project, Report D2.5-R

**7.4.3.9 Degradace injektáží****Popis:**

Degradace injektáčních hmot na bázi cementových materiálů bude probíhat obdobnými ději a procesy jako degradace cementových konstrukčních materiálů. Popis viz 7.4.3, 7.4.3.1 až 7.4.3.5.

Použití injektážních hmot na bázi organických látek (např. polyuretany, akraláty apod.) se v HÚ předpokládá omezit na co nejmenší míru. Jejich degradace a interakce s ostatními materiály bariér nebyly pro český koncept výrazně studovány. Krátkodobá odolnost injektážních hmot používaných při instalaci zátky EPSP v projektu DOPAS je popsána ve zprávě Večerník et al., 2016.

**Vliv na dlouhodobou bezpečnost:**

Injektážní hmoty nemají dlouhodobou bezpečnostní funkci. Jejich degradační produkty mohou potenciálně ovlivnit vlastnosti bentonitové bariéry. Velký vliv tohoto ovlivnění se nepředpokládá.

**Dostupná data:**

Nebyl prováděn specifický výzkum degradace injektáží v cementovém prostředí pro český koncept HÚ. Pilotní testy odolnosti injektáží byly provedeny v projektu DOPAS (ve zprávě Večerník et al., 2016).

**Nejistoty:**

Nejistotou je přesná definice a složení injektážních hmot pro použití pro aplikace v HÚ.

**Reference:**

VEČERNÍK P., TRPKOŠOVÁ D., GONDOLLI J., KOLOMÁ K., BRÁZDA L., HAVLOVÁ V. (2016): Odborná podpora při provedení a vyhodnocení experimentu EPSP v rámci projektu DOPAS – Závěrečná zpráva, TZ 64/2016, SÚRAO

### 7.4.3.10 Produkty degradace injektáží

#### Popis:

Degrace cementových injektáží bude probíhat obdobnými procesy jako u jiných cementových materiálů, popis viz 7.4.3, 7.4.3.1 až 7.4.3.5. Degradace injektážních hmot založených na organických materiálech nebyly pro český koncept výrazně studovány. Krátkodobá odolnost injektážních hmot používaných při instalaci zátky EPSP v projektu DOPAS je popsána ve zprávě Večerník et al., 2016, testy však nebyly zaměřeny na chemickou analýzu možných degradačních produktů.

#### Vliv na dlouhodobou bezpečnost:

Injektážní hmoty nemají dlouhodobou bezpečnostní funkci. Jejich degradační produkty mohou potenciálně ovlivnit vlastnosti bentonitové bariéry. Velký vliv tohoto ovlivnění se nepředpokládá.

#### Dostupná data:

Nebyl prováděn specifický výzkum degradace injektáží v cementovém prostředí pro český koncept HÚ. Pilotní testy odolnosti injektáží byly provedeny v projektu DOPAS (ve zprávě Večerník et al., 2016), testy však nebyly zaměřeny na chemickou analýzu možných degradačních produktů.

#### Nejistoty:

Nejistotou je přesná definice a složení injektážních hmot pro použití pro aplikace v HÚ.

#### Reference:

VEČERNÍK P., TRPKOŠOVÁ D., GONDOLLI J., KOLOMÁK K., BRÁZDA L., HAVLOVÁ V. (2016): Odborná podpora při provedení a vyhodnocení experimentu EPSP v rámci projektu DOPAS – Závěrečná zpráva, TZ 64/2016, SÚRAO

## 7.4.4 Změna fyzikálních vlastností (betonové konstrukce)

#### Popis:

Konstrukční prvky úložiště na bázi betonu či železobetonu, a také ocelové konstrukční prvky vykazují se změnou teploty teplotní roztažnost. Beton se vzrůstající teplotou zvětšuje svůj objem, a naopak s klesající teplotou zmenšuje svůj objem (Svoboda et al., 2013). Tepelné vlivy se mohou projevit při aplikaci betonu při hydrataci a tvrdnutí cementu/betonu. Působení tepelných vlivů bude probíhat zejména v provozní fázi a musí být ošetřeno technologickým postupem betonáže. Z dlouhodobého hlediska se může projevat změna teploty v celém systému HÚ, kdy v počátečních fázích vývoje úložiště lze očekávat výrazně vyšší teplotu prostředí než ve vzdáleném časové období. Otázkou je, zda však v mezidobí nedojde k degradaci betonových a ocelových prvků.

Společně s chemickými a mineralogickými změnami cementových materiálů bude měnit i pevnost, pružnost a propustnost. Charakteristiky sítě pórů, rozměry a konektivita mezi póry určují přenos látek uvnitř matrice, tedy i propustnost materiálu. Při zmenšení velikosti pórů, a tedy i pórové sítě, což vede ke snížení propustnosti.

Při karbonataci dochází i ke změnám ve strukturních a mechanických vlastnostech. Samotná karbonatace není pro beton příliš škodlivá, ve skutečnosti je pevnost v tlaku karbonatovaného betonu vyšší než u betonu, u kterého nedošlo ke karbonataci (Večerník et al., 2020).

Dalším měnícím se parametrem bude porozita cementových materiálů, která bude souviset s interakcí a degradací cementových materiálů. Viz FEP Změna obsahu, distribuce pórů.

#### **Vliv na dlouhodobou bezpečnost:**

Betonové/cementové materiály a z nich vytvořené konstrukce nemají dlouhodobou bezpečnostní funkci. Změny fyzikálních vlastností tak nemají vliv na dlouhodobou bezpečnost.

#### **Dostupná data:**

Nebyl prováděn specifický výzkum změn fyzikálních vlastností pro betonové konstrukce pro český koncept HÚ. Materiálové změny cementových materiálů budou studovány v projektu TAČR ALMARA (Večerník et al., 2020).

#### **Nejistoty:**

Není definováno přesné složení cementových materiálů/betonů pro aplikaci v HÚ ani požadavky na vlastnosti, které by tyto materiály měly splnit. Z obecných znalostí je možno předpokládat hodnoty a vývoj fyzikálních vlastností materiálů.

#### **Reference:**

SVOBODA L. ET AL. (2013): Stavební hmoty, 3.vydání – elektronické, Praha, 2013, ISBN 978-80-260-4972-2

VEČERNÍK P., APARICIO C., DOBREV D., FABIÁN P., GRIČ L., HALODOVÁ P., HAVLOVÁ V., HLAVÁČKOVÁ V., KISELOVÁ M., KOUŘIL M., MENDOZA MIRANDA A., PARMA P., STOULIL J., ŠEVCŮ A. (2020): Projekt ALMARA – State of the art. Příloha 1 Roční zprávy projektu FW01010115 Alternativní materiály pro ukládání radioaktivních odpadů z vyřazování (ALMARA); ÚJV Řež, a. s.

### **7.4.4.1 Změna obsahu, distribuce pórů (betonové konstrukce)**

#### **Popis:**

Ve vyztuženém cementovém materiálu je obtížné jednoduše vysvětlit a kvantifikovat složitou porézni mikrostrukturu. V čistých betonech z portlandského cementu k celkovému pórovému objemu přispívají dva typy porozity. Izolované póry jsou kompletně uzavřeny produkty hydratace betonu, a tak materiálový přenos do a z póru je velmi omezen. Spojitá porozita je taková, skrze kterou existuje cesta mezi dvěma oblastmi materiálu (Večerník et al., 2016). Takový pórový prostor v cementovém materiálu lze obecně rozdělit do dvou skupin, podle velikosti pórů (Thomas, 2008), a to na: 1) Kapilární póry, o velikosti 10  $\mu\text{m}$  až 10 nm, 2) Gelové póry, o velikosti 10 nm až 0,5 nm. Tyto póry se nazývají gelové, protože jsou součástí gelové struktury C-S-H skupin, tedy CaO-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O systémů.



V důsledků chemických interakcí, kdy dochází k tvorbě nových minerálních fází (např. u karbonátce) či fází s větším objemem dochází ke zmenšení velikosti pórů, a tedy i pórové sítě, což vede ke snížení propustnosti (Večerník et al., 2016).

V prvních fázích vývoje úložiště procesy ovlivňující pórový systém (rozpuštění, srážení, vznik nových fází) nemohou probíhat. Tyto děje mohou nastat až po nasycení materiálů vodou. Změny porozity tedy závisí na interakci podzemní vody s materiálem (cement/beton) a jejich degradací chemickými procesy.

#### **Vliv na dlouhodobou bezpečnost:**

Betonové/cementové materiály a z nich vytvořené konstrukce nemají dlouhodobou bezpečnostní funkci. Změny porozity a pórového systému tak nemají vliv na dlouhodobou bezpečnost. Obecně ale budou ovlivňovat transport látek a vody přes cementové a betonové materiály.

#### **Dostupná data:**

Nebyl prováděn specifický výzkum změn porozity cementových materiálů a betonů pro český koncept HÚ. Materiálové změny cementových materiálů budou studovány v projektu TAČR ALMARA (Večerník et al., 2020).

#### **Nejistoty:**

Není definováno přesné složení cementových materiálů/betonů pro aplikaci v HÚ ani požadavky na vlastnosti, které by tyto materiály měly splnit. Z obecných znalostí je možno předpokládat hodnoty a vývoj fyzikálních vlastností materiálů.

#### **Reference:**

THOMAS J. H. (2008): The science of concrete [online]. <http://iti.northwestern.edu/cement/>

VEČERNÍK P., DRTINOVÁ B., ADAM R., BABOROVÁ L., BRÁZDA L., FILIPSKÁ H., HAVLOVÁ V., KITTNEROVÁ J., KOZEMPEL J., PODOJIL A., VOPÁLKA D., ZAVADILOVÁ A. (2016): Transportní vlastnosti cementových materiálů, TZ 42/2016, SÚRAO, Praha.

VEČERNÍK P., APARICIO C., DOBREV D., FABIÁN P., GRIČ L., HALODOVÁ P., HAVLOVÁ V., HLAVÁČKOVÁ V., KISELOVÁ M., KOUŘIL M., MENDOZA MIRANDA A., PARMA P., STOULIL J., ŠEVCŮ A. (2020): Projekt ALMARA – State of the art. Příloha 1 Roční zpráva projektu FW01010115 Alternativní materiály pro ukládání radioaktivních odpadů z vyřazování (ALMARA); ÚJV Řež, a. s.

## **7.5 Mikrobiální procesy**

#### **Popis:**

Do těchto procesů se počítají nejen biologické/biochemické procesy, které ovlivňují tlumící a výplňový materiál, ale i celkový biologický/biochemický vývoj úložiště (pH, Eh, vývoj plynu apod.). Jde o biologické procesy ovlivňující úložiště, jako jsou např. degradace organických látek, ovlivnění cyklu dusičnanových a síranových iontů, růst biofilmu a vznik a únik plynů.

Mikrobiálně/biologicky zprostředkované procesy mohou vést k vývoji chemických gradientů v materiálech úložišť. Mikrobiálně/biologicky zprostředkované procesy mohou mít vliv na migraci radionuklidů a jiných kontaminantů, a to možným ovlivněním charakteristik transportních cest a/nebo sil, které pohánějí advekci tekutiny a/nebo difúzi rozpuštěných látek a plynů.

Mikrobiální aktivita má potenciál měnit fyzikální a (geo)chemické podmínky prostředí. V HÚ mohou být obsaženy i různé organické sloučeniny, které jsou náchylné ke změnám. Samotné organické sloučeniny mohou být náchylné k mikrobiální degradaci. Ještě důležitější je, že chemické a radiolytické degradační procesy povedou k tvorbě organických degradačních produktů s krátkým řetězcem a tvorbě vodíku. Ty mohou být zase použity jako donory elektronů ke stimulaci mikrobiální aktivity s akceptory elektronů přítomnými v pórových vodách hostitelských formací nebo v odpadu.

Vliv mikrobiálně/biologicky zprostředkovaných procesů na chemické podmínky v úložišti (např. Eh, pH, obsah rozpuštěného anorganického uhlíku) může ovlivnit rozdělování radionuklidů a dalších kontaminantů mezi různé imobilní pevné fáze a potenciálně mobilní tekuté fáze. Tento vliv zase může ovlivnit zpomalení migrace radionuklidů a jiných kontaminantů

Nejrizikovější skupiny mikroorganismů představují síran-redukující bakterie (SRB) z důvodu mikrobiálně indukované koroze (MIC), železo-redukující bakterie (IRB) z důvodu MIC a destabilizace montmorillonitu a mangan-redukující bakterie z důvodu MIC. Acetogenní a metanogenní bakterie jsou dalšími potenciálně nebezpečnými skupinami, které produkují látky (konkrétně metan a acetát), které mohou sloužit jako donory elektronů pro SRB a IRB. Obecně pro mikroorganismy platí, že jejich metabolická aktivita vede k produkci plynů a následným změnám tlaků.

#### **Vliv na dlouhodobou bezpečnost:**

Přítomnost, a především metabolická aktivita mikroorganismů může výrazně narušit funkčnost IB, v návaznosti na předešlé části byly uvažovány: vnější materiál UOS VJP, bentonitová bariéra, betonové konstrukční prvky a betonkontejnery sekce VAO.

#### **Dostupná data:**

Mikrobiální procesy (koroze) se v minulosti zabýval v rámci EU MIND (<https://mind15.eu/>), projekt Mikrobiální koroze v rámci projektu Výzkumná podpora bezpečnostní hodnocení HÚ (Černík et al. 2019) a v současné době projektu TAČR BIOBEN.

Hodnocení významnosti mikroorganismů pro hodnocení bezpečnosti je uvedeno ve zprávě Havlová et al. (2018).

#### **Nejistoty:**

Vzhledem k nedostatku či přímo absenci přímých informací o mikrobiální aktivitě je však třeba při posuzování ovlivnění inženýrských bariér HÚ uvažovat především ukazatele nepřímé. Tyto nepřímé indikátory vycházejí zejména z geochemických parametrů horninového prostředí a chemického složení podzemní vody, jakožto hlavních určujících faktorů podmiňujících případnou mikrobiální aktivitu. Nepřímé ukazatele lze považovat za vhodnější při posuzování slučitelnosti s inženýrskými bariérami i z důvodu vysoké dynamičnosti mikrobiálních společenstev, protože se při změně podmínek složení mikrobiální komunity mění v řádu dnů.

**Reference:**

ČERNÁ K., HOFMANOVÁ E., HLAVÁČKOVÁ V., BARTAK S. D., ŘÍHA J., DOBREV D., KAŠPAR V., ŠACHLOVÁ Š., VEČERNÍK P., ZUNA M. (2021): BioBen – ODBORNÁ zpráva za rok 2021, TAČR TK02010169

ČERNÍK M., STEINOVÁ J., MIKEŠ J., ŠPAČEK P., DOBREV D., ČERNOUŠEK T., STOULIL J. (2019): Mikrobiální koroze za podmínek hlubinného úložiště pro koncepci ocelový UOS – zhutněný bentonit. – MS SÚRAO ZZ 403/2019, 81 str.

HAVLOVÁ V., PERTOLDOVÁ J., BUKOVSKÁ Z., MIXA P., MILICKÝ M., ŘÍHA J., HROCH T., ŠTĚDRÁ V., ČERVINKA R. (2018a): Hierarchie kritérií či indikátorů vhodnosti lokalit a způsob hodnocení lokalit. – MS SÚRAO TZ 285/2018, Praha.

## 7.6 Radiační procesy

**Popis:**

Radiační stabilita anorganických látek je obecně velmi vysoká. Nepředpokládáme, že by ionizující záření přímo ovlivnilo vlastnosti bentonitu či jiných výplňových materiálů, nebo indukovalo jejich chemické změny. Ovlivnění bude dáno spíše radiolýzou plynů a párového roztoku.

Např. v práci Chenga et al. (2022) byl bentonit ozařován  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -paprsky v dávkovém příkonu 10 kGy/h pro dosažení dávek ozáření 1, 2, 3 MGy a byl charakterizován tak, aby vyhodnotil jeho stabilitu před a po ozáření a pochopil mechanismus poškození zářením. Struktura bentonitu byla mírně ovlivněna vysokými dávkami ozáření a adsorpční kapacita U(VI) ozářeného bentonitu byla snížena oproti surovému bentonitu.

Informace o žádné podobné studii v ČR jsme nenašli. V práci Havlová et al. (2018) a Šuhájek et al. (2022) bylo ozařováno více než 50 sorbentů včetně B75 a Sabenilu. Žádné významné změny vlastností sorbentů nebyly pozorovány.

Změny v systému v tomto případě budou dány interakcí primárních produktů radiolýzy vody s ostatními složkami systému. Pro koncentrované roztoky ( $c > 1 \text{ mol.l}^{-1}$ ) nabývá na významu i přímá interakce ionizujícího záření s rozpuštěnými ionty.

Vliv produktů radiolýzy vody na bentonit by mohl být dvojitý. Za prvé by mohlo docházet k přímým reakcím mezi produkty radiolýzy vody a bentonitem. Např. pokud bude bentonit obsahovat pyrit, může docházet k jeho oxidaci (Lefticariu et al., 2010) produkty radiolýzy vody. Za druhé by bentonit mohl být ovlivněn produkty interakce rozpuštěných složek s produkty radiolýzy vody v systému (např. interakce bentonitu s radiolyticky oxidovanými korozními produkty). Jak již bylo řečeno výše, k přímému ovlivnění vlastností bentonitu vlivem IZ by nemělo dojít vzhledem k vysoké radiační stabilitě anorganických látek (Dobrev et al. 2015).

**Vliv na dlouhodobou bezpečnost:**

Vliv na korozi UOS, případně oxidaci složek bentonitu (viz 7.4.1.5, 7.4.1.6)

**Dostupná data:**

Materiály pro české prostředí jsou omezené. Havlová et al. (2018) a Šuhájek et al. (2022) sledovali změny sorpčních vlastností pro výběr sorbentů pro použití pro těžké havárie jaderných elektráren.

Pro řádný rozbor probíhajících reakcí v systému a jejich vzájemné ovlivnění by bylo nutné provést numerické modelování tohoto systému, který je navíc vícefázový a otevřený. Tvorba takového modelu a jeho verifikace však přesahuje rámec tohoto projektu.

**Nejistoty:**

Pro řádný rozbor probíhajících reakcí v systému a jejich vzájemné ovlivnění by bylo nutné provést numerické modelování tohoto systému, který je navíc vícefázový a otevřený. Tvorba takového modelu a jeho verifikace však přesahuje rámec tohoto projektu.

**Reference:**

- DOBREV D., GONDOLLI J., KÁRNÍK D., KOUŘIL M., STOULIL J., KOTNOUR P., MULLER J., LOVECKÝ M., ŠIK J., MACÁK P., MATAL O., ČERMÁK J., KRÁL L. (2015): Výzkum a vývoj ukládacího obalového souboru pro hlubinné ukládání vyhořelého jaderného paliva do stádia realizace vzorku. 1. Průběžná zpráva. Zpráva ŠJs, a.s. Ae15534/dok Rev. 1. Orlík, 2015.
- HAVLOVÁ V., SZATMÁRY L., KŮS P., SKALA M., PARMA P. (2018): Výběr sorbentů pro experimentální studium nakládání s kapalnými radioaktivními odpady, vzniklými po těžké havárii JE, ÚJV 14768; 2018
- CHENG, J., GU, R., HE, P. ET AL. (2022): Effect of high-dose  $\gamma$ -ray irradiation on the structural stability and U(VI) adsorption ability of bentonite. *J Radioanal Nucl Chem* 331, 339–352 (2022). <https://doi.org/10.1007/s10967-021-08117-9>
- LEFTICARIU L., PRATT L. A., LAVERNE J. A., SCHIMMELMANN A. (2010): Anoxic pyrite oxidation by water radiolysis products – A potential source of biosustaining energy. *Earth and Planetary Science Letters* 292, 57-67
- ŠUHÁJEK M., SZATMÁRY L., HAVLOVÁ V., SKALA M., KŮS P., MRKVA L., PALUŠÁK M. (2022): Sorpční modul pro likvidaci těžké havárie jaderné elektrárny (SevAcc). Závěrečná zpráva projektu MPO TREND V20214. ÚJV Řež, a.s. ÚJV-14933, Řež.

## 7.7 Transportní procesy

**Popis:**

Obecně je transport látky popisován tzv. advektivně-disperzní rovnicí (při zanedbané interakci látky s okolním prostředím; Savage, 1995):

$$\frac{\partial(\varepsilon c)}{\partial t} = \nabla(D\nabla c - cv)$$

kde je  $\varepsilon$  porozita,  $c$  koncentrace látky v roztoku (mol),  $v$  Darcyho rychlost pro proudění roztoku (m/S),  $D$  disperzní koeficient ve formě tenzoru, který je obvykle definován jako

$$D = D_T I + (D_L - D_T) \frac{|vv^T|}{|v|^2}$$

kde I identita,  $D_L$  podélná (longitudální) složka disperzního koeficientu  $D$  působící ve směru  $q$  ( $m_2.s^{-1}$ ),  $D_T$  příčná (transversální) složka působící ve všech směrech kolmých ke  $q$

Při předpokladu migrace látek materiálu IB je možno předpokládat, že hlavním transportním mechanismem bude difúze (popsána ve FEP 7.7.2.1). V případě degradovaného cementu bude hlavním transportním mechanismem advekce (7.7.2.2).

### **Vliv na dlouhodobou bezpečnost:**

Jednou z klíčových funkcí IB je zpomalit transport radionuklidů do horninového prostředí. Zejména dlouhodobé sorbující radionuklidy jako jsou plutonium, neptunium či izotopy uranu jsou významně zadrženy bentonitem po jejich uvolnění z UOS. Bentonit může významně ovlivnit i rychlost transportu nesorbujících radionuklidů jako je I-129 či Cl-36 tím, že transport těchto radionuklidů může probíhat pouze difúzí.

Vliv na dlouhodobou bezpečnost je zásadní. Způsob transportu, jeho rychlost a míra retence či zpomalení v daném materiálu hraje klíčovou roli pro výslednou efektivní dávku v biosféře.

### **Dostupná data:**

Transportem radionuklidů v prostředí inženýrských bariér v českém prostředí se zabývala celá řada prací – Vokál et al. (2001-2003); Vokál et al. (2008); Trpková et al. (2013); Hofmanová et al. (2019), Večerník et al. (2019).

### **Nejistoty:**

Popis transportu radionuklidů je zatížen celou řadou nejistot, a to

- jsou vlastnosti, kterými popisujeme chování IB, významné pro transport, skutečně reprezentativní?
- jsou vlastnosti, kterými popisujeme chování UIB, významné pro transport, skutečně reprezentativní pro celý objem IB?
- jsou předpoklady dlouhodobého vývoje vlastností, významných pro transport, správné?
- jsou principy, kterými popisujeme transportní procesy, skutečně všeobecně správné?

### **Reference**

VOKÁL A. (2001–2003): Zavedení metod hodnocení inženýrských bariér, (arch. č. SÚRAO 1/01, 32/01, 7/02, 8/02, 2/03, 4/03, 5/03, 23/02, 25/03, 33/03, 35/03)

VOKÁL A. ET AL. (2008): Výzkum procesů pole blízkých interakcí hlubinného úložiště VJP a vysoce aktivních odpadů, 2006 - 2008, (arch. č. SÚRAO 18/08, 21/07, 32/06)

HOFMANOVÁ E., ČERVINKA R., VOPÁLKA D., BABOROVÁ L., BRÁZDA L., PECKOVÁ A., VETEŠNÍK A., VIGLAŠOVÁ E., VAŠIČEK R. (2019): Transport radionuklidů z úložiště / vstupní parametry a

procesní modely pro hodnocení transportu radionuklidů přes inženýrské bariéry: Závěrečná zpráva. – MS SÚRAO, ZZ 420/2019, Praha.

TRPKOŠOVÁ D., DOBREV D., GONDOLLI J., HAVLOVÁ V., HOKR M., MARKOVÁ L., VAŠÍČEK R. (2013): Metodiky celkového posouzení bezpečnosti hlubinného úložiště. Závěrečná zpráva projektu FR-TI1/362, Zpráva ÚJV č. 14281, 2013, 151 str.

VEČERNÍK P., DRTINOVÁ B., BARTA, J., BRÁZDA L., GALEKOVÁ E., HAVLOVÁ V., HOFMANOVÁ E., KAŠPAR V., KITTNEROVÁ J., KOLOMÁ K., ROSENDORF, T., VOPÁLKA D. (2019c): Transportní vlastnosti cementových materiálů – závěrečná zpráva. – MS SÚRAO, TZ 430/2019.

SAVAGE, D. ED. (1995): The Scientific and Regulatory Basis for the Geological Disposal of Radioactive Waste. J. Wiley & Sons, Chichester, UK.

### 7.7.1 Změna speciace radionuklidu v pórové vodě

Složení pórové vody je věnován FEP 6.3.5.2.

Speciace obvykle označuje postup který má za cíl rozlišení, případně stanovení jednotlivých forem prvku ve studovaném vzorku, v tomto případě pórové vodě.

Rozlišované formy prvku mohou být různá chemická individua (např. ionty v různých oxidačních stupních, komplexy, organoprvkové a organokovové sloučeniny atd.), případně mohou být definovány vazbou na jednotlivé fáze vzorku, subsystemy, skupiny sloučenin (např. bílkoviny, polysacharidy apod.) nebo na biologické struktury. Někdy se formy odlišují a definují na základě rozdílných fyzikálně-chemických vlastností jako je rozpustnost a extrahovatelnost různými rozpouštědly nebo afinita k chemicky modifikovaným fázím nebo různá reaktivita těchto forem se selektivními činidly (Koplík et al 1996).

Koncentrace daného radionuklidu v pórové vodě může dosáhnout hodnoty odpovídající stavu nasycení vůči určitému minerálu, který se následně začne srážet a tím bude daný radionuklid imobilizovat ve své chemické struktuře. Stav nasycení tedy odpovídá nejvyšší dosažitelné koncentraci (limitní rozpustnosti) daného radionuklidu a lze jej za daných podmínek (teplota systému, pH,  $E_h$  a složení podzemní vody) výpočetně určit pomocí nástrojů rovnovážné termodynamiky (Duro et al. 2006; Vaitkevičiene et al. 2009).

Speciace radionuklidu ovlivňuje jeho chování v dané prostředí, např. distribuci mezi pevnou a kapalnou fází, transportní mobilitu či procesy, jako je srážení či rozpouštění.

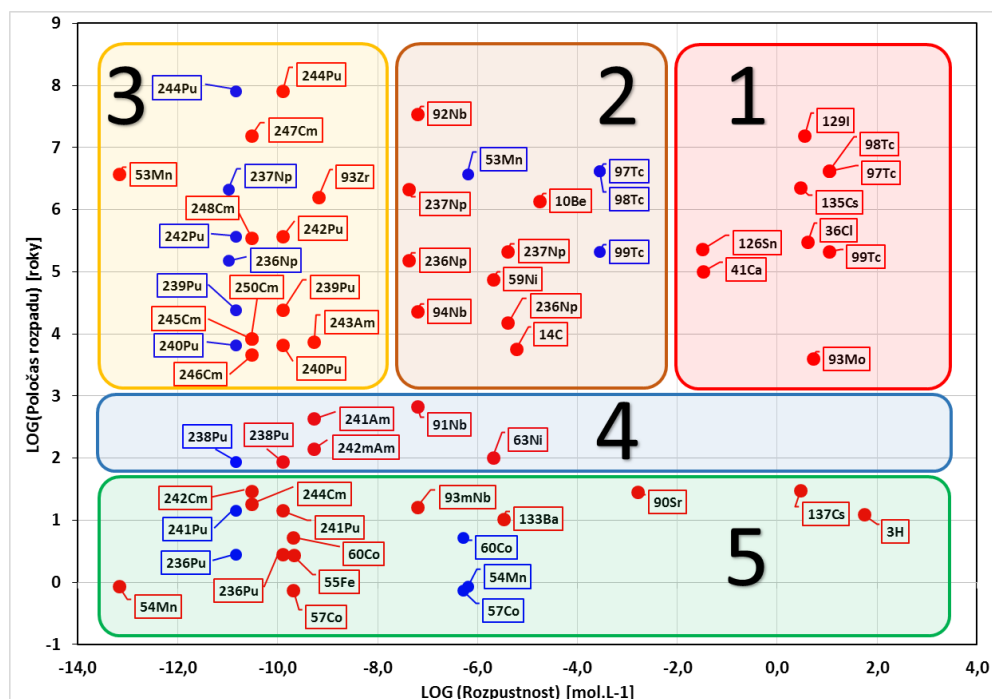
Při změně chemismu pórové vody, která je ovlivněna buď změnami pevné fáze (minerální změny) nebo přítokem vody o jiném složení pak dochází ke změnám ve formě radionuklidu v pórové vodě a změně chování.

#### **Vliv na dlouhodobou bezpečnost:**

Speciace radionuklidů v roztoku významně ovlivňuje jeho chování a mobilitu, a to především distribuci mezi pevnou a kapalnou fází, transportní mobilitu či procesy jako je srážení či rozpouštění. Významným způsobem tak může ovlivnit jeho zpomalení v procesu transportu směrem k horninovému prostředí.

**Dostupná data:**

Stanovení speciace radionuklidů v cementové pórové vodě je popsána v pracích Čubová et al (2017) – viz Obr. 24, pro horninové prostředí Havlová et al. (2015) a Červinka et al (2016), kde jsou popsány metody pro definování speciace prvků. Pro bentonitové prostředí data nenacházíme.



Obr. 24 Rozdělení radionuklidů podle rozpustnosti v podmínkách, podmíněných interakcí cementu s vodou. (Červeně jsou uvedeny rozpustnosti nuklidů v mírně oxidačních podmínkách, modře v redukčních podmínkách, pokud se od oxidačních liší. Data jsou vybrána z tabulek uvedených ve studii (Čubová et al 2017). Použity byly PHREEQC a The Geochemist's Workbench®.)

**Nejistoty:**

Nejistoty spočívají především v neznámém a ověřitelném složení pórové vody bentonitu, a tedy i v nedostatečné znalosti speciace daného radionuklidu za specifických podmínek, nejistotách v iontovýměnných a komplexačních rovnovážných konstantách používaných často při laboratorních teplotách.

**Reference:**

ČERVINKA R., GONDOLLI J., HAVLOVÁ V., RUKAVIČKOVÁ L. (2016): Výběr reprezentativních podzemních vod a příprava jejich syntetických ekvivalentů. – MS SÚRAO, TZ 41/2016, Praha.

ČUBOVÁ K., BABOROVÁ L., NĚMEC M., JOHN J. (2017): Speciace radionuklidů v prostředí úložného systému úložiště pro odpady nepřijatelné do přípovrchových. SÚRAO Technická zpráva č. 207/2017, 157 s.

DURO L., MONTOYA V., COLÀS E., GARCÍA D. (2010): Groundwater Equilibration and Radionuclide Solubility Limits. NWMO Report TR-2010-02. – Nuclear Waste Management Organization (NWMO). Canada.

HAVLOVÁ V., VIDENSKÁ K., GONDOLLI J., MILICKÝ M., GVOŽDÍK L., KRÁLOVCOVÁ J., RUKAVIČKOVÁ L. (2015): Migrační procesy radionuklidů v prostředí krystalických hornin a migrační parametry hornin Českého masivu. TZ 13/2015. SÚRAO Praha, 122 str.

KOPLÍK R., ČURDOVÁ E., MESTEK O. (1996): Speciace stopových prvků ve vodách, půdách sedimentec a biologických materiálech. Chem. Listy 91, 38 - 47 (1997)

VAITKEVIČIENE, V., NARKUNIENE, A., GRIGALIUNIENE, D. (2009): Solubility of Radionuclides Released from Spent Nuclear Fuel Disposed of in a Geological Repository: 1. Solubility Assessment Methodology. – Energetika, 55, 237–244.

## 7.7.2 Transport radionuklidů v kapalně fázi

### Popis:

Procesy související s migrací kontaminantů ve vodné fázi v úložišti (včetně rozpuštěných plynů). Tento proces zahrnuje transport radionuklidů a/nebo jiných kontaminantů ve vodě, která je zpočátku přítomna v materiálech úložiště (např. volná pórová voda v bentonitu nebo cementu), nebo která vstupuje do úložiště z okolní geosféry po jeho uzavření.

### Vliv na dlouhodobou bezpečnost:

Vodou zprostředkovaná migrace přes IB má potenciál ovlivnit toky radionuklidů a dalších kontaminantů směrem z úložiště.

Pokud by i okolní geosférou procházely cesty, kterými by se mohly rozpuštěné látky transportovat z úložiště do biosféry, mohlo by to mít vliv na dávky radionuklidů a dalších kontaminantů přijímaných biosférickými receptory.

Pokud voda proudí advekcí přes IB do přilehlé geosféry, může transportovat rozpuštěné radionuklidy a další kontaminanty. I když nedochází k žádné advekci v IB a přilehlé geosféře, radionuklidy a další kontaminanty, které jsou rozpuštěny v pórové vodě, mohou migrovat difúzí (Vokál et al. 2010).

Koncentrace radionuklidů a dalších kontaminantů, které jsou rozpuštěny ve vodě, mohou být sníženy disperzí/ředěním během migrace.

### Dostupná data:

Transportem radionuklidů v kapalně fázi (zejména difúzí) v prostředí inženýrských bariér v českém prostředí se zabývala celá řada prací – Vokál et al. (2001-2003); Vokál et al. (2008); Trpkošová et al. (2013); Hofmanová et al. (2019), Večerník et al. (2019). Principy advektivního transportu v IB byly řešeny pro přípovrchová ÚRAO dle modelu Neal (1994), následně použitého pro modelování dlouhodobé bezpečnosti ÚRAO Brattství Dobrev et al. (2017).

### Nejistoty:

Popis transportu radionuklidů v kapalně fázi je zatížen celou řadou nejistot, a to



- jsou vlastnosti, kterými popisujeme chování IB, významné pro transport, skutečně reprezentativní?
- Složení pórových vod je pouze predikováno pomocí modelovacích nástrojů
- jsou vlastnosti, kterými popisujeme chování UIB, významné pro transport, skutečně reprezentativní pro celý objem IB?
- jsou předpoklady dlouhodobého vývoje vlastností, významných pro transport, správné?
- jsou principy, kterými popisujeme transportní procesy, skutečně všeobecně správné?

### Reference:

- DOBREV D., TRPKOŠOVÁ D., HUSTÁKOVÁ H., HAVLOVÁ V. (2017): Studie uzavření ÚRAO Bratrství – D. Bezpečnostní hodnocení. Zpráva pro SÚRAO, 2017.
- HOFMANOVÁ E., ČERVINKA R., VOPÁLKA D., BABOROVÁ L., BRÁZDA L., PECKOVÁ A., VETEŠNÍK A., VIGLAŠOVÁ E., VAŠÍČEK R. (2019): Transport radionuklidů z úložiště / vstupní parametry a procesní modely pro hodnocení transportu radionuklidů přes inženýrské bariéry: Závěrečná zpráva. – MS SÚRAO, ZZ 420/2019, Praha.
- NEAL F. (1994): Modelling of the near field chemistry of SMA repository at the Wellenberg site. MS, PSI Bericht 94-18, Paul Scherrer institute, Villingen, CH.
- SAVAGE, D. ED. (1995): The Scientific and Regulatory Basis for the Geological Disposal of Radioactive Waste. J. Wiley & Sons, Chichester, UK.
- TRPKOŠOVÁ D., DOBREV D., GONDOLLI J., HAVLOVÁ V., HOKR M., MARKOVÁ L., VAŠÍČEK R. (2013): Metodiky celkového posouzení bezpečnosti hlubinného úložiště. Závěrečná zpráva projektu FR-TI1/362, Zpráva ÚJV č. 14281, 2013, 151 str.
- VEČERNÍK P., DRTINOVÁ B., BÁRTA, J., BRÁZDA L., GALEKOVÁ E., HAVLOVÁ V., HOFMANOVÁ E., KAŠPAR V., KITTNEROVÁ J., KOLOMÁ K., ROSENDORF, T., VOPÁLKA D. (2019c): Transportní vlastnosti cementových materiálů – závěrečná zpráva. – MS SÚRAO, TZ 430/2019.
- VOKÁL A. (2001–2003): Zavedení metod hodnocení inženýrských bariér, (arch. č. SÚRAO 1/01, 32/01, 7/02, 8/02, 2/03, 4/03, 5/03, 23/02, 25/03, 33/03, 35/03)
- VOKÁL A. ET AL. (2008): Výzkum procesů pole blízkých interakcí hlubinného úložiště VJP a vysoce aktivních odpadů, 2006 - 2008, (arch. č. SÚRAO 18/08, 21/07, 32/06)
- VOKÁL A., HAVLOVÁ V., HERCÍK M., LANDA J., LUKIN D., VEJSADA J. (2010): Aktualizace referenčního projektu hlubinného úložiště radioaktivních odpadů v hypotetické lokalitě. III. Etapa. Studie zadávací bezpečnostní zprávy. C. Dokumentační část. C.2 Hodnocení dlouhodobé bezpečnosti HÚ. Zpráva ÚJV Řež, a.s. EGP 5014-F-101420, 12/2010.

### 7.7.2.1 Difúze radionuklidů

#### Popis:

Difúzi je možno popsat jako transportní děj, v jehož průběhu na základě tepelného (Brownova) pohybu částic dochází k přenosu látky ve směru poklesu její koncentrace. Jestliže koncentrace

v uvažovaném prvním objemu je větší než ve druhém, znamená to, že z prvního do druhého objemu přechází více částic než z druhého do prvního. Výsledkem tak může být přenos látky neboli difúzní tok rozpuštěné látky ve směru menší koncentrace.

Proces průniku migrující látky (stopovače, kontaminace je možno popsat následujícími vztahy.

Přímá úměrnost difúzního toku na koncentračním gradientu je popsána I. Fickovým zákonem (Lever a Woodwark, 1989):

$$F = -D \cdot \text{grad}(c_i)$$

kde je  $F$  difúzní tok látky - tzv. hustota difúzního toku ( $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}$ ),  $D$  difúzní koeficient ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ) a  $c_i$  koncentrace látky  $i$ .

II. Fickův zákon popisuje koncentraci difundující látky jako funkci času a prostoru. Pokud  $D$  nezávisí na koncentraci, pro změnu difúzního toku podél souřadnice  $x$  (1D tvar) platí (Gosman a Jech, 1989):

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} = D_x \left( \frac{\partial^2 c_i}{\partial x^2} \right)_{y,z}$$

Za ustáleného stavu je možno transport, ovlivněný difúzí, popsat rovnicí I. Fickova zákona (Neretnieks, 1990):

$$J = -D_p \varepsilon_t \frac{\partial c}{\partial x}$$

kde  $t$  je transportní (efektivní) pórovitost,  $D_p(D_i)$  difúzní koeficient v pórové vodě ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ).

Efektivní difúzní koeficient  $D_e$  ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ) je definován rovnicí jako

$$D_e = \varepsilon \frac{\delta_D}{\tau^2} D_w = \varepsilon D_p = F_f D_w$$

kde  $\varepsilon$  je porozita,  $D$  je konstiktivita,  $2$  tortuozita,  $D_w$  difuzivita ve volné vodě ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ) a  $D_p$  difuzivita v pórech ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ). Parametr  $F_f$  je nazýván formačním faktorem.

### **Vliv na dlouhodobou bezpečnost:**

Difúze má potenciál přenášet radionuklidy a další kontaminanty, které jsou rozpuštěny ve vodě, přes IB a přilehlou geosféru. Při jejich transportu se budou koncentrace radionuklidů a dalších kontaminantů snižovat.

Difúze povede k „šíření“ radionuklidů a dalších kontaminantů vodou, a tím ke snížení koncentrací rozpuštěných radionuklidů a dalších kontaminantů ve směru koncentračního gradientu. Difúze ovlivní chemické gradienty, které jsou v úložišti vytvořeny, včetně gradientů koncentrací radionuklidů a dalších kontaminantů. To může mít dále dopad na difúzní toky

těchto kontaminantů uvnitř úložiště a mezi úložištěm a okolní geosférou. Difúze v úložišti může úřípadně ovlivnit dávky radionuklidů a dalších kontaminantů, které nakonec přijímají biosférické receptory.

#### **Dostupná data:**

Velké množství prací bylo provedeno v rámci projektu Zavedení metod hodnocení inženýrských barrier (2001–2003; Vokál A. (2001, 2003) a Výzkum procesů pole blízkých interakcí hlubinného úložiště VJP a vysoce aktivních odpadů (2006 – 2008; Vokál et al. 2008). V rámci těchto projektů byly především zavedeny metodiky pro měření difúze radionuklidů, zavedeny počítačové modely pro vyhodnocování experimentů a analyzovány zahraniční práce pro přípravu databáze pro bezpečnostní rozbory. Práce byla zaměřena zejména na české typy bentonitů, ale i srovnání získaných výsledků se zahraničními bentonity. Na ně navázaly projekty Výzkum vlastností materiálů pro bezpečné ukládání radioaktivních odpadů a vývoj postupů jejich hodnocení (2009 – 2013; Trpková et al. 2013; a Výzkumná podpora pro bezpečnostní hodnocení lokalit (2014 - 2020; Hofmanová et al. 2019). Práce Hofmanová et al. (2019) a Večerník et al. (2019) se věnovaly i difúzním procesům v cementových materiálech a rozhraní.

#### **Nejistoty:**

Nejistoty jsou spojeny především s dostatkem dat pro české materiály, s převodem dat z laboratorního do reálného měřítka a relevantnosti dat při použití pro jiné materiály. Nejistoty jsou spojeny i analytickými metodami a zpracováním dat.

#### **Reference:**

- GOSMAN, A., JECH, Č. (1989): Jaderné metody v chemickém výzkumu. Academia, Praha.
- HOFMANOVÁ E., ČERVINKA R., VOPÁLKA D., BABOROVÁ L., BRÁZDA L., PECKOVÁ A., VETEŠNÍK A., VIGLAŠOVÁ E., VAŠIČEK R. (2019): Transport radionuklidů z úložiště / vstupní parametry a procesní modely pro hodnocení transportu radionuklidů přes inženýrské bariéry: Závěrečná zpráva. – MS SÚRAO, ZZ 420/2019, Praha.
- Lever, D. A. a Woodwark, D. R. (1990): Radionuclide transport by groundwater flow through geosphere. Current status 1989. Nirex Safety Series NSS/G 113. Harwell Lab., Didcot, UK.
- TRPKOVÁ D., DOBREV D., GONDOLLI J., HAVLOVÁ V., HOKR M., MARKOVÁ L., VAŠIČEK R. (2013): Metodiky celkového posouzení bezpečnosti hlubinného úložiště. Závěrečná zpráva projektu FR-TI1/362, Zpráva ÚJV č. 14281, 2013, 151 str.
- VEČERNÍK P., DRTINOVÁ B., BARTA, J., BRÁZDA L., GALEKOVÁ E., HAVLOVÁ V., HOFMANOVÁ E., KAŠPAR V., KITNEROVÁ J., KOLOMÁ K., ROSENDORF, T., VOPÁLKA D. (2019c): Transportní vlastnosti cementových materiálů – závěrečná zpráva. – MS SÚRAO, TZ 430/2019.
- VOKÁL A. (2001–2003): Zavedení metod hodnocení inženýrských barrier, (arch. č. SÚRAO 1/01, 32/01, 7/02, 8/02, 2/03, 4/03, 5/03, 23/02, 25/03, 33/03, 35/03)
- VOKÁL A. ET AL. (2008): Výzkum procesů pole blízkých interakcí hlubinného úložiště VJP a vysoce aktivních odpadů, 2006 - 2008, (arch. č. SÚRAO 18/08, 21/07,32/06)

### 7.7.2.2 Advekce radionuklidů

Advekce je pro blízké pole HÚ relevantní v období, kdy dochází k degradaci cementového materiálu, nárůstu porozity, vzniku puklin, až do úplné degradací betonového materiálu.

Advekce je přenos kontaminantů vlivem celkové rychlosti proudění nosiče (vody, plynu). Proudění je pohyb v makroměřítku (po vyloučení chaotického tepelného pohybu molekul), je to střední statistický pohyb částic vody:

$$u = \frac{v}{\varepsilon_f}$$

kde  $u$  je advektivní (pórová) rychlost podzemní vody ( $m \cdot s^{-1}$ ),  $v$  je hustota toku, tj. objemový průtok vztažený na plochu – Darcyho rychlost ( $m^3 \cdot s^{-1} \cdot m^{-2} = m \cdot s^{-1}$ ); nejedná se o rychlost v pravém slova smyslu,  $f$  efektivní (kinematická) porozita, tj. porozita, kterou se uskutečňuje transport

Pohyb vody v nasycené zóně je dán kombinací Darcyho zákona a rovnice kontinuity (Bear, 1988). Darcyho zákon vyjadřuje lineární závislost hustoty toku na hydraulickém gradientu pro:

$$v = -K \cdot \frac{\partial H}{\partial x}$$

kde  $v$  je hustota toku podzemní vody, Darcyho rychlost, zdánlivá rychlost, filtrační rychlost ( $m \cdot s^{-1}$ ),  $K$  hydraulická vodivost, (hydraulická konduktivita, filtrační koeficient,  $m \cdot s^{-1}$ ),  $H$  hydraulická výška ( $m$ ),  $x$  vzdálenost ( $m$ )

Hydraulická výška  $H$  je dána součtem geodetické výšky  $z$  a tlakové výšky  $h_p$ , přičemž tlaková výška je podíl tlaku vody v určitém bodě  $p$  a součinu její hustoty a gravitačního zrychlení  $g$ :

$$H = z + h_p = z + \frac{P}{\rho g}$$

Linearita Darcyho zákona má však své meze. Darcyho zákon neplatí pro průtok vody velmi jemnozrnným materiálem (tzv. oblast prelineárního proudění), neplatí rovněž pro průtok velmi hrubozrnným materiálem, kdy proudění může nabývat turbulentního charakteru (tzv. oblast postlineárního proudění). Darcyho zákon platí pouze při nízkých rychlostech proudění, kdy jsou setrvačné členy z Navier-Stokesových rovnic zanedbatelné. Pro rozlišení laminárního a turbulentního proudění se využívá Reynoldsova kritéria  $Re$  (bezrozměrné číslo vyjadřující poměr mezi setrvačnými a viskózními silami):

$$R_e = \frac{v \cdot d_p}{\mu}$$

kde  $v$  je hustota toku podzemní vody ( $m \cdot s^{-1}$ ),  $d_p$  je délkový rozměr (u partikulárních látek obvykle efektivní průměr zrna nebo efektivní průměr póru); v literatuře lze nalézt pro tento parametr  $d_{10}$  nebo  $d_{50}$  ( $m$ ), je kinematická viskozita kapaliny ( $m^2 \cdot s^{-1}$ )

Nízké hodnoty Reynoldsova kritéria, kdy převládají síly vazkosti, charakterizují laminární proudění; převládají-li setrvačné síly, jedná se o turbulentní proudění. Darcyho zákon obvykle platí, pokud hodnota  $Re$  nepřekročí číslo v intervalu  $Re$  1-10.

#### **Vliv na dlouhodobou bezpečnost:**

Advekce vody přes IB a přilehlou geosféru, má potenciál ovlivnit toky radionuklidů a dalších kontaminantů ven z úložiště. Advekce přichází do úvahy pro IB zejména v období púo jejich degradaci.

Pokud v okolní geosféře existuje i transportní cesty, kterými by se mohly rozpuštěné látky transportovat z úložiště do biosféry, může to mít vliv na dávky radionuklidů a dalších kontaminantů přijímaných biosférickými receptory.

#### **Dostupná data:**

Advektivního transportu v cementových materiálech se do určité míry věnoval Večerník et al. (2019), kdy použil drcený kolonový cementový materiál, v němž za dynamických podmínek probíhá v koloně transport stopovaců advekcí. Principy advektivního transportu v IB byly řešeny pro přípovrchová ÚRAO dle modelu Neal (1994), následně použitého pro modelování dlouhodobé bezpečnosti ÚRAO Bratrství Dobrev et al. (2017).

#### **Nejistoty:**

Nejistoty jsou spojeny především s dostatkem dat pro české materiály, s převodem dat z laboratorního do reálného měřítká a relevantnosti dat při použití pro jiné materiály. Nejistoty jsou spojeny i analytickými metodami a zpracováním dat.

#### **Reference:**

DOBREV D., TRPKOŠOVÁ D., HUSTÁKOVÁ H., HAVLOVÁ V. (2017): Studie uzavření ÚRAO Bratrství – D. Bezpečnostní hodnocení. Zpráva pro SÚRAO, 2017.

NEAL F. (1994) Modelling of the near field chemistry of SMA repository at the Wellenberg site. MS, PSI Bericht 94-18, Paul Scherrer institute, Villingen, CH.

VEČERNÍK P., DRTINOVÁ B., BÁRTA, J., BRÁZDA L., GALEKOVÁ E., HAVLOVÁ V., HOFMANOVÁ E., KAŠPAR V., KITNEROVÁ J., KOLOMÁ K., ROSENDORF, T., VOPÁLKA D. (2019c): Transportní vlastnosti cementových materiálů – závěrečná zpráva. – MS SÚRAO, TZ 430/2019.

### **7.7.2.3 Sorpce radionuklidů**

#### **Popis:**

V pórovém prostoru materiálů může docházet k interakci migrující látky s povrchem pórů, a to buď s primárními minerály či se sekundárními fázemi, vytvořenými v důsledku precipitace z pórové vody či degradací primárních minerálů. Záchyt látek v tomto případě obecně označujeme jako sorpci a může vést k zadržení migrující látky v materiálu či jejímu zpomalení.

Někdy jsou podle toho, zda dochází k přímé inkorporaci do povrchu či pouhé vazbě na povrch, rozlišovány procesy absorpce a adsorpce. Obvykle je však problematické mikroskopicky tyto procesy odlišit a makroskopický efekt je identický, termín sorpce tedy zahrnuje procesy oba.

Někteří autoři vydělují mezi sorpčními procesy pouze iontovou výměnu, povrchovou komplexaci a fyzikální sorpci. Jiní zařazují i další typy interakce látek v roztoku s pevnou fází (viz 7.4.2.2).

Při procesu adsorpce dochází ke vzniku nescifických vazeb (van der Waalsových) mezi vnějšími elektronovými slupkami atomů v roztoku a sorbentu. Proces je rychlý, nezávisí na chemickém složení pevné látky, iontové síle roztoku a na koncentraci rozpuštěné látky při nízkých celkových koncentracích. Fyzikální sorpce se projevuje zejména u hydrolyzovaných a komplexotvorných kovových iontů, jako jsou např. aktinidy. Při elektrostatické adsorpci (povrchová komplexace, iontová výměna) působí elektrostatické (coulombovské) síly mezi elektricky nabitými látkami v roztoku a povrchem, nabitým opačným nábojem. Iontová výměna je ve srovnání s ostatními procesy rychlá a reverzibilní. Chemická adsorpce je způsobena chemickými vazbami mezi látkou v roztoku a povrchem pevné fáze. Proces je specifický, nevratný a pomalý. Příkladem může být vazba jódu na minerály obsahující kovové ionty.

Míra sorpce je určována vlastnostmi sorbující se látky a složením látky, na níž se sorbuje. Vlastnosti sorbentu jsou v mikroměřítku definovány specifickým povrchem, povrchovým nábojem, hustotou sorpčních míst a funkčních skupin.

#### **Vliv na dlouhodobou bezpečnost:**

Sorpce a desorpce ovlivní rozdělení radionuklidů a jiných kontaminantů mezi pevnou formu odpadu a jakoukoli koexistující kapalinu. V důsledku toho sorpce a desorpce ovlivňují potenciální mobilitu radionuklidů a dalších kontaminantů. Sorpce a desorpce jsou typicky rychlé procesy ve srovnání s rozpouštěcími a (zejména) srážecími reakcemi. Frakce radionuklidů, které jsou sorbovány na površích pevných odpadů, mohou být důležitými přispěvateli k frakci s okamžitým uvolňováním (IRF), což je ta část radionuklidů, která se může rychle uvolnit z odpadu, když je vystaven podzemní vodě

#### **Dostupná data:**

Velké množství prací bylo provedeno v rámci projektu Zavedení metod hodnocení inženýrských barrier (2001–2003; Vokál A. (2001, 2003) a Výzkum procesů pole blízkých interakcí hlubinného úložiště VJP a vysoce aktivních odpadů (2006–2008; Vokál et al. 2008). V rámci těchto projektů byly především zavedeny metodiky pro měření sorpce a difúze radionuklidů, zavedeny počítačové modely pro vyhodnocování experimentů a analyzovány zahraniční práce pro přípravu databáze pro bezpečnostní rozborů. Práce byla zaměřena zejména na české typy bentonitů, ale i srovnání získaných výsledků se zahraničními bentonity. Na ně navázaly projekty Výzkum vlastností materiálů pro bezpečné ukládání radioaktivních odpadů a vývoj postupů jejich hodnocení (2009–2013; Trpkošová et al. 2013; a Výzkumná podpora pro bezpečnostní hodnocení lokalit (2014–2020; Hofmanová et al. 2019). Hofmanová et al. (2019) a Večerník et al. (2019) se věnovaly i sorpčním procesům cementových materiálů a rozhraní.

#### **Nejistoty:**

Nejistoty jsou spojeny především s dostatkem dat pro české materiály, s převodem dat z laboratorního do reálného měřítko a relevantnosti dat při použití pro jiné materiály. Nejistoty jsou spojeny i analytickými metodami a zpracováním dat.

**Reference:**

- HOFMANOVÁ E., ČERVINKA R., VOPÁLKA D., BABOROVÁ L., BRÁZDA L., PECKOVÁ A., VETEŠNÍK A., VIGLAŠOVÁ E., VAŠÍČEK R. (2019): Transport radionuklidů z úložiště / vstupní parametry a procesní modely pro hodnocení transportu radionuklidů přes inženýrské bariéry: Závěrečná zpráva. – MS SÚRAO, ZZ 420/2019, Praha.
- TRPKOŠOVÁ D., DOBREV D., GONDOLLI J., HAVLOVÁ V., HOKR M., MARKOVÁ L., VAŠÍČEK R. (2013): Metodiky celkového posouzení bezpečnosti hlubinného úložiště. Závěrečná zpráva projektu FR-TI1/362, Zpráva ÚJV č. 14281, 2013, 151 str.
- VEČERNÍK P., DRTINOVÁ B., BÁRTA, J., BRÁZDA L., GALEKOVÁ E., HAVLOVÁ V., HOFMANOVÁ E., KAŠPAR V., KITNEROVÁ J., KOLOMÁ K., ROSENDORF, T., VOPÁLKA D. (2019c): Transportní vlastnosti cementových materiálů – závěrečná zpráva. – MS SÚRAO, TZ 430/2019.
- VOKÁL A. (2001–2003): Zavedení metod hodnocení inženýrských bariér, (arch. č. SÚRAO 1/01, 32/01, 7/02, 8/02, 2/03, 4/03, 5/03, 23/02, 25/03, 33/03, 35/03)
- VOKÁL A. ET AL. (2008): Výzkum procesů pole blízkých interakcí hlubinného úložiště VJP a vysoce aktivních odpadů, 2006–2008, (arch. č. SÚRAO 18/08, 21/07,32/06)

### 7.7.2.4 Fyzikální retardace

**Popis:**

Retardace fyzikální je způsobena fyzikálními procesy, které brání radionuklidům v pohybu. Jsou to tyto procesy: difúze do slepých pórů, molekulární filtrace, kdy příliš velké molekuly radionuklidů, případně koloidy, na nichž jsou radionuklidy navázány, nejsou schopny procházet úzkými póry, iontová exkluze, kdy vlivem záporně nabitého povrchu minerálů, například v jílech, jsou anionty Cl<sup>-</sup> a I<sup>-</sup> odpuzovány a nemohou pórovým prostorem procházet, a reverzní osmóza, ke které dochází mezi dvěma chemickými typy podzemních vod o různé koncentraci, kterým jsou odděleny od sebe polopropustným materiálem, jako jsou jíly. Aniontová exkluze však často splývá s difúzními procesy (viz 7.7.2.1).

**Vliv na dlouhodobou bezpečnost:**

Vliv na dlouhodobou bezpečnost je spíše minoritní.

**Dostupná data:**

Procesy aniontové exkluze se zabývají např. práce Hofmanové et al. (2019).

**Nejistoty:**

Spojené s nejistotami kvantifikace této metody.

**Reference**

- HOFMANOVÁ E., ČERVINKA R., VOPÁLKA D., BABOROVÁ L., BRÁZDA L., PECKOVÁ A., VETEŠNÍK A., VIGLAŠOVÁ E., VAŠÍČEK R. (2019): Transport radionuklidů z úložiště / vstupní parametry

a procesní modely pro hodnocení transportu radionuklidů přes inženýrské bariéry: Závěrečná zpráva. – MS SÚRAO, ZZ 420/2019, Praha.

### 7.7.2.5 Osmóza

#### Popis:

Reverzní osmóza je proces, kdy při existenci dvou roztoků o různé koncentraci oddělených od sebe polopropustnou membránou dochází k proudění z roztoku o nižší koncentraci do roztoku o vyšší koncentraci).

#### Vliv na dlouhodobou bezpečnost:

Vliv na dlouhodobou bezpečnost je pro české podmínky zatím neznámý.

#### Dostupná data:

Nejsou dostupná data pro český bentonit. V zahraniční literatuře se této problematice věnoval např. práce Malusina et al. (2021)

#### Nejistoty:

Proces není pro český bentonit popsán.

#### Reference:

Nejsou dostupná data pro český bentonit.

MALUSIS M., DOMINIJANNI A., SCALIA J., GUARENA N., SAMPLE-LORD K., BOHNHOFF G., SHACKELFORD CH., MARIO MANASSERO M. (2021): Assessing the influence of chemico-osmosis on solute transport in bentonite membranes based on combined phenomenological and physical modeling, Japanese Geotechnical Society Special Publication, 2021, Volume 9, Issue 2, Pages 37-44,

## 7.7.3 Transport radionuklidů v plynné fázi

#### Popis

Migrace kontaminantů v plynné nebo parní fázi nebo jako jemné částice nebo aerosol v plynu nebo páře přes úložiště.

Případy, kdy dochází ke vzniku plynné fáze, představují z hlediska bezpečnosti HÚ problematické situace, protože dochází k narušení bezpečnostních funkcí bentonitové bariéry.

Z výsledků projektu FORGE vyplývá (Norris S. edit. 2013), že v nesaturovaném či částečně saturovaném bentonitu je dvoufázový tok dominantním transportním mechanismem. V případě, že tlak plynu překročí tlak v bentonitu, dochází k mechanické interakci vedoucí ke konsolidaci bentonitu a/nebo ke vzniku dilatačních cest umožňujících migraci plynu. Tyto cesty vykazují časoprostorový vývoj – lokalizovaný výtok během průniku plynu bez měřitelné desaturace. Po takovéto události však dochází k uzavření cesty díky samohojení bentonitu.

Radionuklidy a další kontaminanty mohou být transportovány přes IB a přilehlou geosféru v důsledku pohybu plynu. Tento transport může být buď přímý, kdy radionuklidy a další



kontaminanty jsou v plynné formě (např. C-14 nebo I). Alternativně může pohyb plynu způsobit, že se další fáze nesoucí radionuklidy nebo kontaminující látky pohybují advekcí. Pohybujícím se plynem mohou být transportovány například aerosoly nebo pevné částice, na které jsou vázány radionuklidy nebo jiné kontaminanty. Pohyb plynu může také vytlačit vodu, ve které jsou transportovány radionuklidy nebo jiné kontaminanty, buď v roztoku nebo vázané na / v koloidech.

#### **Vliv na dlouhodobou bezpečnost:**

Případy, kdy dochází ke vzniku plynné fáze, představují z hlediska bezpečnosti HÚ problematické situace, protože dochází k narušení bezpečnostních funkcí bentonitové bariéry. Její desaturace vede k poklesu těsnicí schopnosti a vznik plynem generovaných preferenčních cest poté k možnosti rychlejší migrace radionuklidů. Migrující plyn může současně působit jako transportní médium pro radionuklidy nebo koloidní jílové částice (např. s nasorbovanými radionuklidy) (Norris S. edit. 2013).

Vliv na bezpečnost být podstatný u radionuklidů, kterou jsou mobilní, jako je např. C-14 nebo I. Např. C-14 může migrovat v různých formách (plynná, organická a anorganická), přičemž rychlost transportu ze zdroje do biosféry závisí na konkrétní formě (Vetešník et al. 2017)

#### **Dostupná data:**

Vzniku plynu a transportu v bentonitu se věnuje Dobrev et al. (2015).

Modelování migrace C-14, včetně plynné fáze se věnuje Vetešník et al. (2017).

#### **Nejistoty:**

Klasické modely dvoufázového toku však nedokáží správně charakterizovat migraci plynu v saturovaném kompaktovaném bentonitu

#### **Reference:**

DOBREV D., GONDOLLI J., KÁRNÍK D., KOUŘIL M., STOULIL J., KOTNOUR P., MULLER J., LOVECKÝ M., ŠIK J., MACÁK P., MATAĽ O., ČERMÁK J., KRÁL L. (2015): Výzkum a vývoj ukládacího obalového souboru pro hlubinné ukládání vyhořelého jaderného paliva do stádia realizace vzorku. 1. Průběžná zpráva. Zpráva ŠJs, a.s. Ae15534/dok Rev. 1. Orlík, 2015.

NORRIS S. (EDIT.) (2013): NORRIS S., LEMY F., DEL HONEUX C.-A., VOLCKAERT G., WEETJENS E., WOUTERS K., WENDLING J., DYMITROWSKI M., PELLEGRINI D., SELLIN P., JOHNSON L., SENTIS M. HARRINGTON J. (2013): Synthesis Report: Updated Treatment of Gas Generation and Migration in the Safety Case, EC FORGE Project Milestone M68, 126 str.

VETEŠNÍK A., REIMITZ D., BABOROVÁ L., VOPÁLKA D. (2017): Vývoj modelu transportu C-14 z hlubinného úložiště a jeho neurčitostní a citlivostní analýza. – MS SÚRAO, TZ 171/2017

### **7.7.4 Transport koloidů v kapalně fázi**

#### **Popis:**

Koloidní částice (v tomto případě jsou uvažovány především jílové koloidní částice, ale mohlo by jít i o pravé koloidy) mohou mít dopad na transport radionuklidů v prostředí HÚ.

Vliv na transport radionuklidů v prostředí HÚ má smysl zahrnout jen v případě splnění těchto podmínek (Červinka et al. 2015b):

- koloidy musí být v podzemní vodě přítomné,
- koloidy musí být v podzemní vodě stabilní,
- se musí na bentonitové koloidy vázat,
- čas pro disociaci radionuklidu z koloidu musí být významný vzhledem k času zdržení podzemní vody v prostředí HÚ.

K transportu koloidů budou docházet v následujících obdobích

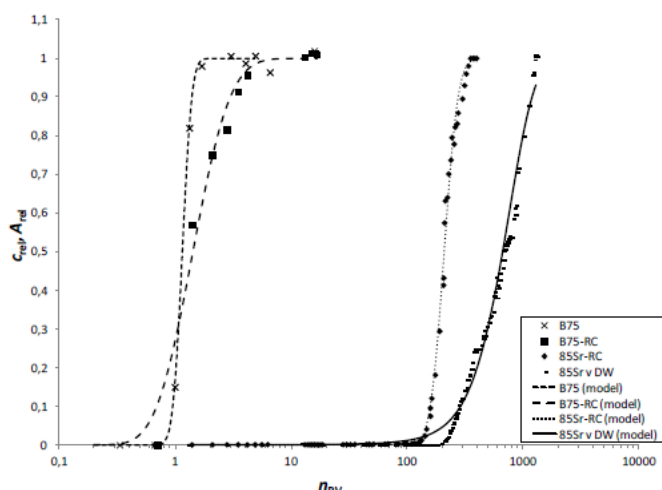
- pravé koloidy se budou uvolňovat z odpadu a do HÚ se budou dostávat po prokorodování UOS;
- pseudokoloidy se budou tvořit po kontaktu podzemní vody s materialy inženýrských bariér za příznivých podmínek (viz FEP 0), tj. na rozhraní bentonit – hornina prakticky okamžitě po uzavření úložiště. Vazba radionuklidů na ně je však možná až po jejich uvolnění z UOS, tj. po prokorodování UOS.

### Vliv na dlouhodobou bezpečnost:

V případě významné retardace koloidních částic v materiálu a významné sorpce radionuklidů na koloidy může dojít ke zpomalení jejich migrace do geosféry / biosféry.

### Dostupná data:

Sorpce radionuklidů na bentonitové koloidy a jejich transportu se věnoval ve svých pracích Červinka et al (2014, 2015a,b). V rámci českého zapojení do projektu EU BELBAR byl sledován transport koloidních částic (přečištěná jílová frakce Bentonitu B75 z roku 2010), radionuklidů ( $^{137}\text{Cs}^+$ ,  $^{85}\text{Sr}^{2+}$ ) a radiokoloidů v kolonovém uspořádání na drceném horninovém materiálu z Melechovského masivu (hloubka 97,5-98,7 m, Česká republika). V přítomnosti bentonitových koloidů byl transport radionuklidů rychlejší, koloidy v systému plnily roli nosiče radionuklidů (Červinka et al. 2015b – viz Obr. 25).



Obr. 25 Migrace radiokoloidů Sr ( $^{85}\text{Sr}$ -Srov.BC, nejvíce vpravo) drceným granitem v kolonovém uspořádání

### Nejistoty:

Není jasné, zda příspěvek koloidů na transport radionuklidů je významný.

**Reference:**

ČERVINKA R., GONDOLLI J., VIDENSKÁ K. (2014): Shrnutí dosažených výsledků v roce 2014. Zpráva projektu: Eroze bentonitu a její dopad na dlouhodobé chování inženýrských bariér hlubinného úložiště a transport radionuklidů. ÚJV Řež, a. s. ÚJV-14398.

ČERVINKA R., GONDOLLI J., VIDENSKÁ K. (2015A): Shrnutí dosažených výsledků v roce 2015. Zpráva projektu: Eroze bentonitu a její dopad na dlouhodobé chování inženýrských bariér hlubinného úložiště a transport radionuklidů. ÚJV Řež, a. s. ÚJV-14535.

ČERVINKA R., GONDOLLI J., VIDENSKÁ K. (2015B): Eroze bentonitu a její dopad na dlouhodobé chování inženýrských bariér hlubinného úložiště a transport radionuklidů. Závěrečná zpráva projektu. ÚJV Řež, a. s. ÚJV-Z44495.

**7.7.4.1 Difúze radiokoloidů****Popis:**

Difúze jak pravých koloidů, tak pseudokoloidů se řídí stejnými fyzikálními principy jako difúze látek ve vodné fázi – viz FEP 7.7.2.1

**Vliv na dlouhodobou bezpečnost:**

V případě významné retardace koloidních částic v materiálu a významné sorpce radionuklidů na koloidy může dojít ke zpomalení jejich migrace do geosféry / biosféry.

**Dostupná data:**

Difúzí koloidů s navázanými radionuklidy, ani pravých koloidů se v českém prostředí nikdo nezabýval.

**Nejistoty:**

Neprozkoumáno

**Reference:**

Nejsou

**7.7.4.2 Advekce radiokoloidů****Popis:**

Advekce koloidů jak pravých, tak pseudokoloidů se řídí stejnými fyzikálními principy jako difúze látek ve vodné fázi – viz FEP 7.7.2.2

**Vliv na dlouhodobou bezpečnost:**

V případě významné retardace koloidních částic v materiálu a významné sorpce radionuklidů na koloidy může dojít ke zpomalení jejich migrace do geosféry / biosféry.

**Dostupná data:**

Sorpce radionuklidů na bentonitové koloidy a jejich transportu se věnoval ve svých pracích Červinka et al (2014, 2015a,b). V rámci českého zapojení do projektu EU BELBAR byl sledován transport koloidních částic (přečištěná jílová frakce Bentonitu B75 z roku 2010), radionuklidů ( $^{137}\text{Cs}^+$ ,  $^{85}\text{Sr}^{2+}$ ) a radiokoloidů v kolonovém uspořádání na drceném horninovém materiálu z Melechovského masivu (hloubka 97,5-98,7 m, Česká republika). V přítomnosti bentonitových koloidů byl transport radionuklidů rychlejší, koloidy v systému plnily roli nosiče radionuklidů (Červinka et al. 2015b) – viz FEPy 7.7.4, 7.7.4.3

**Nejistoty:**

Spojeny s nejistotami kvantifikace této metody.

**Reference**

- ČERVINKA R., GONDOLLI J., VIDENSKÁ K. (2014): Shrnutí dosažených výsledků v roce 2014. Zpráva projektu: Eroze bentonitu a její dopad na dlouhodobé chování inženýrských bariér hlubinného úložiště a transport radionuklidů. ÚJV Řež, a. s. ÚJV-14398.
- ČERVINKA R., GONDOLLI J., VIDENSKÁ K. (2015A): Shrnutí dosažených výsledků v roce 2015. Zpráva projektu: Eroze bentonitu a její dopad na dlouhodobé chování inženýrských bariér hlubinného úložiště a transport radionuklidů. ÚJV Řež, a. s. ÚJV-14535.
- ČERVINKA R., GONDOLLI J., VIDENSKÁ K. (2015B): Eroze bentonitu a její dopad na dlouhodobé chování inženýrských bariér hlubinného úložiště a transport radionuklidů. Závěrečná zpráva projektu. ÚJV Řež, a. s. ÚJV-Z44495.

**7.7.4.3 Sorpce radiokoloidů****Popis:**

Sorpce radionuklidů na koloidy se řídí stejnými fyzikálními principy jako sorpce látek z vodné fáze – viz FEP 7.7.2.3. V případě reversibilní sorpce radionuklidů na koloidy je jejich význam důležitý pouze v případě, že afinita radionuklidů ke koloidním částicím je výrazně vyšší než k ostatním částem systému (Červinka et al. 2015).

**Vliv na dlouhodobou bezpečnost:**

Vznik koloidů a jejich transport, včetně navázaných radionuklidů, je považována za významný, byť jeho detaily nebyly zcela popsány. Byl např. zařazen do normálního scénáře při hodnocení bezpečnosti ve Vokál et al. (2010a,b).

**Dostupná data:**

Sorpce radionuklidů na bentonitové koloidy a jejich transportu se věnoval ve svých pracích Červinka et al (2014, 2015a,b) – viz FEP 7.7.4

**Nejistoty:**

Spojeny s nejistotami kvantifikace této metody.

**Reference:**

- ČERVINKA R., GONDOLLI J., VIDENSKÁ K. (2014): Shrnutí dosažených výsledků v roce 2014. Zpráva projektu: Eroze bentonitu a její dopad na dlouhodobé chování inženýrských bariér hlubinného úložiště a transport radionuklidů. ÚJV Řež, a. s. ÚJV-14398.
- ČERVINKA R., GONDOLLI J., VIDENSKÁ K. (2015A): Shrnutí dosažených výsledků v roce 2015. Zpráva projektu: Eroze bentonitu a její dopad na dlouhodobé chování inženýrských bariér hlubinného úložiště a transport radionuklidů. ÚJV Řež, a. s. ÚJV-14535.
- ČERVINKA R., GONDOLLI J., VIDENSKÁ K. (2015B): Eroze bentonitu a její dopad na dlouhodobé chování inženýrských bariér hlubinného úložiště a transport radionuklidů. Závěrečná zpráva projektu. ÚJV Řež, a. s. ÚJV-Z44495.
- VOKÁL ET AL. (2010A): Aktualizace referenčního projektu hlubinného úložiště radioaktivních odpadů v hypotetické lokalitě, III. etapa – Studie Zadávací bezpečnostní zprávy, ÚJV Řež a.s. – divize Energoprojekt Praha, 2010
- VOKÁL A., HAVLOVÁ V., HERCÍK M., LANDA J., LUKIN D., LANDA J. (2010B): Aktualizace referenčního projektu hlubinného úložiště radioaktivních odpadů v hypotetické lokalitě, III. etapa – Hodnocení dlouhodobé bezpečnosti, ÚJV Řež a.s. – divize Energoprojekt Praha, 2010

### 7.7.5 Transport korozních produktů

**Popis:**

Za redukčních podmínek (které se očekávají po většinu času životnosti UOS) je při korozi kovového železa uvolňován do roztoku iont železa a je produkován vodík jako výsledek disociace vody a redukce protonu, což vede k nárůstu pH a poklesu redox potenciálu. Reakci je možné zjednodušeně zapsat jako:  $\text{Fe(s)} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$ . Iont železa přítomný v roztoku následně precipituje na povrchu kovu v podobě pevné vrstvy korozních produktů, nejčastěji hydroxidů a oxidů, případně je dále transportován do rozhraní železo-jíl, kde může reagovat s dalšími chemickými speciemi a tvořit minerální fáze nebo difunduje dále do jílu, kde může opět reagovat či být zachycen na povrchu jílových minerálů. Hlavním řídicím procesem ovlivňujícím transport iontu železa v rozhraní železo-jíl bude za podmínek plně saturované bentonitové bariéry difúze, a to jak vznikajícími pevnými korozními produkty, tak bentonitem. Korozní produkty vytvořené na povrchu kovu mohou v čase dále přecházet na stabilnější formy či reagovat s jinými přítomnými speciemi za vzniku komplexnějších korozních produktů, což může být doprovázeno dalším vývojem vodíku (např. při oxidaci  $\text{Fe}^{2+}$  na  $\text{Fe}^{3+}$  při transformaci metastabilního hydroxidu železnatého na magnetit) nebo být zdrojem železa pro alterační reakce v jílu (Gondolli et al. 2016).

**Vliv na dlouhodobou bezpečnost:**

Vliv na dlouhodobou bezpečnost zatím nebyl dostatečně vyhodnocen. Otázkou je vznik nových korozních produktů, jež mohou zvětšit svůj objem v porovnání s benonitovými

částicem (viz např. Dobrev et al. 2020), jejich difúze směrem do bentonitu a změna jeho vlastností.

#### **Dostupná data:**

Procesy transportu korozních produktů se věnovala jednak Gondolli et al. (2016, 2018), Dobrev et al. (2020) s modelem životnosti, zahrnujícím i korozní produkty a jejich transport. V současné době probíhá projekt modelování migrace korozní produktů v rámci EU projektu EURAD (Havlová et al. 2020).

#### **Nejistoty:**

Krátkodobé korozní experimenty nemohou poskytnout data pro validaci výpočtů modelů v dlouhodobém horizontu. Z dlouhodobého hlediska (více jak stovky let) by bylo nutné využít archeologických analogů. Proveditelné dlouhodobé experimenty v řádu 5 a více let by mohly poskytnout validaci modelu v počátečních fázích, kdy by mělo docházet k tvorbě magnetitu, sideritu a čukanovitu.

Obecným problémem použitých analytických technik je fakt, že v okamžiku vzorkování je obtížné odhadnout očekávané fáze v systému (zejména alterační produkty) a pro ně zvolit odpovídající analytické techniky.

#### **Reference:**

- DOBREV D., GONDOLLI J., KOUŘIL M., STOULIL J., STRAKA M. (2017b): Korozní zkoušky s materiály navrženými pro konstrukci ukládacích obalových souborů – MS SÚRAO, Technical report, SÚRAO, Prague.
- GONDOLLI J., DOBREV D., KAŠPAR V., KLAJMON M., STOULIL J. (2016): Chování UOS pro VJP a RAO / Korozní produkty – Věcný a časový harmonogram prací řešerše korozních a alteračních procesů na rozhraní železo-jíl. – MS SÚRAO TZ 61/2016, Praha.
- GONDOLLI J., KLAJMON M., KOUŘIL M. (2018): Chování UOS pro VJP a RAO/Korozní produkty. Závěrečná zpráva. – MS SÚRAO ZZ 329/2018, Praha.
- HAVLOVA V., KICZKA M., MENDOZA MIRANDA A., KLAJMON M., WERSIN P., PEKALA M. JENNI A., HADI J., SAMPER J., MONTENEGRO L., MON A., FABIAN M, OSAN J., A. DAUZERES, D. JACQUES (2020): Modelling of the steel-clay interface – approaches, first results and model refinements. Final version as of 28 08 2020 of deliverable D2.6 of the HORIZON 2020 project EURAD. EC Grant agreement no: 847593.

## **7.8 Procesy probíhající v celém systému úložiště**

### **7.8.1 Tepelný vývoj úložiště**

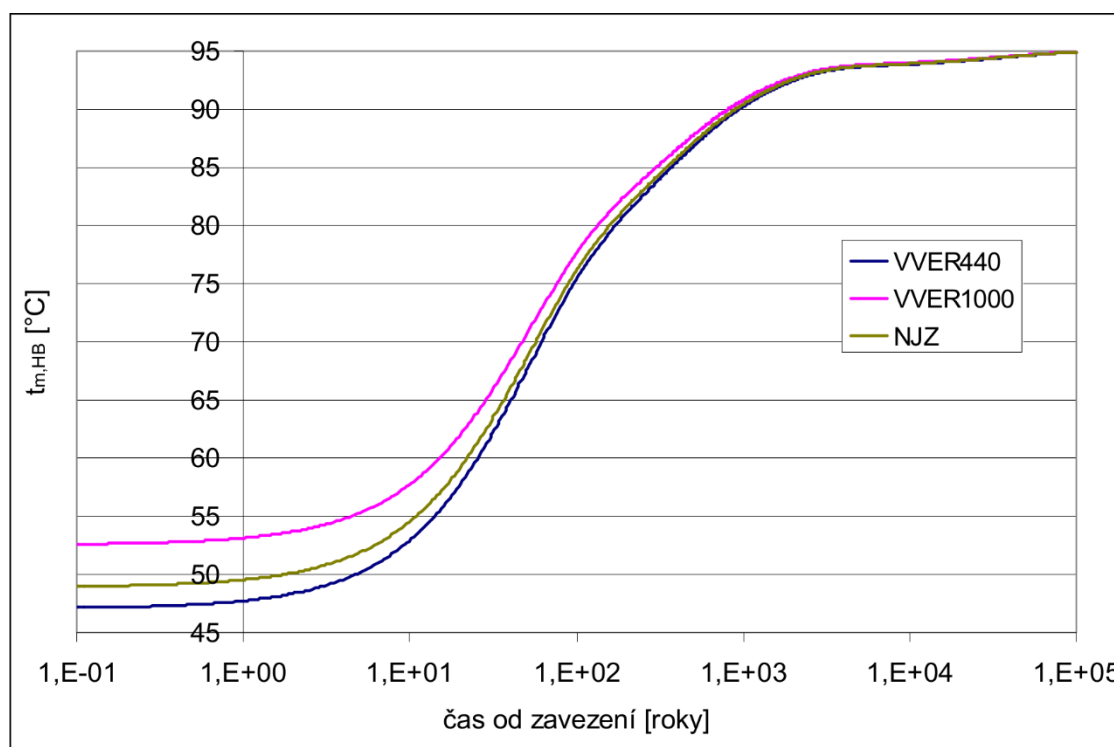
#### **Popis:**

Tepelný návrh HÚ spočívá v optimalizaci vzdáleností mezi jednotlivými UOS a tunely (vrty při horizontálním ukládání) při hledání minimálních možných vzdáleností mezi zdroji tepla (jednotlivé UOS) vytvářejícími nestacionární teplotní pole, které nesmí v žádném časovém okamžiku a v žádném místě úložiště překročit zadanou limitní teplotu. Limitní teplotou je teplota bentonitu, která je stanovena na 95 °C. Pro český program HÚ byla zatím provedena

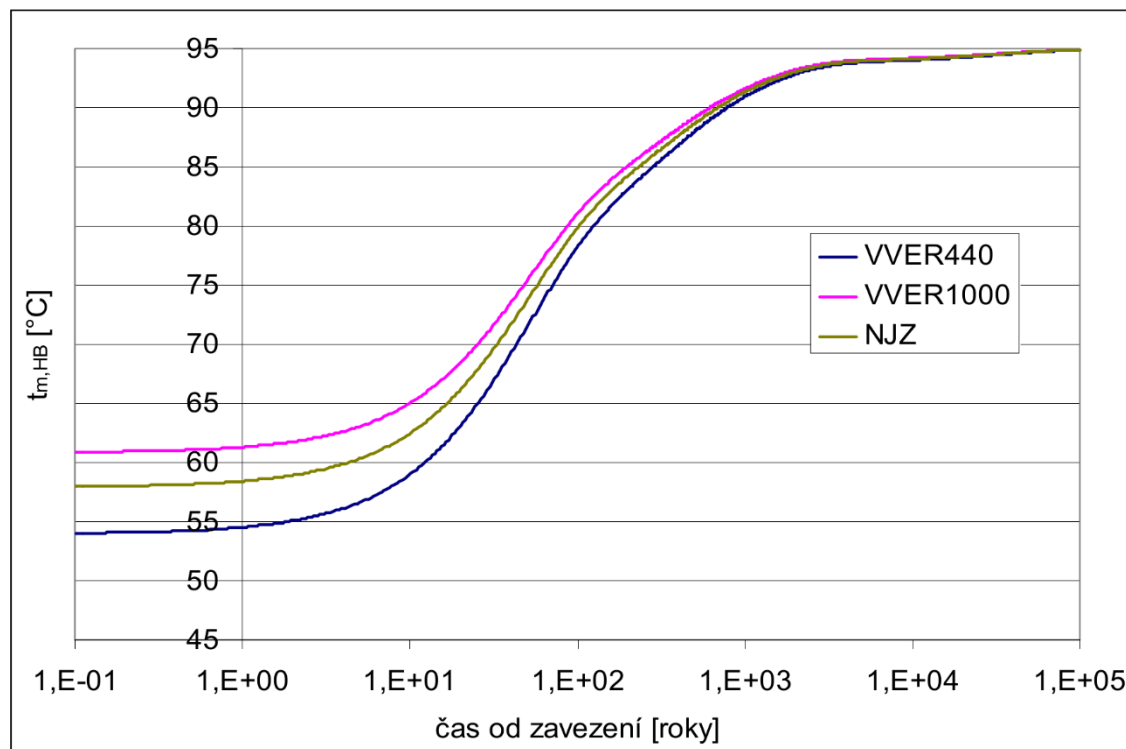
pouze zjednodušená statická tepelná analýza. Nezohledňuje prostorové a časové změny součinitele tepelné vodivosti. Teplotní vývoj HÚ vychází z předpokladu, že HB bude nejprve vysušený a později saturovaný vodou (Kobylka 2019).

Nejvyšší teplota bentonitu se vždy nachází na rozhraní UOS-bentonit, což je dáno směrem vedení tepla od UOS do HB. Maximální teploty je dosaženo v období přibližně 10 let od uzavření HÚ. Po uzavření úložiště budou okolní horniny podléhat zvyšování teploty, což bude mít vliv na změny napětí v horninovém masivu a bude rovněž urychlovat chemické reakce. Po saturaci vodou se tepelná vodivost HB značně zvyšuje a klesá i maximální teplota bentonitu.

V provedené analýze byla určována limitní teplota HB  $t_{m,HB}$ , které nesmí být překročena. Pokud by došlo k jejímu překročení, bude ve stejném časovém okamžiku překročena limitní teplota 95 °C pro bentonit. Nejedná se o teplotu HB, které bude ve skutečnosti dosahováno, ale slouží pouze pro srovnání s dosahovanými teplotami. Ukázky této limitní teploty je možné nalézt v grafech na Obr. 26 pro horizontální ukládání a v grafu na Obr. 27 pro vertikální ukládání UOS.



Obr. 26: limitní teplota HB pro vertikální ukládání UOS



Obr. 27: limitní teplota HB pro horizontální ukládání UOS

V obou případech ukládání se křivky zvedají od minimálních hodnot při nejvyšším zbytkovém tepelném výkonu UOS v časech po zavezení UOS do HB až k limitním 95 °C na vnitřní straně bentonitu, kterých by dosáhly při nulovém zbytkovém výkonu. Přestože má UOS EDU nejnižší celkový tepelný výkon, je současně  $t_{m,HB}$  nejnižší. Tento paradox je dán kombinací dvou faktorů, kdy výkon UOS je vztažen oproti NJZ či ETE na kratší délku 3,217 m (tj. délku PS pro reaktor VVER-440) a zejména větší vrstvou bentonitu danou menším průměrem UOS EDU. Nejvyšší povolené  $t_{m,HB}$  vychází pro UOS ETE, kdy je tloušťka bentonitové vrstvy menší a tepelný výkon je přitom nižší než pro UOS NJZ. Povolená  $t_{m,HB}$  pro UOS s palivem z NJZ pak vychází mezi těmito mezními křivkami, protože tloušťka bentonitové vrstvy je menší než u UOS EDU, ovšem zbytkový tepelný výkon UOS NJZ je vyšší než u UOS ETE. Z důvodu větší tloušťky bentonitové vrstvy rovněž vychází limitní teploty pro HB nižší při horizontální variantě ukládání proti vertikální, a to ve všech variantách UOS.

#### Vliv na dlouhodobou bezpečnost:

Bezpečný návrh HÚ musí respektovat tepelný vývoj úložiště a možnost dosažení limitní teploty bentonitu v různých místech HÚ, aby byly zachovány vlastnosti bentonitu zajišťující zejména bezpečnostní funkci *zpomalit migraci radionuklidů od radioaktivního odpadu do životního prostředí*.

#### Dostupná data:

Dostupná data jsou omezená. Jedná se o jedinou českou zprávu. Ta využívá zjednodušené předpoklady, které jsou ovšem zcela v souladu se zahraniční praxí. Zjednodušená metodika na druhou stranu umožňuje dosažení mnoha zajímavých výsledků. Ve zprávě jsou analyzovány jednotlivé lokality pro HÚ z pohledu splnění limitní podmínky na teplotu bentonitu (přes limitní teplotu HB). Dále je ukázáno, jaké jsou přípustné rozteče UOS s VJP v závislosti



na součiniteli tepelné vodivosti a teplotě HB a také v závislosti na tepelném výkonu ukládaného VJP.

### Nejistoty:

Jako hlavní nejistoty lze identifikovat absenci numerického modelování a nerespektování nerovnoměrností v prostorovém vedení tepla. Dále schází realistický model rozhraní bentonitu s HB, kde je předpokládána vzduchová mezera o tloušťce 2 mm. Je to konzervativní předpoklad a klade vedení tepla značný odpor a výpočtově nahrazuje v praxi reálnější, avšak v současné době neznámé, vrstvy (např. neúplné zaplnění mezery bentonitem apod.). V neposlední řadě bylo použito statického modelování bez respektování prostorových a časových změn součinitele tepelné vodivosti.

### Reference:

KOBYLKA D. (2019): Optimalizace vzájemné vzdálenosti UOS, Technická zpráva SÚRAO 135/2017.

## 7.8.2 Proudění v EDZ

### Popis:

Za zkratkou EDZ lze nalézt dvě odlišné definice: *Excavation Damaged Zone* (EdZ, zóna narušení ražbou) a *Excavation Disturbed Zone* (EDZ, zóna poškození ražbou) (Tsang, Bernier, & Davies, 2004). Zatímco zóna narušení je definována jako oblast vratných deformací se změnami zejména hydromechanického a geochemického rázu, zóna těžbou poškozená představuje prostředí, kde vlivem těžby již došlo k nevratným změnám v horninovém prostředí. EDZ představuje zónu, která vzniká v průběhu budování důlních děl a její dosah a rozložení závisí na napěťovém stavu neporušené horniny a na technologii ražby. Problematice EDZ a její návaznosti na RAO v prostředí krystalinika byla věnována řada prací. Shrnutí experimentů, jež přispěly k pochopení EDZ na jednotlivých lokalitách uvádí např. (Ericsson, a další, 2015). Jedním z prvních projektů popisující projev ražby na funkci bariér potenciálního úložiště představuje Stripa (Grey, 1993). Další lokality zaměřené na výzkum podmínek a poruchových zón v krystalinických horninách (včetně EDZ) shrnuje (Lanyon, 2011), z laboratorii zaměřených na krystalinické horniny lze zmínit např. Grimsel ve Švýcarsku (Frieg, a další, 1998), Onkalo ve Finsku (Posiva, 2003) či laboratoř Äspö ve Finsku (Johnsson, a další, 2009). Z hlediska procesů v EDZ včetně procesu proudění lze oddělit období budování a provozu HÚ a období po uzavření HÚ. Na základě shrnutí uvedeného v (Davies & Bernier, 2003) lze za potenciálně rizikovější považovat projevy EDZ na dlouhodobou funkčnost ÚRAO po uzavření.

V průběhu konstrukce úložiště jsou změny v masivu, vedoucí ke vzniku EDZ, důsledkem změny tlakového pole zásahem do masivu a vlivem technologických postupů ražby. Obě příčiny se z hlediska hydrauliky projevují změnou odporových parametrů zóny – zvýšením nasycené hydraulické vodivosti v důsledku zvýšení hustoty, konektivity a propustnosti puklinové sítě.

Odtěžením horniny dochází k porušení rovnovážného stavu a při redistribuci geostatického tlaku dochází k posunům okolní horniny směrem do vytěženého prostoru v důsledku jejího odlehčení. Mění se tak parametry stávající puklinové sítě v masivu. Atmosférický tlak při

povrchu vytěženého prostoru vede ke vzniku tlakového gradientu. V období realizace a provozu HÚ tak nastává proudění podzemní vody směrem do výrubu, přičemž v EDZ mohou nastat podmínky nesaturovaného proudění, jež snižují efektivní hydraulickou vodivost v bezprostředním okolí odvodňovaného díla. Snižování hydraulické vodivosti v dané fázi může být rovněž zapříčiněno biologickou aktivitou vedoucí ke snížení efektivního průřezu vzniklých poruch (Hudson & Harrison, Engineering rock mechanics – an introduction to the, 1997).

Přímé dopady technologických postupů při ražbě ÚRAO představují další významný zdroj poruch spoluutvářejících hydraulické parametry EDZ. V případě dril-and-blast metody popisují (Tsang, Bernier, & Davies, 2004) zvýšení permeability o 2 až 3 řády ve vzdálenosti až 1.5 m od díla. Oproti tomu při použití razicího stroje TBM zasahuje poškozená zóna s permeabilitou navýšenou v rámci jednoho řádu do vzdálenosti jednotek centimetrů (Davies & Bernier, 2003).

Krátce po uzavření HÚ dojde k opětovnému nárůstu vlhkosti EDZ zóny, což povede k postupnému sycení částečně odvodněného puklinového prostředí a zvyšování nasycené hydraulické vodivosti. Tento stav je však ovlivněn teplem, produkovaným uloženými soubory, které vede k teplotním gradientům a vzniku dynamického stavu rozložení vlhkosti. Dalším důsledkem teplotního stresu z radioaktivního rozpadu jsou objemové změny vznikající díky teplotní roztažnosti horniny a výplňových materiálů. To může vést k dodatečnému rozrušení EDZ a zvýšení její funkce preferenční cesty pro proudění (Tsang, Bernier, & Davies, 2004). V případě bentonitového těsnění lze očekávat lokální změnu tlakového pole v EDZ, vedoucí k uzavírání poruch a snižování jejich propustnosti, což povede ke snížení proudění, zejména ve směru paralelním k raženému dílu.

V určitém časovém horizontu po uzavření nastane plná saturace EDZ a výplňových materiálů a bude postupně docházet ke snižování teplotních gradientů. Proudové pole se postupně ustálí. Dlouhodobé působení (v řádu tisíciletí) hydraulického a teplotního stresu může vést až k degradaci krystalinických hornin (zejména na povrchu poruchových zón) za vzniku jílových materiálů, jež se projeví snížením propustnosti EDZ. V tomto horizontu ale nastane rovněž degradace podpůrného vystrojení HÚ (výztuže, kotvy atd.), což povede ke vzniku nových preferenčních cest a k potenciálně odlišnému charakteru proudění (Tsang, Bernier, & Davies, 2004).

#### **Vliv na dlouhodobou bezpečnost:**

Vzhledem k tomu, že EDZ představuje prostředí kontaktu HÚ a jeho inženýrských bariér a geologického prostředí tvořícího přirozenou bariéru HÚ, má charakter EDZ z hlediska proudění podzemní vody významný vliv na bezpečnost HÚ. Vyšší míra porušení EDZ, a tedy vyšší hydraulická vodivost, zvyšuje riziko hydraulického propojení HÚ s konektivní puklinovou sítí, umožňující transport kontaminace v geologické bariéře. Při realizaci je tedy žádoucí rozsah a intenzitu porušení EDZ minimalizovat.

#### **Dostupná data:**

V rámci výzkumu orientovaného na přípravu HÚ RAO probíhá i výzkum EDZ. Charakterizace prostředí EDZ byla realizována v prostředí podzemní laboratoře Bukov (Štaš & Bláha, 2018) nebo v dolu Rožná (Bukovská, a další, 2020). Za využití těchto výzkumů byly popsány charakteristiky EDZ pomocí přímých i nepřímých, laboratorních i in-situ metod. Množství stanovených hydraulických parametrů je ale omezené. V rámci dosavadních hydrogeologických prací, spočívajících hlavně v realizaci hydraulických a transportních modelů potenciálních lokalit HÚ, nebyly vlastnosti EDZ řešeny

**Nejistoty:**

Nejistoty procesu proudění a hydraulických parametrů EDZ plynou z faktu, že vlastnosti EDZ jsou charakteristické vždy pro konkrétní lokalitu a technický postup ražby HÚ. Konkrétní data pro popis proudění tak v současnosti nemohou být k dispozici.

Největší úroveň nejistoty spočívá v kvantifikaci dopadů EDZ na procesy, jež nastanou v delším časovém horizontu v průběhu izolační funkce úložiště (Vavro, Vavro, Souček, & Staš, 2016).

**Reference:**

- BAECHLER, S., LAVANCHY, J. M., ARMAND, G., & CRUCHAUDET, M. (2011). Characterisation of the hydraulic properties within the EDZ: A methodology for consistent interpretation of hydraulic tests. *Physics and Chemistry of the Earth*, 36, 1922-1931.
- BOSSART, P., MEIERAND, P., TRICK, T., MAYOR, J. C., & MOERI, A. (2002). Geological and hydraulic characterization of the excavation disturbed zone in the Opalinus Clay of the Mont Terri Rock Laboratory. *Engineering Geology*, 66, 16-38.
- BOUDREAU, B. (1996). The diffusive tortuosity of fine-grained unlithified sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 60(issue 16), 3139-3142. doi:10.1016/0016-7037(96)00158-5
- BUKOVSKÁ, Z., ŠVAGERA, O., CHABR, T., LEICHMANN, J., SOSNA, K., SOUČEK, K., . . . A KOL. (2020). Získání dat z hlubokých horizontů dolu Rožná - závěrečná zpráva. SÚRAO-TZ454/2020.
- DAMAJ, J., BALLAND, C., ARMAND, G., & VERDEL, T. (2007). Velocity survey of an excavation damaged zone: influence of excavation and reloading. *Rock Physics and Geomechanics in the Study of Reservoirs and Repositories*, 284, 41-54.
- DAVIES, C., & BERNIER, F. (2003). Impact of the excavation disturbed or damaged zone (EDZ) on the performance of radioactive waste geological repositories. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities.
- EBERHARDT, E. (1998). Brittle Rock Fracture and Progressive Damage in Uniaxial Compression. PhD. Thesis, 334.
- ERICSSON, L. O., THORN, J., CHRISTIANSSON, R., HANSSON, K., BUTRON, C., SIGURDSSON, O., & KINNBOM, P. (2015). demonstration project on controlling and verifying the excavation-damaged zone. Experience from the Äspö Hard Rock Laboratory. Technical Report SKB R-14-30, Stockholm.
- FRIEG, B., BLASER, P. C., ADAMS, J., ALBERT, W., DOLLINGER, H., KUHLMANN, U., & LANYON G., W. (1998). Grimsel Test Site. Excavation Disturbed Zone Experiment. Technical Report 98-01.
- GRATHWOHL, P. (1998). Diffusion in natural porous media : contaminant transport, sorption/desorption and dissolution kinetics, by Peter Grathwohl (1. vyd.). London: Kluwer Academic Publishers.
- GREY, M. (1993). International Stripa Project 1980–1992. Overview Volume III. Stockholm: Svensk Kärnbränslehantering AB.
- HUDSON, J. A., & HARRISON, J. P. (1997). *Engineering rock mechanics – an introduction to the*. Elsevier.

- HUDSON, J. A., BACKSTROM, A., RUTQUIST, J., JING, L., & BACKERS, T. (2009). Characterising and modelling the excavation damaged zone in crystalline rock in the context of radioactive waste disposal. *Environmental Geology*, 57, 1275-1297.
- JOHANSSON, M., BACKSTROM, A., FENG, Q., BERGLUND, J., JOHANSSON, M., & OLSSON, M. (2009). Äspö Hard Rock Laboratory. Studies of factors that affect and controls the Excavation Damaged / Disturbed Zone. SKB Report R-09-17, Stockholm.
- LANYON, G. W. (2011). Excavation Damaged Zones Assessment. Fracture Systems Ltd.
- LENORMAND, R., TOUBOUL, E., & ZARCONI, C. (1988). Numerical models and experiments on immiscible displacements in porous media. *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 189, 165-187. doi:10.1017/S0022112088000953
- LEVASSEUER, S., COLLIN, F., DANIELS, K., DYMITROWSKA, M., HARRINGTON, J., JACOBS, E., . . . WENDLING, J. (2021). Initial State-of-the-Art on Gas Transport in Clayey Materials: Deliverable D6.1 of the HORIZON 2020 project EURAD, Workpackage Gas. EC Grant agreement no: 847593.
- OLSSON, M., MARKSTROM, I., PETTERSSON, A., & STRANG, M. (2009). Examination of the Excavation Damaged Zone in the TASS tunnel. SKB R-09-39.
- POSIVA. (2003). ONKALO underground characterization and research programme. Helsinki: Posiva Oy,.
- READ, R. S. (2004). 20 years of excavation response studies at AECL's Underground Research Laboratory. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41, 1251-1275.
- STAŠ, L., & BLÁHA, P. (2018). Vznik a a monitoring EDZ při výstavbě PVP Bukov - závěrečná zpráva. SURAO - TZ351/2019.
- THOMPSON, P., MARTINO, J. B., & SPINNEY, M. H. (1993). Detailed measurements of deformation in the excavation disturbed zone. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1511-1514.
- TSANG, C., BERNIER, F., & DAVIES, C. (2004). Geohydromechanical processes in the Excavation Damaged Zone in crystalline rock, rock salt, and indurated and plastic clays - In the context of radioactive waste disposal. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 42, 109-125.
- VAVRO, M., VAVRO, L., SOUČEK, K., & STAŠ, L. (2016). Shrnutí zahraničních poznatků o vzniku a vývoji EDZ v krystalinických horninách - rešerše. Ostrava: Ústav geoniky AV ČR, v. v. i.

### 7.8.3 Transport radionuklidů

#### Popis:

Výplňový a tlumící materiál musí svými vlastnostmi napomoci splnění následujících bezpečnostních funkcí (viz 3.2)

- Tlumící a výplňový materiál musí svými vlastnostmi zajistit difúzní transport radionuklidů po dostatečně dlouhou dobu
- Použitý materiál inženýrských bariér musí omezit přístup vody a agresivních látek
- Použitý materiál musí zamezit vzniku preferenčních cest

Procesy transportu v inženýrských bariérách nastávají až po degradaci UOS. Radionuklidy uvolněné z UOS dále difundují přes materiály inženýrských bariér směrem k EDZ a horninovém prostředí.

Základním předpokladem splnění bezpečnostních funkcí, že po dostatečně dlouhou dobu je transport radionuklidů úložištěm řízen především difúzí (Vokál et al. 2010). V důsledku degradace cementových materiálů však lze předpokládat jeho postupná degradace, zvýšení propustnosti a po určité době (např. dle modelu Neal 1994, následně použitého pro modelování dlouhodobé bezpečnosti ÚRAO Brattství Dobrev et al. 2017 po 10 000 letech) je propustnost cementových materiálů stejná jako okolní hornina a řídí se především advekcí.

Radionuklidy mohou být transportovány především v kapalně fázi (viz FEP 7.7.2), jako plyn (viz FEP 0) či teoreticky v pevné fázi (koprecipitace s jinými minerály; viz FEP 7.4.2.2 ).

- **Difúze**

Radionuklidy migrují ve směru nižšího chemického potenciálu. Difúze rovněž způsobuje rozptýlení transportovaných látek a je známa jako „hydrodynamická disperze“ (v kombinaci s mechanickou disperzí). K difúzi dochází v těch částech materiálu, kde nedochází k advektivnímu transportu.

- **Advekce**

Rozpuštěné látky v roztoku nebo vázané na koloidy se pohybují s masou podzemní vody. Heterogenita v transportních cestách a velikosti pórů vede k rozdílům v rychlosti proudění a tím k rozptýlení transportovaných látek („mechanická disperze“). Tento proces probíhá hlavně v puklinách.

- **Retardační procesy**

Radionuklidy reagují s okolním prostředím a mohou se vázat na jeho složky. V důsledku toho může dojít jednak ke zpomalení rychlosti transportu radionuklidů v porovnání s rychlostí toku podzemní vody v puklině, jednak naopak vazbě na složky podzemní vody (ligandy, koloidy, organické látky aj.), které zvyšují mobilitu prvku ve srovnání s normální stavem.

- **Kombinované procesy**

(termální, chemická a elektrická osmóza, tepelná difúze, hyperfiltrace a elektroforéza aj.). Tyto procesy však nemají takový význam jako předcházející.

#### Vlastnosti látky

- velikost atomu/molekuly,
- náboj,
- chemické vlastnosti,
- redoxní chování,
- precipitace (srážení),
- tvorba komplexů,
- rozpustnost
- sorpce
- difúze

### Vlastnosti prostředí/materiálu

Z vlastností materiálu, které jsou důležité pro migraci látek v prostředí výplňových materiálů, je možno specifikovat následující:

- minerální a chemické složení,
- hustota materiálu
- pórovitost,
- struktura a charakter pórů,
- přítomnost amorfních složek (vliv na dostupný povrch, přístupný k sorpci)
- propustnost,
- složení pórové vody/podzemní vody

### **Vliv na dlouhodobou bezpečnost:**

Vliv na dlouhodobou bezpečnost je zásadní. Způsob transportu, jeho rychlost a míra retence či zpomalení v daném materiálu hraje klíčovou roli pro výslednou efektivní dávku v biosféře.

### **Dostupná data:**

Transportem radionuklidů v prostředí inženýrských barier v českém prostředí se zabývala celá řada prací – Vokál et al. (2001-2003); Vokál et al. (2008); Trpkošová et al. (2013); Hofmanová et al. (2019), Večerník et al. (2019).

### **Nejistoty:**

Popis transportu radionuklidů je zatížen celou řadou nejistot, a to

- jsou vlastnosti, kterými popisujeme chování IB, významné pro transport, skutečně reprezentativní?
- jsou vlastnosti, kterými popisujeme chování UIB, významné pro transport, skutečně reprezentativní pro celý objem IB?
- jsou předpoklady dlouhodobého vývoje vlastností, významných pro transport, správné?
- jsou principy, kterými popisujeme transportní procesy, skutečně všeobecně správné?

### **Reference:**

VOKÁL A. (2001–2003): Zavedení metod hodnocení inženýrských barier, (arch. č. SÚRAO 1/01, 32/01, 7/02, 8/02, 2/03, 4/03, 5/03, 23/02, 25/03, 33/03, 35/03)

VOKÁL A. ET AL. (2008): Výzkum procesů pole blízkých interakcí hlubinného úložiště VJP a vysoce aktivních odpadů, 2006–2008, (arch. č. SÚRAO 18/08, 21/07,32/06)

HOFMANOVÁ E., ČERVINKA R., VOPÁLKA D., BABOROVÁ L., BRÁZDA L., PECKOVÁ A., VETEŠNÍK A., VIGLAŠOVÁ E., VAŠÍČEK R. (2019): Transport radionuklidů z úložiště / vstupní parametry a procesní modely pro hodnocení transportu radionuklidů přes inženýrské bariéry: Závěrečná zpráva. – MS SÚRAO, ZZ 420/2019, Praha.

TRPKOŠOVÁ D., DOBREV D., GONDOLLI J., HAVLOVÁ V., HOKR M., MARKOVÁ L., VAŠÍČEK R. (2013): Metodiky celkového posouzení bezpečnosti hlubinného úložiště. Závěrečná zpráva projektu FR-TI1/362, Zpráva ÚJV č. 14281, 2013, 151 str.

VEČERNÍK P., DRTINOVÁ B., BÁRTA, J., BRÁZDA L., GALEKOVÁ E., HAVLOVÁ V., HOFMANOVÁ E., KAŠPAR V., KITNEROVÁ J., KOLOMÁ K., ROSENDORF, T., VOPÁLKA D. (2019c): Transportní vlastnosti cementových materiálů – závěrečná zpráva. – MS SÚRAO, TZ 430/2019.

### 7.8.3.1 Transport koloidů

#### Popis:

Koloidy jsou definovány jako částice suspendované ve vodě s průměrem menším než 10  $\mu\text{m}$  (10–6 m) v průměru (McCarthy a Zachara, 1989). Při této malé velikosti jsou gravitační síly malé ve srovnání s jinými silami, takže částice mohou zůstat v suspenzi po velmi dlouhou dobu. I když jsou koloidy malé, jsou stále mnohem větší než většina molekul, které jsou v řádu 10–10 až 10–8 m.

Při uvolnění radionuklidů z odpadu se mohou tvořit tzv. pravé koloidy radionuklidů. Severa a Bár (1985) definují pravé koloidy radionuklidů jako těžko rozpustné sloučeniny radionuklidu koloidního charakteru. Např. ve vodných roztocích solí radionuklidu trojmocných a vícemocných kovů dochází k hydrolyze za tvorby hydroxidu příslušného radionuklidu – kovu. Součiny rozpustnosti těchto hydroxidů mají velmi nízké hodnoty, např. pro Y/OH/, asi 10-24, pro Ce/OH/, asi 10-48, pro Zr/OH/, asi 10-51 a pro Nb/OH/ 10-71. Následkem toho, i když je radionuklid zmíněných trojmocných a vícemocných kovů ve stopové koncentraci, může být dosaženo součinu rozpustnosti pro jeho hydroxid, který vypadne z roztoku ve formě koloidních částic. Typicky jsou náchylné ke tvorbě pravých koloidů ty prvky, které mohou hydrolyzovat, aktinidy, či výše zmíněné Ce, Zr, Nb, Se. Jejich vlastnostem se věnoval Oloffson et al. (1983). Shrnuje data pro řadu radionuklidů s tím, že většina radiokoloidních forem je stabilní do pH11. Nad tuto hodnotu je stabilních jen několik forem (např. Am, Eu). Wold (2010) udává rovněž data pro některé z pravých koloidů.

(Pseudo) koloidy (koloidy jiné než pravé koloidy radionuklidů) se mohou skládat z malých minerálních fragmentů, bakterií, virů, kapiček organických látek a větších organických molekul. Některé koloidy vznikají chemickými reakcemi, které srážejí minerály; jiné jsou generovány povrchovými reakcemi, které disagregují a uvolňují malé částice z povrchů.

Koloidy jsou často mobilní, unášené podzemní vodou. Toto je další potenciální mechanismus migrace kontaminantů. Koloidy mají velký poměr plochy povrchu k hmotnosti, takže mají potenciál poskytovat značné množství sorpce.

Vliv na transport radionuklidů v prostředí HÚ má smysl zahrnout jen v případě splnění těchto podmínek (Červinka et al. 2015b):

- koloidy musí být v podzemní vodě přítomné,
- koloidy musí být v podzemní vodě stabilní,
- se musí na bentonitové koloidy vázat.

Čas pro disociaci radionuklidu z koloidu musí být významný vzhledem k času zdržení podzemní vody v prostředí HÚ

I degradací cementu mohou vzniknout koloidy jak na rozhraní cement/hostitelská hornina, tak na okrajích hyperalkalického kontaminačního mraku, vznikajícího vyluhováním cementových pórových vod (Alexander a Moeri 2007). Jak však píše jak Swanton a Alexander (2009), tak

Alexander and Moeri (2003) a Alexander et al. (2007), množství cementových koloidů bude pravděpodobně malé a pro hodnocení bezpečnosti nevýznamné.

**Vliv na dlouhodobou bezpečnost:**

Vznik koloidů a jejich transport, včetně navázaných radionuklidů, je považována za významný. Byl např. zařazen do normálního scénáře při hodnocení bezpečnosti ve Vokál et al. (2010a,b).

**Dostupná data:**

Diskuze na toto téma je vedena v pracích Kahoun et al (2011) a Vokál et al. (2010a,b). Vznikem koloidů a jejich transportu se věnoval ve svých pracích Červinka et al (2014, 2015a,b).

**Nejistoty:**

Nejistoty chemické eroze bentonitu jsou velmi dobře shrnuty v práci Červinka et al. (2015b). Je vhodné ověřit závislost eroze bentonitu na rychlosti proudění vody, velikosti pukliny a obsahu kationtů v podzemní vodě.

**Reference:**

ABRAHAMSEN L. ET AL. (2015): A Review of Anthropogenic Organic Wastes and Their Degradation Behaviour. Deliverable D1.1: EU projektu MIND Ref. Ares(2015)5828843 - 14/12/201. ,

ALEXANDER R., CLARK, I., DEGNAN, P., ELIE, M., KAMEI, G., KHOURY, H., MÄDER, U., MILODOWSKI, A., PEDERSEN, K., PITY, A.F., SALAMEH, E., SMELLIE, J., TECHER, I., TROTIGNON, L. (2007). Cementitious natural analogues: safety assessment implications of the unique systems in Jordan. Dept. of Cell and Molecular Biology Box. 463.,

ALEXANDER W.R. AND MOERI A. (2003): Cementitious colloids: integration of laboratory, natural analogue and in situ field data. Goldschmidt Conference Abstracts, Geochim. Cosmochim. Acta, 18(S1): A11, 159-160.,

ČERVINKA R., GONDOLLI J., VIDENSKÁ K. (2014): Shrnutí dosažených výsledků v roce 2014. Zpráva projektu: Eroze bentonitu a její dopad na dlouhodobé chování inženýrských bariér hlubinného úložiště a transport radionuklidů. ÚJV Řež, a. s. ÚJV-14398.

ČERVINKA R., GONDOLLI J., VIDENSKÁ K. (2015A): Shrnutí dosažených výsledků v roce 2015. Zpráva projektu: Eroze bentonitu a její dopad na dlouhodobé chování inženýrských bariér hlubinného úložiště a transport radionuklidů. ÚJV Řež, a. s. ÚJV-14535.

ČERVINKA R., GONDOLLI J., VIDENSKÁ K. (2015B): Eroze bentonitu a její dopad na dlouhodobé chování inženýrských bariér hlubinného úložiště a transport radionuklidů. Závěrečná zpráva projektu. ÚJV Řež, a. s. ÚJV-Z44495.

DEGUELDRE C., GRAUER R. AND LAUBE A. (1996/II); Colloid properties in granitic groundwater systems. II: Stability and transport study. Applied Geochemistry. Vol 11. pp. 697-710. Elsevier Science Ltd.,

DEGUELDRE C., PFEIFFER H.-R., ALEXANDER W. WERNLI B. AND BREUTSCH R. (1996/I); Colloid properties in granitic groundwater systems. I: Sampling and characterisation. Applied Geochemistry, Vol 11. pp. 677-695. Elsevier Science Ltd.,



- DOBREV D., TRPKOŠOVÁ D., HUSTÁKOVÁ H., HAVLOVÁ V. (2017): Studie uzavření ÚRAO Bratrství – D. Bezpečnostní hodnocení. Zpráva pro SÚRAO, 2017.
- LERMAN A. (1979); GEOCHEMICAL PROCESS, WATER AND SEDIMENT ENVIRONMENTS. WILEYINTERSCIENCE PUBLICATION, MCCARTHY, J.F. AND ZACHARA, J.M. (1989) Subsurface Transport of Contaminants. Environmental Science & Technology, 23, 496-502.,
- Neal F. (1994) Modelling of the near field chemistry of SMA repository at the Wellenberg site. MS, PSI Bericht 94-18, Paul Scherrer institute, Villingen, CH.
- OLOFSSON, U., ALLARD, B., BENGTSSON, M., TORSTENFELT, B., & ANDERSSON, K. (1983). Formation and properties of actinide colloids (SKBF-KBS-TR--83-08). Sweden,
- SEVERA J., BĀR J. (1985): Kontaminace radioaktivními látkami a dekontaminace. Československá komise pro atomovou energii, 1985; INIS-mf-10587.,
- SWANTON S, ALEXANDER A. (2009): Review of the behaviour of colloids in the near field of a cementitious repository. Report for NDA. Serco Assurance, NR3213/008 NP02222, Harwell, Great Britain. ,
- VOKÁL A., HAVLOVÁ V., HERCÍK M., LANDA J., LUKIN D., VEJSADA J. (2010): Aktualizace referenčního projektu hlubinného úložiště radioaktivních odpadů v hypotetické lokalitě. III. Etapa. Studie zadávací bezpečnostní zprávy. C. Dokumentační část. C.2 Hodnocení dlouhodobé bezpečnosti HÚ. Zpráva ÚJV Řež, a.s. EGP 5014-F-101420, 12/2010.
- WOLD S. (2010): Sorption of prioritized elements on montmorillonite colloids and their potential to transport radionuclides. SKB report TR 10-20, Stockholm, Sweden.

#### 7.8.4 Ovlivnění dlouhodobými přírodními procesy

Z hlediska dlouhodobého vývoje HÚ je nutné brát v potaz dlouhodobé procesy Země, které mohou ovlivnit stav a bezpečnost úložiště. Mezi tyto dlouhodobé změny patří:

- Klimatické změny,
- Denudace a eroze.

Důsledky těchto změn mohou ovlivnit stav HÚ. Může dojít k

- mechanickému porušení nebo deformaci inženýrských bariér,
- změně vodního režimu,
- změně transportních cest.

Klimatické změny na v důsledek povrchu mohou vést pouze omezeně ke změnám v hloubkách kolem 500 m v granitovém prostředí. Tyto změny však mohou být během statisíců let velmi významné. Během této doby dojde zejména k pravidelnému střídání dob ledových. Základním předpokladem normálního scénáře úložiště je, že úložný systém v hloubce několika desítek až stovek metrů pod povrchem nebude výrazně ovlivněn klimatickými změnami probíhajícími na povrchu. (Vokál a kol., 2010).

Pravděpodobně jednou z nejvýraznějších vlivů klimatických změn je vliv klimatu na hydrologii v příporchových vrstvách. Výrazná změna klimatu může způsobit změnu množství vody protékající úložištěm. Vlivem této změny může dojít ke zvýšení či ke snížení koncentrace radionuklidů v příporchových vrstvách v důsledku snížení či zvýšení jejich ředění ostatními

zdroji podzemní vody. (Vokál a kol., 2010). Další možností je intruze vod s vysokým obsahem kyslíku a nízkou mineralizací, tak jak to mu bývá v předpolí ledovce (uvažováno zejména ve Švédsku a ve Finsku),

Nývlt a Dobrovolný (2015) ve své studii zpracovali tři možné scénáře vývoje Českého masivu, a to

I) **scénář maximálního ochlazení a vysušení klimatu** odpovídající vrcholným pleniglaciálním podmínkám ukazuje na průměrné roční teploty vzduchu v mimohorských oblastech našeho území nejčastěji v rozpětí ~ -7 až -2 °C a odpovídaly tak dnešní Vysoké Arktidě nebo okrajové části Antarktidy. Zároveň jsou tato období také nejsuššími obdobími v rámci kvartérních klimatických cyklů, kdy byly průměrné roční srážky ve středoevropském prostoru v rozpětí ~250–350 mm. Z pohledu trvalého uložení radioaktivního materiálu v hloubkách vyšších než 300–400 m jsou podmínky odpovídající scénáři maximálního ochlazení a vysušení klimatu během vrcholných pleniglaciálních podmínek velmi vhodné, protože díky tvorbě permafrostu dojde k oddělení povrchového hydrologického a hlubinného hydrogeologického oběhu vod a permafrost představuje přirozenou bariéru pro možnou kontaminaci povrchu uloženými radioaktivními látkami.

II) **scénář maximálního oteplení a zvlhčení klimatu** odpovídající vrcholným interglaciálním (hypsietermiálním) podmínkám ukazuje na průměrné roční teploty v mimohorských oblastech ~8–11 °C a průměrné roční úhrny srážek v intervalu ~800–900 mm.. Naopak zvlhčení klimatu o 20–30 % oproti dnešku způsobí vyšší infiltraci teplejších povrchových vod do hlubších kolektorů.

III) **scénář antropogenně podmíněného oteplení klimatu** odpovídající současným modelům s dominantním vlivem člověka na budoucí chod klimatu planety Země ukazuje na dominantně interglaciální podmínky v nejbližších 50 tisících letech a následný nástup plošného zalednění na severní polokouli. Zásadní neznámou je však působení člověka, a to emise skleníkových plynů, především CO<sub>2</sub>

V žádném ze tří výše zmíněných scénářů budoucího vývoje nelze v nejbližších 100 tisících letech počítat s přímým vlivem ledovce na vybrané lokality pro hlubinného úložiště, protože nebyly v posledním miliónu let nikdy zaledněny a limitní scénáře tuto možnost také vylučují (Nývlt a Dobrovolný 2015).

Denudace neboli snížení povrchu země vlivem eroze může změnit délku transportní cesty radionuklidů přes granitového prostředí. Za určitých podmínek rychlost denudace může být poměrně značná, jak vyplynulo z rešeršních prací vypracovaných v rámci projektu „Vzdálené interakce“ (Rukavičková, 2008). (Vokál a kol., 2010). Je však výrazně závislá na geomorfologii lokality umístění HÚ (Hroch et al. 2015).

Ve scénáři pro aridní cyklus (chladné období) lze předpokládat menší vliv aluviální eroze spojené se zahlubováním říčních údolí, avšak lze očekávat větší projevy periglaciálních jevů. V tomto období bude uplatňováno zejména mechanické zvětrávání horninového prostředí se vznikem mrazových srubů a ústupových svahů. Ve větší míře bude uplatněna plošná eolická eroze. Rychlosti eroze nebudou tak vysoké jako v humidním cyklu, ale je třeba počítat se vznikem permafrostu, který v geologické minulosti dosahoval u nás hloubky v řádech prvních stovek metrů (např. Zeman a Růžičková 1995; Hroch et al. 2015). V aridním cyklu nelze počítat s výraznou erozní činností ledovce (viz Nývlt a Dobrovolný 2015).

Ve scénáři pro humidní cyklus se předpokládá, že změny na vliv morfologie bude mít zejména aluviální eroze doprovázená prohlubováním erozních údolí a jejich rozšiřováním proti proudu toků. Hodnoty prohloubení dnešních erozních struktur by měly odpovídat rozmezí hodnot, které je v literatuře uváděno pro předešlá geologická období. Je nutné počítat, že rozmezí těchto hodnot se může pohybovat v široké škále v závislosti na lokálních podmínkách a neotektonické aktivitě (Hroch et al. 2015).

### **Vliv na dlouhodobou bezpečnost:**

#### Mechanické porušení nebo deformace inženýrských bariér

Mechanické porušení bufferu by mělo za následek tvorbu preferenčních cest, případně změnu prostorového uspořádání systému.

#### Změna vodního režimu

Změna koncentrací rozpuštěných látek, změna či vznik gradientů způsobujících transport látek.

Intruze vod o jiném složení (nízká mineralizace, vysoký obsah O<sub>2</sub>).

#### Změna transportních cest

Vznik nových transportních cest, změna geometrie stávajících transportních cest, fyzikální či geochemické charakteristiky, popř. směr transportu.

### **Dostupná data:**

Predikce dlouhodobého klimatického vývoje v České republice (Nývlt a Dobrovolný 2015).

Hodnocení stability území (Hroch et al. 2015).

Změna transportních cest v důsledku eroze (Rukavičková, 2008).

### **Nejistoty:**

Nejistoty spojené s vyhodnocením vlivu vývoje klimatu v příštích 100 tisících letech jsou jen špatně kvantifikovatelné. Zásadním nepředpověditelným prvkem je budoucí chování lidské společnosti, která již nyní zásadní měrou klima planety Země ovlivňuje geologicky bezprecedentním vypouštěním radiačně aktivních plynů, a to nejen CO<sub>2</sub>. Antropogenně podmíněné koncentrace skleníkových plynů v atmosféře budou zásadní měrou ovlivňovat chování celého klimatického systému a jejich predikovatelnost se blíží nule (Nývlt a Dobrovolný 2015).

Stanovené hodnoty předpokládané rychlosti erozních a denudačních procesů jsou zatíženy značnými nejistotami, které spočívají v heterogenitě a nedostatku relevantních dat. (Hroch et al 2015). Nejistoty dále vyplývají zejména z nízkého počtu údajů o stáří zachovaných povrchů a teras. Údaje o rychlosti zahlubování drenážního systému na základě datování pomocí izotopů <sup>10</sup>Be a <sup>26</sup>Al jsou dostupné ve velmi omezeném počtu jen z širší oblasti Českého masivu. Další nejistotou představuje problematika recentních pohybů na zlomech, které předurčují změny reliéfu a rychlosti erozních procesů (Hroch et al 2015).

**Reference:**

- HROCH T., PAČES T., HOŠEK, J., NÝVLT, D., ŠEBESTA, J., HEJTMÁNKOVÁ, P. (2015b): Erozní stabilita lokalit. Závěrečná zpráva. – MS SÚRAO ZZ 25/2015, Praha.
- NÝVLT D., DOBROVOLNÝ P. (2015b): Klimatická stabilita území. Závěrečná zpráva. – MS SÚRAO ZZ 22/2015, Praha. – MS SÚRAO TZ 232/2018, Praha
- RUKAVIČKOVÁ L. (2008). Příprava vstupních geologických dat (v širším slova smyslu) pro matematické modelování transportu a geochemické interakce v horizontu stovek tisíců let, DZZ 4.2, zpráva pro SÚRAO v rámci projektu „Výzkum procesů pole vzdálených interakcí“ Říjen 2008
- VOKÁL A., HAVLOVÁ V., HERCÍK M., LANDA J., LUKIN D., VEJSADA J. (2010): Aktualizace referenčního projektu hlubinného úložiště radioaktivních odpadů v hypotetické lokalitě. III. Etapa. Studie zadávací bezpečnostní zprávy. C. Dokumentační část. C.2 Hodnocení dlouhodobé bezpečnosti HÚ. Zpráva ÚJV Řež, a.s. EGP 5014-F-101420, 12/2010.
- ZEMAN, A., RŮŽIČKOVÁ, E. (1995): Position of fluvial loams on the flood plain in the quaternary sedimentation cycle. –Pages I, 170.

## 8 Události

### 8.1 Důsledky přírodních událostí

#### Popis:

Zásadní událostí, která může ovlivnit stav a bezpečnost úložiště, jsou seismické a tektonické změny.

Důsledkem pak může být:

- stříh úložného místa s UOS,
- mechanické porušení inženýrských bariér,
- změna vodního režimu,
- změna transportních cest.

Vliv zemětřesení či jiných tektonických událostí může mít vliv na řadu parametrů normálního scénáře vývoje úložiště, například změnu toku podzemní vody či vznik nových preferenčních cest (Vokál et al. 2010).

#### Dostupná data:

V nejstarším historickém období do roku 1899 bylo v Českém masivu dokladováno v kategorii silná a střední zemětřesení bylo dokladováno 14 zemětřesení. Nejintenzivnější zemětřesení (kategorie silné) je popsáno z 15. září 1590 z oblasti Niederösterreich (Rakousko). Jeho uváděná intenzita je  $I_0 = 8-9$  ( $M_w = 6,06 \pm 0,47$ ). Na základě zpracovaných rešerší a numerického modelování ve studii Kaláb (2015) lze konstatovat, že vliv seismických událostí (vibrací) na stabilitu horninových masivů v hloubce 500 m a na úložné prostory v horizontu 100 000 let v Českém masivu bude velmi nízký. To potvrzují i výsledky Málka et al. (2018). Špičkové hodnoty vibrací zemětřesení (PGA, PGV nebo PGD) se snižují s hloubkou, tento pokles je rychlejší v mělkých vrstvách oproti hlubším partiím. Snížení amplitudy v závislosti na hloubce je ovlivněno velikostí magnitudy zemětřesení a lokální geologickou stavbou. Obecně platí, že poškození v podzemních stavbách (dolech) je nevýznamné, pokud se tyto nacházejí v pevných (únosných) a nevětralých horninách. Největší škody vznikají v podzemních stavbách nacházejících se v nezkonsolidovaných nebo málo pevných horninách. To je následek snížení účinků vibrací v pevných horninách, nezkonsolidované horniny jsou mnohem náchylnější k poškození následkem vibrací (Kaláb 2015).

V těchto predikcích však není zahrnuta tzv. indukovaná seismika, která může vzniknout během budování a provozu HÚ. Před zahájením báňských činností je nemožné stanovit, jak silná indukovaná seismická vznikne (Málek et al. 2018).

#### Vliv na dlouhodobou bezpečnost:

##### Mechanické porušení:

Mechanické porušení UOS, stříh úložného místa je řešen ve zprávě (Pospíšková et al, 2022)

Mechanické porušení bufferu by mělo za následek tvorbu preferenčních cest (dojde-li k události v nenasyčeném stavu), případně změnu prostorového uspořádání systému.

### Změna vodního režimu:

Změna koncentrace rozpuštěných látek, změna či vznik gradientů způsobujících transport látek.

Intruze vod o jiném složení (nízká mineralizace, vysoký obsah O<sub>2</sub>).

### Změna transportních cest:

Vznik nových transportních cest, změna geometrie stávajících transportních cest, fyzikální či geochemické charakteristiky, popř. směr transportu.

### **Nejistoty:**

Dosud málo probádanou otázkou je změna seismického režimu v důsledku lidské činnosti. Po odlesnění rozsáhlých ploch na kontinentech a dalších změnách na zemském povrchu dochází ke změnám v teplotním kolísání v přípovrchových horninových vrstvách. Vzhledem k teplotní roztažnosti hornin může toto kolísání způsobovat dodatečné tektonické napětí. Znamé jsou projevy indukované seismicity v důsledku výstavby přehrad, těžby nerostných surovin nebo využívání geotermální energie. (Málek et al, 2018).

### **Reference:**

KALÁB Z., JECHUMTÁLOVÁ Z., LEDNICKÁ M., ŠÍLENÝ J. (2015): Seismicita na území ČR a v příhraničních oblastech. Závěrečná zpráva. – MS SÚRAO ZZ 26/2015, Praha.

MÁLEK J., PRACHAŘ I., VACKÁŘ J., MAZANEC M. (2018) Pravděpodobnostní hodnocení seismického ohrožení lokalit pro HÚ, MS- SÚRAO 232/2018, Praha.

VOKÁL A., HAVLOVÁ V., HERCÍK M., LANDA J., LUKIN D., VEJSADA J. (2010): Aktualizace referenčního projektu hlubinného úložiště radioaktivních odpadů v hypotetické lokalitě. III. Etapa. Studie zadávací bezpečnostní zprávy. C. Dokumentační část. C.2 Hodnocení dlouhodobé bezpečnosti HÚ. Zpráva ÚJV Řež, a.s. EGP 5014-F-101420, 12/2010.

## **8.2 Důsledky činnosti člověka**

### **Popis:**

Druhou skupinou událostí jsou možné důsledky lidské činnosti. Jde tedy o úmyslnou či neúmyslnou intruzi do oblasti HÚ.

Úložný systém může být ovlivněn v budoucnosti zejména lidskou činností, tj. například prováděním hlubinných vrtů na území užší lokality za jakýmkoliv účelem. Pravděpodobnost provádění těchto vrtů je značně snížena kritérii pro výběr lokality, tj. zejména tím, že by na lokalitě neměly být významné zdroje surovin či vody. Přesto v horizontu tisíců let není možno vyloučit, že dojde k provádění hlubinných vrtů. (Vokál a kol., 2010).

### **Vliv na dlouhodobou bezpečnost:**

Poškození UOS v době, kdy UOS plní svou zádržnou funkci. Popsáno ve zprávě (Pospíšková et al, 2022)

Vytvoření preferenční cesty pro migraci radionuklidů.

**Dostupná data:**

Pravděpodobnost této události je velmi malá a v současné době ani ve světě nejsou vyjasněny metodiky, jak ji řešit a zda ji vůbec řešit. Kvantifikace tohoto scénáře je proto poměrně obtížná.

**Nejistoty:**

Predikce budoucího chování lidstva.

Možná ztráta informací o hlubinném úložišti (OECD/NEA 2019).

**Reference:**

POSPÍŠKOVÁ I., DOBREV D., FRÝBORT J., HAVLOVÁ V., VAŠÍČEK R., KOBYLKA D., BÍLÝ T., RATAJ J., FRÝBORTOVÁ L., HOFFMANOVÁ E., VEČERNÍK P., VOZÁR M., FIEDLER F., SVOBODA J. (2022): Analýza FEPs UOS s VJP. MS SÚRAO 617/2022.

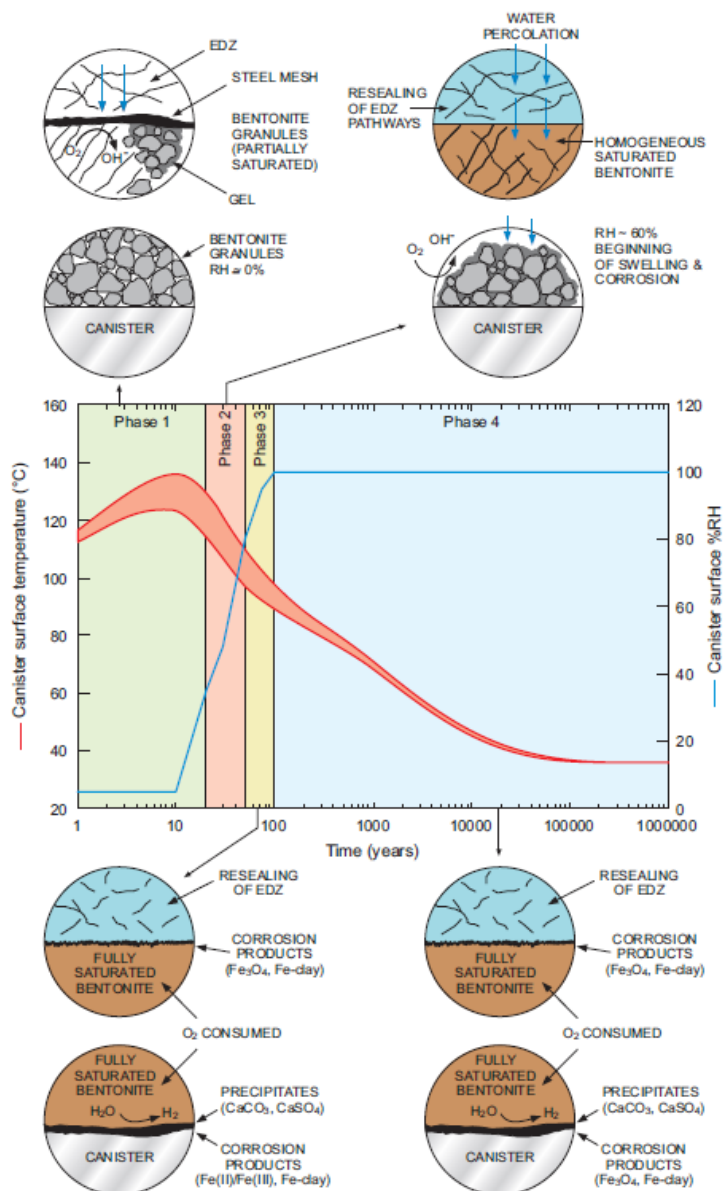
OECD/NEA (2019): Preservation of Records, Knowledge and Memory (RK&M) Across Generations, Final Report of the RK&M Initiative, OECD/NEA No. 7421, Paris.

VOKÁL A., HAVLOVÁ V., HERCÍK M., LANDA J., LUKIN D., VEJSADA J. (2010): Aktualizace referenčního projektu hlubinného úložiště radioaktivních odpadů v hypotetické lokalitě. III. Etapa. Studie zadávací bezpečnostní zprávy. C. Dokumentační část. C.2 Hodnocení dlouhodobé bezpečnosti HÚ. Zpráva ÚJV Řež, a.s. EGP 5014-F-101420, 12/2010.

## 9 Zastoupení procesů v jednotlivých fázích vývoje úložiště

Vývoj podmínek v úložišti po uzavření prochází několika fázemi. Podmínky jsou formovány především vývojem tepelného pole tepla generovaného VJP a prouděním podzemní vody.

Předpokládaný vývoj úložiště v čase je znázorněn na následujícím obrázku. Vývoj úložiště je rozdělen do čtyř fází, charakterizovaných změnou termo-hydraulických podmínek.



Evolution of temperature and relative humidity (RH) with time and the expected corrosion products and processes at the canister surface (lower diagrams) and at the outer bentonite/mesh/Opalinus Clay interface (upper diagrams).

EDZ refers to the excavation-damaged zone in the Opalinus Clay (Source: Nagra, based on Senger and Ewing 2008).

Obr. 28 Vývoj teploty a saturace bentonitu v čase (Zdroj: Landold et al. 2009)



Období, ve kterých jsou analyzovány procesy v rámci tohoto dokumentu, vychází z výše uvedeného zdroje.

Nicméně během analýzy procesů bylo rozhodnuto, s ohledem na vývoj podmínek v úložišti, tato období rozdělit poněkud podrobněji. Pro porovnání je uvedeno, jak odpovídají členění v (Landhold et al. 2009).

### **Období 1**

- Ihned po uložení. UOS je zavezen do ukládacího vrtu, obklopen tlumící bariérou/bufferem (kompaktovanými bloky nebo peletami), vyplněny spáry bentonitem.
- Aerobní prostředí.
- Zvýšená teplota vlivem generace tepla z VJP.
- Bez přítomnosti vody (s výjimkou počáteční vlhkosti v bentonitu).

*Pozn: Fáze 1 dle členění v (Landold et al. 2009).*

### **Období 2**

- Po nějaké době po uložení.
- Anaerobní prostředí.
- Zvýšená teplota vlivem generace tepla z VJP.
- Bez přítomnosti vody (s výjimkou počáteční vlhkosti v bentonitu).

*Pozn: Fáze 1 dle členění v (Landold et al. 2009).*

### **Období 3**

- Anaerobní prostředí.
- Pokles teploty, ale stále ještě tepelně ovlivněné.
- Částečná saturace vodou.

*Pozn: Fáze 2 dle členění v (Landold et al. 2009).*

### **Období 4**

- Anaerobní prostředí.
- Pokles teploty, ale stále ještě tepelně ovlivněné.
- Plná saturace

*Pozn: Fáze 3 dle členění v (Landold et al. 2009).*

### **Období 5**

- Vzdálené časové období.
- Anaerobní prostředí.
- Okolní teplota.
- Plná saturace
- UOS stále plní svou funkci, není poškozen tak, aby došlo k úniku radionuklidů.

*Pozn: Fáze 4 dle členění v (Landold et al. 2009).*

## Období 6

- Vzdálené časové období.
- Anaerobní prostředí.
- Okolní teplota.
- Plná saturace
- UOS stále neplní svou funkci, je poškozen, radionuklidy mohou migrovat do okolního prostředí.

*Pozn: Fáze 4 dle členění v (Landold et al. 2009).*

### Reference:

LANDOLT D., DAVENPORT A., PAYER J., SHOESMITH D. (2009): A Review of Materials and Corrosion Issues Regarding Canisters for Disposal of Spent Fuel and High-level Waste in Opalinus Clay. Technical Report 09-02. NAGRA, Switzerland

BENTONIT	Období 1) hned po uložení. Tedy zvýšená teplota, aerobní prostředí, bez přítomnosti vody	Období 2) po nějaké době od uložení. Tedy anaerobní prostředí, vliv teploty, bez přítomnosti vody	Období 3) Anaerobní prostředí, vliv teploty, částečná saturace vodou	Období 4) Anaerobní prostředí, stále zvýšená teplota, plná saturace	Období 5) vzdálené časové období. Tedy anaerobní prostředí, okolní teplota, saturace vodou (nepoškozený UOS)	Období 6) vzdálené časové období. Tedy anaerobní prostředí, okolní teplota, saturace vodou (PO POŠKOZENÍ UOS)
Transport tepla (bentonitem/bufferem)	ano	ano	ano	ano	ne	ne
Transport vody v bentonitu	ano, přesun počáteční vlhkosti	ano, přesun počáteční vlhkosti	ano	ano	ano	ano
Transport plynů v bentonitu	ano, pokud bude vůbec nějaký vznikat/uvolňovat se	ano	ano	ano	ano	ano
Eroze bentonitu mechanická (sufoze)	ne	ne	ano, lokálně?	ano	ano	ano
Bobtnání bentonitu	ano, možnost vlivem redistribuce počáteční vlhkosti	ano, možnost vlivem redistribuce počáteční vlhkosti	ano	ano	ano	ano
Pohyb UOS v bufferu	ne	ne	ano, iniciace s narůstající saturací	ano	ano	ano
Chemické a mineralogické změny (bentonit)	ne	ano, limitovaně	ano	ano	ano	ano
Srážení a rozpouštění minerálních fází	ne	Ano, limitovaně	ano	ano	ano	ano
Illitizace	Ano, limitovaně	Ano, limitovaně	Ano, limitovaně	ano	ano	ano
Alterace korozními produkty	ne	ne	ano	ano	ano	ano
Alterace alkalickými produkty	ne	ne	ano	ano	ano	ano
Změna fází FeI/FeII	ano	ano	ano	ano	ano	ano
Změny minoritních fází, včetně organické hmoty	ne	ne	ano	ano	ano	ano
Chemická eroze (uvolnění koloidů)	ne	ne	ne	ne	ano	ano
Změny vlivem záření	ne	ne	ne	ano	ano	ano
Chemické rovnováhy a kinetiky	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano	ano
Změna chemismu pórové vody (i na rozhraní s horninou)	ne	Ano	Ano	Ano	Ano	ano
Ko-precipitace fází radionuklidů s minerály	ne	ne	ne	ne	Ano	ano
Spotřeba kyslíku	Ano	ne	ne	ne	ne	ne
Interakce plynů	ano, pokud bude vůbec nějaký vznikat/uvolňovat se	ano	ano	ano	ano	ano
Mikrobiální aktivita	ano	ano	ano	ano	ano	ano

Tab. 5 Zastoupení procesů v jednotlivých fázích vývoje úložiště – bentonit (buffer a backfill)

KONSTRUKČNÍ MATERIÁLY	Období 1) hned po uložení. Tedy zvýšená teplota, aerobní prostředí, bez přítomnosti vody	Období 2) po nějaké době od uložení. Tedy anaerobní prostředí, vliv teploty, bez přítomnosti vody	Období 3) Anaerobní prostředí, vliv teploty, částečná saturace vodou	Období 4) Anaerobní prostředí, stále zvýšená teplota, plná saturace	Období 5) vzdálené časové období. Tedy anaerobní prostředí, okolní teplota, saturace vodou (nepoškozený UOS)	Období 6) vzdálené časové období. Tedy anaerobní prostředí, okolní teplota, saturace vodou (PO POŠKOZENÍ UOS)
Chemická interakce a degradace	Ano	Ano	Ano	Ano	Ne, degradováno	Ne, degradováno
Rozpouštění/ srážení (betonové konstrukce)	Ano	Ano	Ano	Ano	Ne, degradováno	Ne, degradováno
Karbonatace (betonové konstrukce)	Ano	Ano	Ano	Ano	Ne, degradováno	Ne, degradováno
Změna mineralogie (betonové konstrukce)	Ano	Ano	Ano	Ano	Ne, degradováno	Ne, degradováno
Produkty degradace betonu	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano, stále působí	Ano, stále působí
Produkce alkalických roztoků (betonové konstrukce)	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano, stále působí	Ano, stále působí
Koroze kovů (betonové konstrukce)	Ano	Ano	Ano	Ano	Ne, degradováno	Ne, degradováno
Koroze kovů - pevné korozní produkty (svorník, železobeton)	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano, stále působí	Ano, stále působí
Koroze kovů - produkce plynů (svorník, železobeton)	Ano	Ano	Ano	Ano	Ne, degradováno	Ne, degradováno
Degradace injektáží	Ano	Ano	Ano	Ano	Ne, degradováno	Ne, degradováno
Produkty degradace injektáží	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano, stále působí	Ano, stále působí
Změna fyzikální vlastností (betonové konstrukce)	Ano	Ano	Ano	Ano	Ne, degradováno	Ne, degradováno
Změna obsahu, distribuce pórů (betonové konstrukce)	Ano	Ano	Ano	Ano	Ne, degradováno	Ne, degradováno

Tab. 6 Zastoupení procesů v jednotlivých fázích vývoje úložiště –konstrukční materiály

TRANSPORTNÍ PROCESY	Období 1) hned po uložení. Tedy zvýšená teplota, aerobní prostředí, bez přítomnosti vody	Období 2) po nějaké době od uložení. Tedy anaerobní prostředí, vliv teploty, bez přítomnosti vody	Období 3) Anaerobní prostředí, vliv teploty, částečná saturace vodou	Období 4) Anaerobní prostředí, stále zvýšená teplota, plná saturace	Období 5) vzdálené časové období. Tedy anaerobní prostředí, okolní teplota, saturace vodou (nepoškozený UOS)	Období 6) vzdálené časové období. Tedy anaerobní prostředí, okolní teplota, saturace vodou (PO POŠKOZENÍ UOS)
Změna speciace radionuklidů v pórové vodě	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ano
Transport radionuklidů v kapalně fázi	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ano
Difúze radionuklidů	ne	ne	ne	ne	Ne	Ano
Adevekce radionuklidů	ne	ne	ne	ne	Ne	Ano
Sorpce radionuklidů	ne	ne	ne	ne	Ne	Ano
Fyzikální retardace	ne	ne	ne	ne	Ne	Ano
Osmóza	ne	Ano, limitovaně	Ano, limitovaně	ano	ano	ano
Transport koloidů v kapalně fázi	Ne	Ne	Ne	Ano	Ano	Ano
Difúze radiokoloidů	ne	ne	ne	ne	Ne	Ano
Adevekce radiokoloidů	ne	ne	ne	ne	Ne	Ano
Sorpce radiokoloidů	ne	ne	ne	ne	Ne	Ano
Transport radionuklidů v plynně fázi	ne	ne	ne	ne	Ne	Ano
Transport korozních produktů	ne	ne	ne	ano	ano	ano

Tab. 7 Zastoupení procesů v jednotlivých fázích vývoje úložiště – transportní procesy

Systémové FEP	Období 1) hned po uložení. Tedy zvýšená teplota, aerobní prostředí, bez přítomnosti vody	Období 2) po nějaké době od uložení. Tedy anaerobní prostředí, vliv teploty, bez přítomnosti vody	Období 3) Anaerobní prostředí, vliv teploty, částečná saturace vodou	Období 4) Anaerobní prostředí, stále zvýšená teplota, plná saturace	Období 5) vzdálené časové období. Tedy anaerobní prostředí, okolní teplota, saturace vodou (nepoškozený UOS)	Období 6) vzdálené časové období. Tedy anaerobní prostředí, okolní teplota, saturace vodou (PO POŠKOZENÍ UOS)
Tepelný vývoj úložiště	Ano	Ano	Ano	Ano	Ne	Ne
Proudění v EDZ	ano, vnější vliv nezávislý na stavu systému	ano, vnější vliv nezávislý na stavu systému	ano, vnější vliv nezávislý na stavu systému	ano, vnější vliv nezávislý na stavu systému	ano, vnější vliv nezávislý na stavu systému	ano, vnější vliv nezávislý na stavu systému
Transport radionuklidů	ne	ne	ne	ne	Ne	Ano
Transport koloidů	ne	ne	ne	Ano	Ano	Ano
Ovlivnění dlouhodobými přírodními procesy	ano, vnější vliv nezávislý na stavu systému	ano, vnější vliv nezávislý na stavu systému	ano, vnější vliv nezávislý na stavu systému	ano, vnější vliv nezávislý na stavu systému	ano, vnější vliv nezávislý na stavu systému	Ano

Tab. 8 Zastoupení procesů v jednotlivých fázích vývoje úložiště – procesy probíhající v celém systému

## **10 Dostupnost a relevance stávajících modelů pro predikci modelování HÚ**

Tabulky, uvedené v této kapitole, uvádí souhrnně procesy, které byly definovány v průběhu prací. Ke každému procesu je uvedeno, zda existuje výpočet nebo model využitelný pro predikci vývoje.

Tab. 9 Modelování procesů v bentonitu – dostupnost modelovacích nástrojů

BENTONIT	Dostupnost modelovacího nástroje	Poznámka
<b>Transport tepla (bentonitem/bufferem)</b>	<p>Viz Hokr a kol., 2022; v přípravě (PBHU2):</p> <p><i>THM chování:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- výzkumné kódy vyvinuté v akademická sféře COMPASS, ROCMAS), CODEBRIGHT, OpenGeoSys, THAMES.</li> <li>- komerční softwary: mutifikální COMSOL; propojení komerčního softwaru TOUGH2, který řeší vícefázové proudění a přenos tepla, ve spojení geomechanickým softwarem FLAC3D. Na Přírodovědecké fakultě UK a Fakultě stavební ČVUT byl vyvinut software SIFEL</li> </ul>	<p>teplo, voda, bobtnání</p> <p>Řeší se obvykle jak o jeden sdružený THM model. Problematika modelování podle laboratorních a in-situ experimentů je poměrně rozsáhlá, vychází se z obecně uznávaných bilančních rovnic a určitá variabilita je u konstitučních vztahů (většinou empirické). Je velké množství výpočetních kódů na podobném principu. Jsou některé kombinace podmínek, kdy jsou otevřené problémy a standardní postupy neposkytují dostatečně přesnou predikci, jsou předmětem zájmu probíhajícího výzkumu. Problémem také může být numerické konvergence silně nelineárních úloh.</p> <p>HOKR M. A KOLEKTIV (2022). Metodiky modelování THMC procesů – shrnutí dosavadních znalostí. Výzkumná podpora pro bezpečnostní hodnocení technického řešení hlubinného úložiště – Hodnocení bariér, Dílčí zakázka Metodika modelování THMC procesů. TZ612/2022. v přípravě</p>
<b>Transport vody v bentonitu</b>	<p>GOLDSIM v rámci hodnocení bezpečnosti (Vokál et al. 2010; Trpkošová et al. 2018)</p> <p>Procesní modely</p> <p>PHREEQC, GOLDSIM (Hofmanová et al. 2018)</p>	<p>teplo, voda, bobtnání</p> <p>Řeší se obvykle jak o jeden sdružený THM model. Problematika modelování podle laboratorních a in-situ experimentů je poměrně rozsáhlá, vychází se z obecně uznávaných bilančních rovnic a určitá variabilita je u konstitučních vztahů (většinou empirické). Je velké množství výpočetních kódů na podobném principu. Jsou některé kombinace podmínek, kdy jsou otevřené problémy a standardní postupy neposkytují dostatečně přesnou predikci, jsou</p>

BENTONIT	Dostupnost modelovacího nástroje	Poznámka
	THM modely – Hokr a kol., 2022; v přípravě (PBHU2 – část 2).	<p>předmětem zájmu probíhajícího výzkumu. Problémem také může být numerické konvergence silně nelineárních úloh.</p> <p>HOKR M. A KOLEKTIV (2022). Metodiky modelování THMC procesů – shrnutí dosavadních znalostí. Výzkumná podpora pro bezpečnostní hodnocení technického řešení hlubinného úložiště – Hodnocení bariér, Dílčí zakázka Metodika modelování THMC procesů. TZ612/2022. v přípravě</p> <p>HOFMANOVÁ E., ČERVINKA R., VOPÁLKA D., BABOROVÁ L., BRÁZDA L., PECKOVÁ A., VETEŠNÍK A., VIGLAŠOVÁ E., VAŠÍČEK R. (2019): Transport radionuklidů z úložiště / vstupní parametry a procesní modely pro hodnocení transportu radionuklidů přes inženýrské bariéry: Závěrečná zpráva. – MS SÚRAO, ZZ 420/2019, Praha</p> <p>VOKÁL A., HAVLOVÁ V., HERCÍK M., LANDA J., LUKIN D., LANDA J. (2010B): Aktualizace referenčního projektu hlubinného úložiště radioaktivních odpadů v hypotetické lokalitě, III. etapa – Hodnocení dlouhodobé bezpečnosti, ÚJV Řež a.s. – divize Energoprojekt Praha, 2010</p> <p>TRPKOŠOVÁ D., HAVLOVÁ, V., DOBREV, D., HUSŤÁKOVÁ, H., GONDOLLI, J., KLAJMON, M., MIRANDA A. N. M., VEČERNÍK P., BUKOVSKÁ Z., RATAJ J., FRÝBORT J., FEJT F., ŠTAMBERG K., VETEŠNÍK, A., VOPÁLKA D., UHLÍK J., GVOŽDÍK L., KRÁLOVCOVÁ J., ŘÍHA J., MARYŠKA J., STEINOVÁ J., STAŠ L. (2018b): Bezpečnostní rozbor dlouhodobé bezpečnosti hlubinného úložiště na lokalitě Kraví hora. Závěrečná zpráva. – MS SÚRAO ZZ 334/2018, Praha.</p>



BENTONIT	Dostupnost modelovacího nástroje	Poznámka
<b>Transport plynů v bentonitu</b>	OpenGeoSys; Přehled viz Hokr a kol., 2022; v přípravě (PBHU2 – část 2).	Fyzikálními principy a rovnicemi navazuje na předchozí bod, ale pro zachycení různých módů transportu plynu v závislosti na množství jsou potřeba složitější modely s rozlišením minimálně dvou fází a dvou složek. Specifickým problémem je modelování průniku plynu doprovázeného náhlým vznikem sítě transportních cest (dilatačních). Tyto modely mohou částečně vysvětlit takto uspořádané laboratorní experimenty, ale nebyly dosud schopny predikce v in-situ měřítku.  HOKR M. A KOLEKTIV (2022). Metodiky modelování THMC procesů – shrnutí dosavadních znalostí. Výzkumná podpora pro bezpečnostní hodnocení technického řešení hlubinného úložiště – Hodnocení bariér, Dílčí zakázka Metodika modelování THMC procesů. TZ612/2022. v přípravě
<b>Eroze bentonitu mechanická (sufoze)</b>		Řešeno pouze experimentálně v Červinka et al. (2015)
<b>Bobtnání bentonitu</b>	Viz (T)HM modely;	teplo, voda, bobtnání  Řeší se obvykle jak o jeden sdružený THM model. Problematika modelování podle laboratorních a in-situ experimentů je poměrně rozsáhlá, vychází se z obecně uznávaných bilančních rovnic a určitá variabilita je u konstitučních vztahů (většinou empirické). Je velké množství výpočetních kódů na podobném principu. Jsou některé kombinace podmínek, kdy jsou otevřené problémy a standardní postupy neposkytují dostatečně přesnou predikci, jsou

BENTONIT	Dostupnost modelovacího nástroje	Poznámka
		<p>předmětem zájmu probíhajícího výzkumu. Problémem také může být numerické konvergence silně nelineárních úloh.</p> <p>HOKR M. A KOLEKTIV (2022). Metodiky modelování THMC procesů – shrnutí dosavadních znalostí. Výzkumná podpora pro bezpečnostní hodnocení technického řešení hlubinného úložiště – Hodnocení bariér, Dílčí zakázka Metodika modelování THMC procesů. TZ612/2022. v přípravě</p>
<b>Pohyb UOS v bufferu</b>	Viz (T)HM modely	<p>HOKR M. A KOLEKTIV (2022). Metodiky modelování THMC procesů – shrnutí dosavadních znalostí. Výzkumná podpora pro bezpečnostní hodnocení technického řešení hlubinného úložiště – Hodnocení bariér, Dílčí zakázka Metodika modelování THMC procesů. TZ612/2022. v přípravě</p>
<b>Chemické a mineralogické změny (bentonit)</b>	Lze použít PHREEQC, ale nevíme o tom, že by bylo prováděno.	<p>Z pohledu modelu jsou jednotlivé chemické procesy uvažovány jako jeden vzájemně propojený systém. V některých případech mohou být aplikovány zjednodušující předpoklady vynecháním určitého procesu. Konceptně je dán obecně uznávaný popis pomocí chemických rovnováh a kinetik a existují simulační kódy schopné principiálně úlohy řešit. Obecně ale není modelování zvládnutí z hlediska dat – na podobu konkrétních chemických reakcí, jednotlivé minerály a složky roztoku, heterogenitu pórového prostoru apod. existují různé názory. Nemusí být dostupné všechny termodynamické parametry. Technicky nelze jednoduše určit jeden správný koncept porovnáním s měřeními</p>

BENTONIT	Dostupnost modelovacího nástroje	Poznámka
		daty. Výpočty jsou také náročné na výpočetní výkon resp. čas. Problematika je v pozornosti odborné komunity.
Srážení a rozpouštění minerálních fází	Lze použít PHREEQC, ale nevíme o tom, že by bylo prováděno.	
Illitizace	Lze použít PHREEQC, ale nevíme o tom, že by bylo prováděno.	
Alterace korozními produkty	PHREEQC	HAVLOVA V., KICZKA M., MENDOZA MIRANDA A., KLAJMON M., WERSIN P., PEKALA M. JENNI A., HADI J., SAMPER J., MONTENEGRO L., MON A., FABIAN M, OSAN J., A. DAUZERES, D. JACQUES (2020): Modelling of the steel-clay interface – approaches, first results and model refinements. Final version as of 28 08 2020 of deliverable D2.6 of the HORIZON 2020 project EURAD. EC Grant agreement no: 847593.
Alterace alkalickými produkty	GOLDSIM – vyhodnocení difúzních experimentů přes rozhraní	ROSENDORF T. (2016): Studium difúze radionuklidů kompaktovaným bentonitem ovlivněné jinými bariérovými materiály. Diplomová práce. FJFI ČVUT Praha.  VEČERNÍK P., DRTINOVÁ B., BÁRTA, J., BRÁZDA L., GALEKOVÁ E., HAVLOVÁ V., HOFMANOVÁ E., KAŠPAR V., KITTNEROVÁ J., KOLOMÁ K., ROSENDORF, T., VOPÁLKA D. (2019c): Transportní vlastnosti cementových materiálů – závěrečná zpráva. – MS SÚRAO, TZ 430/2019.

BENTONIT	Dostupnost modelovacího nástroje	Poznámka
Změna fází FeII/FeIII		
Změny minoritních fází, včetně organické hmoty		
Chemická eroze (uvolnění koloidů)	Řešeno experimentálně v Červinka et al. (2015) + vyhodnocení transportních experimentů v program PNLRPal1.fm (Code Package Stamb-20010) konstruovaný pro softwarový produkt FAMULUS (Palágyi a Štamberg, 2011) – FJFI	PALÁGYI Š., ŠTAMBERG K. (2011) Determination of <sup>137</sup> Cs and <sup>85</sup> Sr transport parameters in fucidic sand columns and groundwater system. Cent. Eur. J. Chem., 9(5), 798-807.
Změny vlivem záření		Viz výše
<b>Chemické rovnováhy a kinetiky</b>		Z pohledu modelu jsou jednotlivé chemické procesy uvažovány jako jeden vzájemně propojený systém. V některých případech mohou být aplikovány zjednodušující předpoklady vynecháním určitého procesu. Konceptně je dán obecně uznávaný popis pomocí chemických rovnováh a kinetik a existují simulační kódy schopné principiálně úlohy řešit. Obecně ale není modelování zvládnutí z hlediska dat – na podobu konkrétních chemických reakcí, jednotlivé minerály a složky roztoku, heterogenitu pórového prostoru apod. existují různé názory. Nemusí být dostupné všechny termodynamické parametry. Technicky nelze jednoduše určit jeden správný koncept porovnáním s měřenými daty. Výpočty jsou také náročné na výpočetní výkon resp. čas. Problematika je v pozornosti odborné komunity.

BENTONIT	Dostupnost modelovacího nástroje	Poznámka
	PHREEQC speciace	<p><b>BENTONIT</b></p> <p>ČERVINKA R. A VEJSADŮ, J. (2015): Studium vývoje vlastností a eroze bentonitu z lokality Rokle, (arch. č. SÚRAO 42/10, 42/11)</p> <p>ČERVINKA R., HANULÁKOVÁ D. (2013): Laboratorní výzkum tlumících, výplňových a konstrukčních materiálů. Geochemické modelování – bentonitová pórová voda. Zpráva ÚJV Řež, a. s., 14269, 111 s.</p> <p><b>CEMENT</b></p> <p>HOFMANOVÁ E., ČERVINKA R., VOPÁLKA D., BABOROVÁ L., BRÁZDA L., PECKOVÁ A., VETEŠNÍK A., VIGLAŠOVÁ E., VAŠÍČEK R. (2019): Transport radionuklidů z úložiště / vstupní parametry a procesní modely pro hodnocení transportu radionuklidů přes inženýrské bariéry: Závěrečná zpráva. – MS SÚRAO, ZZ 420/2019, Praha</p> <p>VEČERNÍK P., DRTINOVÁ B., BÁRTA, J., BRÁZDA L., GALEKOVÁ E., HAVLOVÁ V., HOFMANOVÁ E., KAŠPAR V., KITTNEROVÁ J., KOLOMÁ K., ROSENDORF, T., VOPÁLKA D. (2019c): Transportní vlastnosti cementových materiálů – závěrečná zpráva. – MS SÚRAO, TZ 430/2019.</p> <p>ČUBOVÁ K., BABOROVÁ L., NĚMEC M., JOHN J. (2017):: Speciace radionuklidů v prostředí úložného systému úložiště pro odpady nepřijatelné do přípovrchových. SÚRAO Technická zpráva č. 207/2017, 157 s.</p>

BENTONIT	Dostupnost modelovacího nástroje	Poznámka
Změna chemismu pórové vody (i na rozhraní s horninou)	PHREEQC speciace	<p>ČERVINKA R. A VEJSADŮ, J. (2015): Studium vývoje vlastností a eroze bentonitu z lokality Rokle, (arch. č. SÚRAO 42/10, 42/11)</p> <p>ČERVINKA R., HANULÁKOVÁ D. (2013): Laboratorní výzkum tlumících, výplňových a konstrukčních materiálů. Geochemické modelování – bentonitová pórová voda. Zpráva ÚJV Řež, a. s., 14269, 111 s.</p>
Ko-precipitace fází radionuklidů s minerály		
Spotřeba kyslíku		
Interakce plynů		
<b>Mikrobiální aktivita</b>		

Modelování u stavebních konstrukcí lze v zásadě rozdělit na (chemické) modelování materiálových změn (zrání, interakce s okolím a degradace) a na statický návrh konstrukce, posouzení stability a vývoje deformací, trhlin

- interakce bentonitu a ostatních komponent řeší Dílčí úkol 4 zakázky „Výplně a ostatní inženýrské komponenty HÚ“,
- statický návrh konstrukce, posouzení stability a vývoje deformací, trhlin se ve stavební praxi řeší komerčními SW.

Tab. 10 Modelování procesů v konstrukčních materiálech – dostupnost modelovacích nástrojů

KONSTRUKČNÍ MATERIÁLY	Dostupnost modelovacího nástroje	Poznámka
<b>Chemická interakce a degradace</b>		
Rozpouštění/ srážení (betonové konstrukce)	TOUGH2, TOUGHREACT PHREEQC	V projektu TA03020405 Vývoj a optimalizace metodik pro výzkum bezpečnostních bariér pro ukládání CO <sub>2</sub> jako jednoho ze základních způsobů snižování obsahu skleníkových plynů v atmosféře modeloval F. Wertz injekci CO <sub>2</sub> do cementem vpažených vrtů v rámci projektu na ukládání CO <sub>2</sub> .  WERTZ F., HAVLOVÁ V., VRBOVÁ V., (2014): Numerical simulations of supercritical injection of CO <sub>2</sub> in Dunajovice Sandstone. FUELS 6 (2014), 4, P. 108 - 115
Karbonatace (betonové konstrukce)	TOUGH2, TOUGHREACT PHREEQC	Dtto Rozpouštění
Změna mineralogie (betonové konstrukce)	TOUGH2, TOUGHREACT	Dtto Rozpouštění

KONSTRUKČNÍ MATERIÁLY	Dostupnost modelovacího nástroje	Poznámka
	PHREEQC	
Produkty degradace betonu	TOUGH2, TOUGHREACT PHREEQC	Dtto Rozpouštění
Produkce alkalických roztoků (betonové konstrukce)		
Koroze kovů (betonové konstrukce)		
Koroze kovů – pevné korozní produkty (svorník, železobeton)		
Koroze kovů – produkce plynů (svorník, železobeton)		
Degradace injektáží		
Produkty degradace injektáží		
<b>Změna fyzikálních vlastností (betonové konstrukce)</b>		



KONSTRUKČNÍ MATERIÁLY	Dostupnost modelovacího nástroje	Poznámka
Změna obsahu, distribuce pórů (betonové konstrukce)		

Tab. 11 Modelování transportních procesů– dostupnost modelovacích nástrojů

Transportní procesy	Dostupnost modelovacího nástroje	Poznámka
Změna speciace radionuklidů v pórové vodě	PHREEQC speciace	<p>Z pohledu modelu jsou jednotlivé chemické procesy uvažovány jako jeden vzájemně propojený systém. V některých případech mohou být aplikovány zjednodušující předpoklady vynecháním určitého procesu. Konceptně je dán obecně uznávaný popis pomocí chemických rovnováh a kinetik a existují simulační kódy schopné principiálně úlohy řešit. Obecně ale není modelování zvládnutí z hlediska dat – na podobu konkrétních chemických reakcí, jednotlivé minerály a složky roztoku, heterogenitu pórového prostoru apod. existují různé názory. Nemusí být dostupné všechny termodynamické parametry. Technicky nelze jednoduše určit jeden správný koncept porovnáním s měřenými daty. Výpočty jsou také náročné na výpočetní výkon resp. čas. Problematika je v pozornosti odborné komunity.</p> <p><b>BENTONIT</b></p> <p>ČERVINKA R. A VEJSADŮ, J. (2015): Studium vývoje vlastností a eroze bentonitu z lokality Rokle, (arch. č. SÚRAO 42/10, 42/11)</p>

Transportní procesy	Dostupnost modelovacího nástroje	Poznámka
		<p>ČERVINKA R., HANULÁKOVÁ D. (2013): Laboratorní výzkum tlumících, výplňových a konstrukčních materiálů. Geochemické modelování – bentonitová pórová voda. Zpráva ÚJV Řež, a. s., 14269, 111 s.</p> <p><b>Cement</b></p> <p>HOFMANOVÁ E., ČERVINKA R., VOPÁLKA D., BABOROVÁ L., BRÁZDA L., PECKOVÁ A., VETEŠNÍK A., VIGLAŠOVÁ E., VAŠÍČEK R. (2019): Transport radionuklidů z úložiště / vstupní parametry a procesní modely pro hodnocení transportu radionuklidů přes inženýrské bariéry: Závěrečná zpráva. – MS SÚRAO, ZZ 420/2019, Praha</p> <p>VEČERNÍK P., DRTINOVÁ B., BÁRTA, J., BRÁZDA L., GALEKOVÁ E., HAVLOVÁ V., HOFMANOVÁ E., KAŠPAR V., KITTNEROVÁ J., KOLOMÁ K., ROSENDORF, T., VOPÁLKA D. (2019c): Transportní vlastnosti cementových materiálů – závěrečná zpráva. – MS SÚRAO, TZ 430/2019.</p> <p>ČUBOVÁ K., BABOROVÁ L., NĚMEC M., JOHN J. (2017):: Speciace radionuklidů v prostředí úložného systému úložiště pro odpady nepřijatelné do přípovrchových. SÚRAO Technická zpráva č. 207/2017, 157 s.</p>
<b>Transport radionuklidů v kapalně fázi</b>	<p>GOLDSIM v rámci hodnocení bezpečnosti (Vokál et al. 2010; Trpkošová et al. 2018)</p> <p>Procesní modely</p>	<p>HOFMANOVÁ E., ČERVINKA R., VOPÁLKA D., BABOROVÁ L., BRÁZDA L., PECKOVÁ A., VETEŠNÍK A., VIGLAŠOVÁ E., VAŠÍČEK R. (2019): Transport radionuklidů z úložiště / vstupní parametry a procesní modely pro hodnocení transportu radionuklidů přes</p>

Transportní procesy	Dostupnost modelovacího nástroje	Poznámka
	PHREEQC, GOLDSIM (Hofmanová et al. 2018; Večerník et al. 2019)	<p>inženýrské bariéry: Závěrečná zpráva. – MS SÚRAO, ZZ 420/2019, Praha</p> <p>VOKÁL A., HAVLOVÁ V., HERCÍK M., LANDA J., LUKIN D., LANDA J. (2010B): Aktualizace referenčního projektu hlubinného úložiště radioaktivních odpadů v hypotetické lokalitě, III. etapa – Hodnocení dlouhodobé bezpečnosti, ÚJV Řež a.s. – divize Energoprojekt Praha, 2010</p> <p>TRPKOŠOVÁ D., HAVLOVÁ,V., DOBREV,D., HUSŤÁKOVÁ,H., GONDOLLI,J., KLAJMON,M., MIRANDA A. N. M., VEČERNÍK P., BUKOVSKÁ Z., RATAJ J., FRÝBORT J., FEJT F., ŠTAMBERG K., VETEŠNÍK, A., VOPÁLKA D., UHLÍK J., GVOŽDÍK L., KRÁLOVCOVÁ J., ŘÍHA J., MARYŠKA J., STEINOVÁ J., STAŠ L. (2018b): Bezpečnostní rozbor dlouhodobé bezpečnosti hlubinného úložiště na lokalitě Kraví hora. Závěrečná zpráva. – MS SÚRAO ZZ 334/2018, Praha.</p> <p>VEČERNÍK P., DRTINOVÁ B., BARTA, J., BRÁZDA L., GALEKOVÁ E., HAVLOVÁ V., HOFMANOVÁ E., KAŠPAR V., KITTNEROVÁ J., KOLOMÁ K., ROSENDORF, T., VOPÁLKA D. (2019c): Transportní vlastnosti cementových materiálů – závěrečná zpráva. – MS SÚRAO, TZ 430/2019.</p>
Difúze radionuklidů	Dtto předcházející	
Advekce radionuklidů	GOLDSIM v rámci bezpečnostního hodnocení cementových výplní v ÚRAO Bratrství	DOBREV D., TRPKOŠOVÁ D., HUSŤÁKOVÁ H., HAVLOVÁ V. (2017): Studie uzavření ÚRAO Bratrství – D. Bezpečnostní hodnocení. Zpráva pro SÚRAO, 2017.

Transportní procesy	Dostupnost modelovacího nástroje	Poznámka
Sorpce radionuklidů	Goldsim	HOFMANOVÁ E., ČERVINKA R., VOPÁLKA D., BABOROVÁ L., BRÁZDA L., PECKOVÁ A., VETEŠNÍK A., VIGLAŠOVÁ E., VAŠÍČEK R. (2019): Transport radionuklidů z úložiště / vstupní parametry a procesní modely pro hodnocení transportu radionuklidů přes inženýrské bariéry: Závěrečná zpráva. – MS SÚRAO, ZZ 420/2019, Praha
Fyzikální retardace		
Osmóza		
<b>Transport koloidů v kapalně fázi</b>	Řešeno experimentálně v Červinka et al. (2015) + vyhodnocení transportních experimentů v program PNLRPal1.fm (Code Package Stamb-20010) konstruovaný pro softwarový produkt FAMULUS (Palágyi a Štamberg, 2011) – FJFI	PALÁGYI Š., ŠTAMBERG K. (2011) Determination of <sup>137</sup> Cs and <sup>85</sup> Sr transport parameters in fucidic sand columns and groundwater system. Cent. Eur. J. Chem., 9(5), 798-807.
Difúze radiokoloidů	Ne	
Advekce radiokoloidů	Řešeno experimentálně v Červinka et al. (2015) + vyhodnocení transportních experimentů v program PNLRPal1.fm (Code Package Stamb-20010) konstruovaný pro softwarový produkt FAMULUS (Palágyi a Štamberg, 2011) – FJFI	PALÁGYI Š., ŠTAMBERG K. (2011) Determination of <sup>137</sup> Cs and <sup>85</sup> Sr transport parameters in fucidic sand columns and groundwater system. Cent. Eur. J. Chem., 9(5), 798-807.
Sorpce radiokoloidů	Ne přímo v modelu, ad Červinka et al. (2015)	

Transportní procesy	Dostupnost modelovacího nástroje	Poznámka
Transport radionuklidů v plyné fázi		
Transport korozních produktů	PHREEQC	HAVLOVA V., KICZKA M., MENDOZA MIRANDA A., KLAJMON M., WERSIN P., PEKALA M. JENNI A., HADI J., SAMPER J., MONTENEGRO L., MON A., FABIAN M, OSAN J., A. DAUZERES, D. JACQUES (2020): Modelling of the steel-clay interface – approaches, first results and model refinements. Final version as of 28 08 2020 of deliverable D2.6 of the HORIZON 2020 project EURAD. EC Grant agreement no: 847593.

Tab. 12 Modelování procesů v systému HÚ – dostupnost modelovacích nástrojů

systémové FEP	Dostupnost modelovacího nástroje	Poznámka
Tepelný vývoj úložiště	<p>program TEPLO /součást systému FIESTA)</p> <p>Zjednodušený model v kódu Mathcad 15.0</p> <p>Podrobný model v kódu COSMOS/M 2.7</p> <p>konečně prvkový (MKP) software GEM;</p> <p>software ISERIT;</p> <p>program ANSYS</p>	<p>ŠIK J.: Ukládací obalový soubor pro hlubinné úložiště, Tepelný výpočet, Ae 16093/dok Rev.1, Škoda JS, 2016</p> <p>KOBYLKA D. (2019): Optimalizace vzájemné vzdálenosti UOS, Technická zpráva SÚRAO 135/2017.</p> <p>BLAHETA J. A KOL. (2012): Tepelná analýza referenčního návrhu úložiště vyhořelého jaderného paliva, Ústav geoniky AV ČR, Ostrava, 2012</p>

systémové FEP	Dostupnost modelovacího nástroje	Poznámka
<b>Proudění v EDZ</b>		Velikost přítoku je řešena jako úloha proudění vody v rozpukané hornině. Jde o metodicky detailně popsanou problematiku, ale zároveň s množstvím alternativ, jak konkrétními daty zachytit nepravidelné rozložení puklin a propustných zón. Jde ve velké míře o stochastický popis. Z toho důvodu je konkrétní kvantitativní predikce omezená a v principu obtížně dosažitelná
<b>Transport radionuklidů</b>	<p>GOLDSIM v rámci hodnocení bezpečnosti (Vokál et al. 2010; Trpkošová et al. 2018)</p> <p>Procesní modely</p> <p>PHREEQC, GOLDSIM (Hofmanová et al. 2018; Večerník et al. 2019)</p>	<p>HOFMANOVÁ E., ČERVINKA R., VOPÁLKA D., BABOROVÁ L., BRÁZDA L., PECKOVÁ A., VETEŠNÍK A., VIGLAŠOVÁ E., VAŠÍČEK R. (2019): Transport radionuklidů z úložiště / vstupní parametry a procesní modely pro hodnocení transportu radionuklidů přes inženýrské bariéry: Závěrečná zpráva. – MS SÚRAO, ZZ 420/2019, Praha</p> <p>VOKÁL A., HAVLOVÁ V., HERCÍK M., LANDA J., LUKIN D., LANDA J. (2010B): Aktualizace referenčního projektu hlubinného úložiště radioaktivních odpadů v hypotetické lokalitě, III. etapa – Hodnocení dlouhodobé bezpečnosti, ÚJV Řež a.s. – divize Energoprojekt Praha, 2010</p> <p>TRPKOŠOVÁ D., HAVLOVÁ V., DOBREV D., HUSTÁKOVÁ H., GONDOLLI J., KLAJMON M., MIRANDA A. N. M., VEČERNÍK P., BUKOVSKÁ Z., RATAJ J., FRÝBORT J., FEJT F., ŠTAMBERG K., VETEŠNÍK A., VOPÁLKA D., UHLÍK J., GVOŽDÍK L., KRÁLOVCOVÁ J., ŘÍHA J., MARYŠKA J., STEINOVÁ J., STAŠ L. (2018b): Bezpečnostní rozbor dlouhodobé bezpečnosti hlubinného úložiště na lokalitě Kraví hora. Závěrečná zpráva. – MS SÚRAO ZZ 334/2018, Praha.</p>

systémové FEP	Dostupnost modelovacího nástroje	Poznámka
		VEČERNÍK P., DRTINOVÁ B., BARTA, J., BRÁZDA L., GALEKOVÁ E., HAVLOVÁ V., HOFMANOVÁ E., KAŠPAR V., KITTNEROVÁ J., KOLOMÁ K., ROSENDORF, T., VOPÁLKA D. (2019c): Transportní vlastnosti cementových materiálů – závěrečná zpráva. – MS SÚRAO, TZ 430/2019.
Transport koloidů	Řešeno experimentálně v Červinka et al. (2015) + vyhodnocení transportních experimentů v program PNLRPal1.fm (Code Package Stamb-20010) konstruovaný pro softwarový produkt FAMULUS (Palágyi a Štamberg, 2011) – FJFI	PALÁGYI Š., ŠTAMBERG K. (2011) Determination of <sup>137</sup> Cs and <sup>85</sup> Sr transport parameters in fucidic sand columns and groundwater system. Cent. Eur. J. Chem., 9(5), 798-807.
<b>Ovlivnění dlouhodobými přírodními procesy</b>		V oboru mechaniky hornin je mnoho variant modelů pro napjatost, deformaci a porušení horniny. Komplikujícím prvkem je síť diskretních puklin v různém prostorovém měřítku. V tomto ohledu je podobná situace jako u proudění vody, kdy heterogenita je zachycena částečně jen statisticky.

## 11 Závěr

Pro posouzení bezpečnosti hlubinného úložiště je důležité nalézt vlastnosti, které jsou důležité pro zajištění bezpečnostních funkcí úložiště, popsat jejich vstupní charakteristiky a jejich vývoj v čase; nalézt procesy, které mohou iniciovat změny vlastností nebo být jejich důsledkem; a identifikovat události, které jsou příčinou nebo následkem změny podmínek v úložišti.

Výchozím stavem pro specifikaci FEP je znalost a definice okrajových podmínek a počáteční stav (Initial state), ke kterému je možné vztáhnout vlastnosti jednotlivých komponent a vůči kterému pak mohou být popsány nastalé změny.

Vlastnosti, události a procesy je třeba nalézt pro celý systém úložiště. Nicméně k jejich hlubšímu pochopení bylo účelné rozdělit systém na části, které budou tvořit logické celky. Následně je možné tyto celky sesadit a vyhodnotit chování celého systému.

Zpracovaný dokument se zaměřil na úložiště VJP z pohledu inženýrské stavby – důlního díla, včetně ukládacích prostor, a inženýrských bariér, které jsou použity při konstrukci hlubinného úložiště, při ukládání UOS s VJP, a při uzavírání jednotlivých ukládacích prostor a následně celého úložiště.

Český technický koncept prozartím předpokládá dvě varianty ukládání UOS s VJP – vertikální i horizontální. Úložné vrty mají být vyraženy pomocí metody TBM, ostatní chodby a tunely byly navrženy a posuzovány variantně, jednak pomocí metody TBM a dále konvenční ražbou.

Vlastnosti byly popsány a hodnoceny nejprve z makroměřítká, tedy z pohledu systému úložiště (např. hloubka ukládacího horizontu nebo dispozice úložiště a využitelnost horninového bloku) a pak jeho dílčích částí (např. podzemní části úložiště, ukládací vrty a jejich orientace podle způsobu ukládání atd.)

Následně byly popsány vlastnosti jednotlivých komponent inženýrských bariér (buffer, backfill a konstrukční prvky). Samostatně byly popsány vlastnosti rozhraní komponent, neboť i ty jsou důležitým prvkem, kde dochází ke vzájemnému ovlivnění.

Procesy, identifikované v průběhu prací byly rozčleněny do několika skupin – tepelné, hydraulické, mechanické, chemické, radiační, mikrobiální a transportní.

Posouzeny byly důsledky působení neočekávaných externích vlivů (seismická činnost, intruze člověka do úložiště), tj. poškození inženýrských bariér a jejich vliv na vývoj úložiště.

Identifikované FEP byly popsány v jednotné struktuře:

- Popis, který stručně shrnul podstatu vlastnosti, události, procesu;
- Vliv na dlouhodobou bezpečnost, kde bylo uvedeno, jakým způsobem může vlastnost být důležitá z pohledu hodnocení bezpečnosti, a jaký vliv mají události a procesy na bezpečnostní funkce komponent;
- Dostupná data, kde bylo uvedeno, zda a kde lze nalézt k dané problematice relevantní data z českého programu přípravy hlubinného úložiště;
- Nejistoty, v nich bylo diskutováno, zda jsou existující dostupná data dostačující, zda je možné z existujících informací možné predikovat budoucí vývoj apod.



Procesy byly hodnoceny pro období vývoje úložiště do 1 miliónu let, kdy úložiště postupně prochází změnou vnitřních i vnějších podmínek (vliv teploty, saturace podzemní vodou), a to i ve vztahu ke dlouhodobým přírodním procesům, působícím na systému úložiště VJP.

Výstup těchto prací je podkladem pro odvození scénářů pro hodnocení bezpečnosti systému hlubinného úložiště. neboť teprve na základě vyhodnocení relevance FEP s ohledem na místní podmínky a pravděpodobnosti vzniku je možné vybrat ty, na jejichž základě se budou odvozovat scénáře, scénář normálního vývoje a alternativní scénáře

## Reference

### **Knihy, články, mapy:**

Reference jsou kvůli přehlednosti uvedeny u každé kapitoly.

### **Zákony:**

Zákon č.263/2016 Sb., atomový zákon.

Vyhláška č. 329/2017 Sb., o požadavcích na projekt jaderného zařízení.

Vyhláška č. 377/2016 Sb., o požadavcích na bezpečné nakládání s radioaktivním odpadem a o vyřazování z provozu jaderného zařízení nebo pracoviště III. nebo IV. kategorie

Vyhláška č. 378/2016 Sb., o umístění jaderného zařízení.

## Příloha 1 – Základní parametry a popisné vlastnosti bentonitu

V této příloze jsou definovány jednak základní fyzikální vlastnosti a jednak některé popisné vlastnosti. Fyzikální parametry jsou uvedeny z důvodů úplnosti zprávy. Popisné parametry sice nevstupují přímo do bezpečnostního rozboru, ale, v některých případech, do vyhodnocení experimentálních prací či je na jejich základě možno provést klasifikaci, resp. kontrolu kvality zemin. Zeminou v tomto případě bude bentonit, popř. směs bentonitu/ bentonitových pelet.

### Definice základních parametrů

V této úvodní části jsou uvedeny definice základních parametrů. Často se postupy stanovení řídí příslušnými platnými ČSN a jejich využití nečiní výraznější obtíže. Vzhledem ke specifickému chování bobtnavých jíílů však nemusí někdy být takto uvedené postupy dostačující. Problémem je interakce vody a matrice materiálu, popř. rozsah podmínek při zkouškách (syťící tlak, teplota...). Metodiky pro stanovení vlastností na bobtnavých jílech popisuje Vašíček a kol. (2022).

#### Hmotnostní vlhkost

Obsah vody v zemině je definován jako podíl hmotnosti vody v zemině a hmotnosti vysušené zeminy – vlhkost  $w$  [%]. Určuje se dle ČSN EN ISO 17892-1:

$$w = \frac{m_w}{m_d} * 100\% , \quad (11)$$

kde  $m_w$  (kg) je hmotnost vody ve vzorku a  $m_d$  (kg) hmotnost vysušeného vzorku.

#### Objemová hmotnost vysušené zeminy

Objemová hmotnost vysušené zeminy  $\rho_d$  ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) je definována jako podíl hmotnosti pevné fáze materiálu (sušeno při teplotě 105–110 °C) a celkového objemu vzorku. Určuje se dle ČSN EN ISO 17892-2:

$$\rho_d = \frac{m_d}{V} , \quad (12)$$

kde  $m_d$  (kg) je hmotnost vysušeného vzorku a  $V$  ( $\text{m}^3$ ) celkový objem vzorku.

#### Objemová hmotnost zeminy

Objemová hmotnost  $\rho$  ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) je definována jako podíl hmotnosti materiálu a celkového objemu vzorku. Určuje se dle ČSN EN ISO 17892-2:

$$\rho = \frac{m}{V} , \quad (13)$$

kde  $m$  (kg) je hmotnost vzorku a  $V$  ( $\text{m}^3$ ) celkový objem vzorku.

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

$$\rho = \rho_d \left(1 + \frac{w}{100}\right), \quad (14)$$

### Specifická hmotnost (měrná hmotnost)

Specifická hmotnost  $\rho_s$  ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) je velmi často uváděna jako zdánlivá hustota pevných částic, měrná hmotnost, či hustota pevných částic zeminy. Stanovení se provádí dle ČSN EN ISO 17892-3, resp. s úpravami popsány ve zprávě Vašíček a kol. (2022). Specifická hmotnost je pak definována:

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s}, \quad (15)$$

kde  $m_s$  je hmotnost pevných částic ve vzorku (kg) a  $V_s$  objem pevných částic ve vzorku ( $\text{m}^3$ ).

### Pórovitost

Pórovitost  $n$  (-) je definována jako podíl objemu pórů k objemu celého vzorku:

$$n = \frac{V_p}{V} = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_s}, \quad (16)$$

kde  $V_p$  je objem pórů ( $\text{m}^3$ );  $V$  objem vzorku vč. pórů ( $\text{m}^3$ );  $\rho_d$  objemová hmotnost vysušené zeminy ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) a  $\rho_s$  specifická hmotnost zeminy (hustota;  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ).

### Číslo pórovitosti

Číslo pórovitosti  $e$  (-) je definováno jako podíl objemu pórů k objemu pevné fáze vzorku:

$$e = \frac{V_p}{V_s} = \frac{n}{n-1} = \frac{\rho_d}{\rho_s} - 1, \quad (17)$$

kde  $n$  je pórovitost (-);  $V_p$  objem pórů ( $\text{m}^3$ );  $V_s$  objem pevné fáze vzorku ( $\text{m}^3$ );  $\rho_d$  objemová hmotnost vysušené zeminy ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) a  $\rho_s$  specifická hmotnost vzorku ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ).

Pro stanovení pórovitosti či čísla pórovitosti je tedy nejprve nutné stanovit vysušenou objemovou hmotnost a měrnou hmotnost vzorku.

### Stupeň nasycení

Stupeň nasycení se používá k popisu míry nasycení vzorku v laboratorních i in-situ experimentech. Je definován jako poměr objemu vody v pórech k celkovému objemu pórů. Nelze ho zjistit přímým způsobem. Pro výpočet je třeba znát čtyři z následujících fyzikálních veličin: měrná hmotnost  $\rho_s$ , objemová hmotnost sušiny  $\rho_d$ , objemová hmotnost přirozeně vlhkého vzorku  $\rho$ , objemová hmotnost vody  $\rho_w$ , hmotnostní vlhkost  $w$  a pórovitost  $n$ . Při dosažení stavu plného nasycení je  $S_r = 1$ . Stupeň nasycení lze například vypočítat dle vzorce:

$$S_r = \frac{w \times \rho \times \rho_s}{\rho_w [(1+w) \times \rho_s - \rho]} e = \frac{V_p}{V_s} = \frac{n}{n-1} = \frac{\rho_d}{\rho_s} - 1, \quad (18)$$

**Poznámka:**

V důsledku mechanických změn v bentonitu, bobtnání apod. dochází ke změně objemové hmotnosti, vlhkosti a tudíž i, v alternativním vyjádření, pórovitosti, čísla pórovitosti či stupně nasycení.

Všechny zmíněné parametry, kromě specifické hmotnosti, popisují aktuální stav materiálu, jsou tedy proměnné v různém rozsahu pro každý parametr. Specifická hmotnost (hustota) je určena mineralogickým složením, jde tedy o charakteristiku daného materiálu.

**Reference:**

ČSN EN ISO 17892-1 (721007) *Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemín – Část 1: Stanovení vlhkosti*. Praha: Český normalizační institut. 2015

ČSN EN ISO 17892-2 (721007) :2015 - *Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemín – Část 2: Stanovení objemové hmotnosti*. Praha: Český normalizační institut. 2015

ČSN EN ISO 17892-3 (721007) :2016 - *Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemín – Část 3: Stanovení zdánlivé hustoty pevných částic*. Praha: Český normalizační institut. 2016

**Specifická hmotnost****Popis:**

Specifická hmotnost bentonitu se stanovuje dle ČSN EN ISO 17892-3. Jde o celkovou hmotnost jednotlivých pevných částic bentonitu vysušených při teplotě 105–110 °C vztaženou k jejich objemu. Pro velmi bobtnavé materiály, jako je bentonit, je vhodné metodiku modifikovat a bobtnání potlačit. Například přidáním elektrolytu daného kationtu, který má největší zastoupení v mezivrstvi smektitických minerálů obsažených v bentonitu nebo jiné kapaliny, např. ethanolu. Více o specifických při využití pro bentonit popisuje Vašíček a kol. (2022).

**Vliv na dlouhodobou bezpečnost:**

Parametr nemá přímý vliv na plnění bezpečnostních funkcí. Vstupuje však do dalších výpočtů při vyhodnocování experimentů, tj. nejistota jeho stanovení se dále přenáší do výsledků těchto vyhodnocení.

**Dostupná data:**

Výsledky pro české bentonity shrnuje Červinka a kol. (2019) se zdrojem i v Červinka a kol. (2015):

Tab. 13: *Specifické hmotnosti českých bentonitů.*

<b>Materiál</b>	<b>Specifická hmotnost (kg · m<sup>-3</sup>)</b>
BCV 2017	2758 ± 17
BaM 2014	2735 ± 31
B75 2010	2870

Materiál	Specifická hmotnost ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )
S65 2010	2850

**Nejistoty:**

Nejistoty jsou vztaženy k nejistotám stanovení – laboratorních metod. Parametr vstupuje do dalších výpočtů při vyhodnocování experimentů, tj. nejistota jeho stanovení se dále přenáší do výsledků těchto vyhodnocení.

**Reference:**

ČERVINKA R., VAŠÍČEK R., VEČERNÍK P., KAŠPAR V. (2019): Kompletní charakterizace bentonitu BCV 2017. SÚRAO Technická zpráva 419/2019, Česká republika, 33 s.

ČERVINKA R., VOPÁLKA D., ADAM R., BRÁZDA L., DRTINOVÁ B., HOFMANOVÁ E., KITNEROVÁ J., RAMEŠOVÁ L. REIMITZ D., ŠIMÚTHOVÁ Z., ŠTAMBERG K., VETEŠNÍK A. (2015): Transport radionuklidů z úložiště / vstupní parametry a procesní modely pro hodnocení transportu radionuklidů přes inženýrské bariéry, 1. průběžná zpráva. Technická zpráva č. 2015/18, SÚRAO.

ČSN EN ISO 17892-3 (721007) :2016 - *Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemín – Část 3: Stanovení zdánlivé hustoty pevných částic*. Praha: Český normalizační institut. 2016

**Plasticita – konzistence****Popis:**

Konzistence je určitý stav soudržného materiálu závislý na vlhkosti. Sycením jemnozrnné zeminy vodou dochází ke změně jejího konzistenčního stavu od pevného, přes plastický až po tekutý. Rozeznáváme mez smrštění, mez plasticity a mez tekutosti. Význam při porovnání materiálů a pro jejich zařazení mají mez tekutosti a plasticity.

Mez tekutosti  $w_L$  (%) je definována jako vlhkost na hranici mezi plastickým a tekutým stavem. Zemina na mezi tekutosti vykazuje určitou smykovou pevnost. Zvýšením vlhkosti nad tuto mez přechází zemina do stavu tekutého, kdy neklade prakticky žádný odpor proti smykovému přetvoření a je schopná téci pod svoji vlastní tíhou. Mez plasticity  $w_P$  (%) je definována jako vlhkost zeminy mezi pevným a plastickým stavem. Jedná se o nejnižší vlhkost zeminy, při které je zemina plastická. Stanovení mezí tekutosti a plasticity je prováděno podle ČSN EN ISO 17892-12. Rozdíl vlhkostí na mezi tekutosti a plasticity je index plasticity  $I_p$ . Index číselně udává rozsah vlhkostí, ve kterém se materiál chová plasticky.

Z hlediska zařazení zemín se u bentonitů jedná vždy o zeminy s extrémně vysokou plasticitou ( $w_L > 90\%$ ; ČSN 736133, dříve v ČSN 731001).

Hodnoty konzistenčních mezí bentonitů závisí zejména na mineralogickém složení (obsah smektitu, typ dominantního výměnného kationtu). Jde tedy o jednu z charakteristik materiálu (suroviny) a ovlivnit před výstavbou bentonitové bariéry jdou pouze výběrem materiálu.

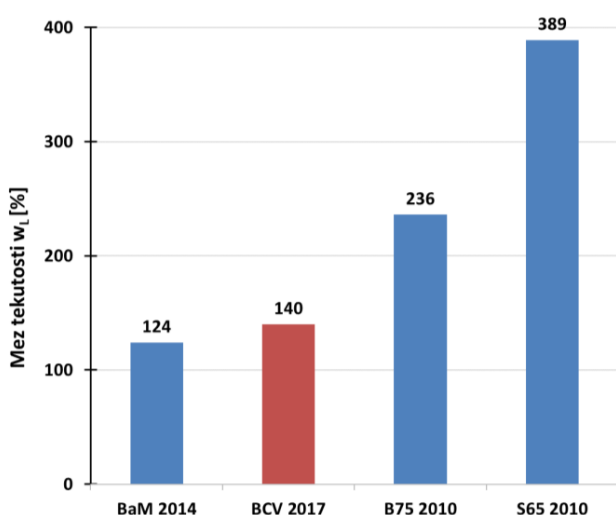
Zejména mez tekutosti může sloužit jako jeden z indikátorů kvality vstupního materiálu či změn v bentonitu při interakcích s okolním prostředím.

### Vliv na dlouhodobou bezpečnost:

Pro snadné samohojení ploch nespojitosti je příznivé, aby hodnota indexu plasticity byla co nejvyšší. Vysoká hodnota znamená, že i při velkém zvýšení vlhkosti nad mez plasticity zůstává zemina v plastickém stavu a nepřechází do tekutého stavu, tzn. neztrácí těsnicí schopnost.

### Dostupná data:

Parametry českých bentonitů uvádí např. Vašíček a kol. (2013) a Červinka a kol. (2018).



Obr. 29 Porovnání hodnot meze tekutosti BCV 2017 s BaM 2014, B75 2010 a S65 2010. (Vašíček a kol., 2013; Červinka a kol., 2019)

### Nejistoty:

Nejistoty jsou vztaženy k nejistotám stanovení – použitých laboratorních metod. Parametr však dále nevstupuje do výpočtů při vyhodnocování experimentů.

Stanovení meze tekutosti různými metodami (kuželová/ Cassagrandeho) – pro plastické jíly dávají různé výsledky. Je tedy nutné znát metodu stanovení, resp. dodržovat využití doporučené kuželové metody (Vašíček a kol., 2022).

### Reference:

ČERVINKA R., VAŠÍČEK R., VEČERNÍK P., KAŠPAR V. (2019): Kompletní charakterizace bentonitu BCV 2017. SÚRAO Technická zpráva 419/2019, Česká republika, 33 s.

ČSN 731001 (731001). Zakládání staveb. Základová půda pod plošnými základy; 10/1998-3/2010. Praha: Český normalizační institut. 1998; neplatná

ČSN 736133 (736133). Návrh a provádění zemního tělesa pozemních komunikací od 2/2010. Praha: Český normalizační institut. 2010

ČSN EN ISO 17892-12 (721007) *Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin – Část 12: Stanovení meze tekutosti a meze plasticity*. Praha: Český normalizační institut. 2018

VAŠÍČEK, R.; LEVOROVÁ, M., ČERVINKA, R., HAUSMANNOVÁ, L.; KAISR, Z.; VENKRBEC, Z. (2013). Závěrečná zpráva řešení Podetapy 4.2 projektu FRTI1/362: Výzkum vlastností materiálů pro bezpečné ukládání radioaktivních odpadů a vývoj postupů jejich hodnocení FR-TI1/362. Centrum experimentální geotechniky, Fakulta stavební ČVUT.

## Zrnitostní složení

### Popis:

Zrnitost (zrnitostní složení) je vlastnost zeminy, která ovlivňuje její mechanické a hydraulické vlastnosti, popisuje rozdělení zrn do jednotlivých frakcí. Určení zastoupení frakcí se provádí pomocí prosévání a sedimentace (ČSN EN ISO 17892-4) nebo s využitím metod s detekčními systémy používající rentgenové nebo laserové paprsky, měřidla hustoty a počítadla zrn. Výstupem zkoušky je křivka zrnitosti, udávající procentuální podíl zrn s velikostí menší, než je příslušná velikost zrna.

U velmi jemnozrnných zemin – bentonitů není stanovení zrnitosti zásadní – všechny jsou velmi jemnozrnné. Specifikem je využití pelet – bentonit lisovaný velmi vysokým tlakem do větších zrn/ granulí/ úlomků, kdy zastoupení velikosti těchto „zrn“ lze popsat síťovým rozborem. Více o využití metod pro potřeby HÚ shrnují Vašíček a kol., 2022.

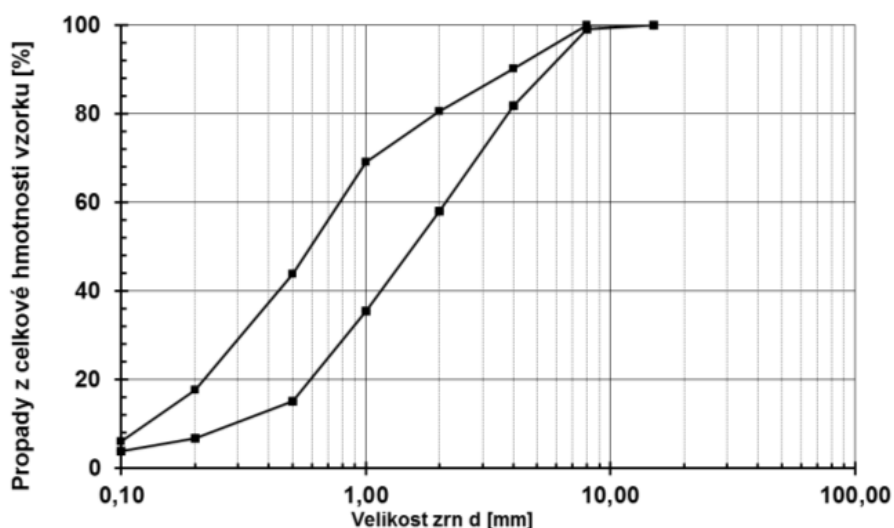
### Vliv na dlouhodobou bezpečnost:

Obecně větší podíl hrubších zrn způsobuje vyšší propustnost zemin. U velmi jemnozrnných zemin – bentonitů je tento efekt zrnitosti nevýznamný (všechny jsou velmi jemnozrnné); dominantní pro chování bentonitových bariér jsou jiné parametry (zejm. objemová hmotnost, obsah smektitu, typ dominantního výměnného kationtu a tím daná bobtnací schopnost i propustnost). Specifikem je využití pelet – bentonit lisovaný velmi vysokým tlakem do větších zrn/ granulí/ úlomků. Bariéra z pelet má v počáteční fázi sycení výrazně vyšší propustnost. V krajním případě může hrozit vymytí jemnějších zrn směsí a tvorba preferenčních cest.

### Dostupná data:

Technologie, postup výroby a výsledky testování pelet z českého materiálu BCV uvádí Pacovský a kol. (2019) a Šťáštka a kol. (2020). Vývoj směřoval k zrnitostnímu složení umožňujícímu co nejvyšší objemovou hmotnost po nasypání. Výsledkem vývoje jsou 2 výrobky Keramost a.s. „BCV\_PM\_2020 0-8“ a „BCV\_PM\_2020 0-50“.





Obr. 30 Katalogový materiálový list Keramost a.s. pro BCV\_PM\_2020 0-8“.

### Nejistoty:

Nejistoty jsou vztaženy k nejistotám stanovení – použitých laboratorních metod. Parametr však dále nevstupuje do výpočtů při vyhodnocování experimentů.

### Reference:

ČSN EN ISO 17892-4 (721007): 2017 - Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemín – Část 4: Stanovení zrnitosti. Praha: Český normalizační institut. 2017

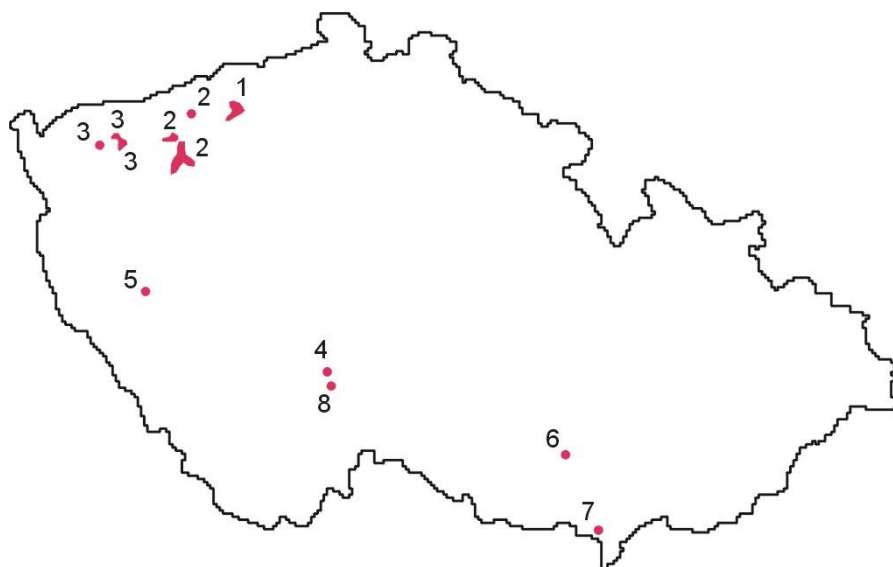
PACOVSKÝ J., ŠTÁSTKA J., A KOLEKTIV (2019). Návrh a výroba směsi bentonitových pelet – závěrečná zpráva, ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Centrum experimentální geotechniky, SÚRAO TZ 362/2019, Praha 2019, 65 str.

ŠTÁSTKA J., VAŠÍČEK R., ČERNOCHOVÁ K. (2020). Návrh a výroba směsi bentonitových pelet II – závěrečná zpráva, ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Centrum experimentální geotechniky, MS SÚRAO TZ 489/2020, 45 str.

VAŠÍČEK R., BEDRNÍKOVÁ E., ČERNÁ K., BARTAK D., ČERNOCHOVÁ K., PUSZTAI M., SVOBODA J., ŠACHLOVÁ Š., KAŠPAR V., KUČEROVÁ M., VEČERNÍK P., ZUNA M. (2022). Metodiky testování bentonitu, TZ590/2022, 2022, Praha

## Příloha 2 – Lokality testovaných českých bentonitů

Bentonity jsou reziduální jílové horniny s vysokým obsahem smektitů vznikající zejména jako produkt zvětrávání pyroklastik. V České republice je naprostá většina ložisek i zásob bentonitů soustředěna v oblasti Doupovských hor a Českého středohoří. Nejvýznamnější ložiskovou oblastí je východní okraj Doupovských hor na styku se severočeskou pánví (Kadaňsko, Podbořansko) se současně těženým ložiskem Rokle. Ložiska na Mostecku na styku jihovýchodního okraje severočeské pánve a Českého středohoří jsou v současnosti druhou nejvýznamnější oblastí bentonitů v ČR. Mezi nejdůležitější patří ložisko Braňany-Černý vrch, dále Stránce a Střimice. Menší význam pak mají ložiska terciérní pánve Plzeňska (Dněšice) a jihočeské pánve (Maršov, Rybova Lhota) a rovněž dvě malá ložiska (Ivančice-Réna, Poštorná) v miocenních sedimentech karpatského neogénu na jižní Moravě (viz Obr. 31; Červinka et al. 2015).



Obr. 31 Hlavní ložiskové oblasti bentonitů (1 - České středohoří, 2 - Doupovské hory, 3 - Sokolovská pánev) a ložiska bentonitů ležící mimo ně (4 - Maršov u Tábora, 5 - Dněšice – Plzeňsko jih, 6 - Ivančice – Réna, 7 – Poštorná, 8 - Rybova Lhota; Dle Červinka et al. (2015)

Základní přehled lokalit bentonitů pro HÚ je uveden ve zprávě Ryndová a Tvrdý (2020). Vědecko-výzkumné práce byly postupně realizovány především na čtyřech českých bentonitech, vždy se jednalo o Ca-Mg (vápenato-hořečnatý) bentonit: lokalita Rokle, dále průmyslově zpracovaný materiál z lokality Černý vrch (B75), průmyslově zpracovaný bentonit BAM (směs z více ložisek) a průmyslově zpracovaný materiál BCV z ložiska Černý vrch (Hausmannová et al. 2018).

Pro testování vlastností materiálů je možno využít celou řadu postupů dostupných v literatuře. I když jde často o běžně používané postupy, mohou, v případě využití pro bentonit, poskytovat odlišné, zavádějící až chybné výsledky. Některé z metod tedy lze využít/převzít přímo, některé až po dílčích úpravách. Zhodnocení vhodnosti metodik pro testování bentonitů z hlediska posouzení vlastností bentonitových materiálů pro potřeby přípravy HÚ v ČR je provedeno ve zprávě SÚRAO TZ 590/2022 (Vašíček et al., 2022).

**Reference:**

- ČERVINKA R., VOPÁLKA D., ADAM R., BRÁZDA L., DRTINOVÁ B., HOFMANOVÁ E., KITNEROVÁ J., RAMEŠOVÁ L., REIMITZ D., ŠIMÚTHOVÁ Z., ŠTAMBERG K., VETEŠNÍK A. (2015): Transport radionuklidů z úložiště / Vstupní parametry a procesní modely pro hodnocení transportu radionuklidů přes inženýrské bariéry: 1. průběžná zpráva. – MS SÚRAO, TZ 24/2015, Praha.
- HOFMANOVÁ E., ČERVINKA R., VOPÁLKA D., BABOROVÁ L., BRÁZDA L., PECKOVÁ A., VETEŠNÍK A., VIGLAŠOVÁ E., VAŠÍČEK R. (2019): Transport radionuklidů z úložiště / vstupní parametry a procesní modely pro hodnocení transportu radionuklidů přes inženýrské bariéry: Závěrečná zpráva. – MS SÚRAO, ZZ 420/2019, Praha.
- RYNDOVÁ T., TVRDÝ J. (2020): Bentonit pro české hlubinné úložiště radioaktivního odpadu, MS SÚRAO – TZ 458/2020. Praha.
- VAŠÍČEK R., HOFMANOVÁ E., SVOBODA J., ČERVINKA R. (2019): Geotechnická charakterizace homoionních forem bentonitu BCV 2017. Závěrečná zpráva. – MS SÚRAO, ZZ 425/2019, Praha.
- VAŠÍČEK R., BEDRNÍKOVÁ E., ČERNÁ K., BARTAK D., ČERNOCHOVÁ K., PUSZTAI M., SVOBODA J., ŠACHLOVÁ Š., KAŠPAR V., KUČEROVÁ M., VEČERNÍK P., ZUNA M. (2022): Metodiky testování bentonitu, TZ590/2022, 2022, Praha





**SÚRAO**

SPRÁVA ÚLOŽIŠŤ  
RADIOAKTIVNÍCH  
ODPADŮ

NAŠE  
BEZPEČNÁ  
BUDOUCNOST

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