

Technická zpráva číslo 309/2018

**SHRNUTÍ VÝZKUMU
ČESKÝCH BENTONITŮ PRO
HLUBINNÉ ÚLOŽIŠTĚ
- DO ROKU 2018**

Autoři: Lucie Hausmannová, Irena Hanusová a
Markéta Dohnálková

Praha, listopad 2018

Obsah

1	Úvod	7
2	Ložiska bentonitů v ČR	8
3	Popis testovaných českých bentonitů	10
3.1	Rokle	10
3.2	B75	10
3.3	BAM	10
3.4	BCV	11
4	Vlastnosti testovaných českých bentonitů	12
4.1	Chemické složení	12
4.2	Mineralogické složení	13
4.3	Kationtová výměnná kapacita (CEC)	13
4.4	Specifický povrch	14
4.5	Hydraulická vodivost	15
4.6	Bobtnací tlak	15
4.7	Mez tekutosti	16
5	Projekty / experimenty	18
5.1	Ukončené	18
5.1.1	Metody hodnocení	19
5.1.2	Mock-Up CZ	20
5.1.3	Verifikace	21
5.1.4	Blízké interakce	22
5.1.5	Stříkané bentonity	23
5.1.6	Saturační média - geochemie	24
5.1.7	Saturační média - geotechnika	25
5.1.8	MPO TIP (FR-TI1/362)	26
5.1.10	Zelené jíly	27
5.1.11	Belbar	28
5.2	Probíhající	29
5.2.1	ABM	30
5.2.2	Mock-Up Josef	32
5.2.3	DOPAS – EPSP	33
5.2.4	MACOTE	34
5.2.5	VaV UOS	35
5.2.6	Mikrobiální koroze (ZL20)	36
5.2.7	Transport 3 (ZL13)	37
5.2.8	MIND	38
5.2.9	CEBAMA	39
5.2.10	Decovalex 2019	40
5.2.11	Experimenty s UOS (ZL21)	40
5.2.12	Korozní produkty (ZL25)	41
5.2.13	Plynopropustnost (ZL 36)	42
5.2.14	Pelety	43
5.2.15	BEACON	44

5.2.16	Interakční experiment.....	45
5.2.17	BCV do 80 °C.....	46
5.2.18	Inženýrská bariéra 200°C.....	47
5.3	Plánované	48
5.3.1	EURAD – GAS.....	49
5.3.2	EURAD – HITEC.....	50
5.3.3	Korozní experiment	51
5.4	Shrnutí	52
6	Současný střednědobý plán výzkumu a vývoje.....	56
7	Závěr	57
8	Reference.....	58

Seznam použitých zkratk:

CEC	Kationtová výměnná kapacita
CV Řež	Centrum výzkumu Řež
ČVUT	České vysoké učení technické v Praze
EBS	Engineered Barrier Systems, systém inženýrských bariér
(F)AAS	(Flame) atomic absorption spectroscopy
HÚ	Hlubinné úložiště
MU	Masarykova univerzita v Brně
PVP Bukov	Podzemní výzkumné pracoviště Bukov
PC	Partial contract, který je součástí rámcové smlouvy “Utilization of foreign experience in the siting process for a deep geological repository for radioactive waste in the Czech Republic”.
THM(C)	thermo-hydro-mechanicko-chemické
UK	Univerzita Karlova v Praze
UOS	Ukládací obalový soubor
VJP	Vyhořelé jaderné palivo

Abstrakt

Tento report vznikl jako podklad pro zhodnocení výzkumu českých bentonitů, které se předpokládají využít pro výstavbu inženýrských bariér v hlubinném úložišti (HÚ). Zhodnocení bude probíhat v rámci PC08: „R&D of engineered barriers“, jehož cílem je revize a upřesnění stávajícího plánu výzkumu českých bentonitů pro inženýrské bariéry.

Tato zpráva shrnuje výzkum českých bentonitů, který byl prováděn za účelem testování jejich vhodnosti pro inženýrské bariéry v HÚ. Pro zachování přehlednosti byly vybrány jen ty bentonity, které byly komplexněji testovány (Rokle, B75, BAM a BCV). V reportu je uveden jejich popis, základní charakteristiky a porovnání jejich vlastností s bentonitem MX-80, který je referenčním materiálem ve finském a švédském projektu HÚ.

Dále jsou stručně popsány důležité výzkumné či demonstrační projekty, kde byly české bentonity zkoumány. Tento přehled projektů a jejich následné roztřídění do skupin by měl umožnit zhodnotit dosavadní práce.

Klíčová slova

Český bentonit, inženýrské bariéry, hlubinné úložiště

Abstract

This report was compiled as the basis for the assessment of the research of Czech bentonites, the use of which is anticipated in the construction of the engineered barriers of the future Czech deep geological repository (DGR). The assessment was conducted as part of PC08: “R&D of engineered barriers”, which aims to provide a review of, and refine, the existing research plan concerning Czech bentonites and their potential use in DGR engineered barriers.

The report provides a summary of the research of Czech bentonites conducted in order to test their suitability for use in the engineered barriers of the DGR. For the sake of clarity, only those bentonites that have been comprehensively tested (Rokle, B75, BAM and BCV) were selected. The report presents a description of the materials including their basic characteristics and a comparison of their properties with MX-80 bentonite which makes up the reference material in both the Finnish and Swedish DGR projects.

In addition, the report provides brief descriptions of the most important research and demonstration projects involving the investigation of Czech bentonites. It is anticipated that the overview of the projects and the classification thereof will allow for a detailed assessment of research conducted in this field to date.

Keywords

Czech bentonite, engineered barriers, deep geological repository

1 Úvod

Výzkum českých bentonitů a montmorillonitických jílů pro potřeby HÚ probíhá již od roku 1999. Nejprve se jednalo o izolované národní projekty, později se rozvinula mezinárodní spolupráce. SÚRAO je v současné době partnerem v několika evropských projektech (a to nejen ve výzkumných, ale i demonstračních full-scale experimentech).

V českém konceptu HÚ se počítá s využitím bentonitů z české provenience. Výzkum je zaměřen převážně na buffer (v oblasti backfillu existuje prozatím jen jeden národní projekt týkající se stříkaného bentonitu – viz 5.1.5).

Požadavky a parametry pro buffer i backfill jsou v českém konceptu definovány jen obecně (jsou převzaty z požadavků SKB a Posiva – Posiva SKB, 2017).

Konkrétní číselné parametry pro bezpečnostní hodnocení pro české bentonity jsou stále předmětem výzkumu a vývoje.

Tento report shrnuje přehlednou formou dosavadní informace o českých bentonitech a montmorillonitických jílech z pohledu HÚ.

2 Ložiska bentonitů v ČR

Ložiska bentonitu v České republice jsou vázána především na České středohoří a Doupovské hory, ostatní výskyty lze považovat za minoritnější (viz obr. 1).

Bentonity Českého středohoří a Doupovských hor vznikaly in-situ alterací Fe-bohatých tufů a tufitů augiticko-biotitického typu. Přínos Fe do systému byl zajištěn aktivitou Krušnohorskohárecké tektonické zóny (Franče, 1992). Během argillitizace naopak nedocházelo k odnosu Fe, proto jsou smektity v těchto bentonitech nabohaceny železem (zejm. v oktaedrických pozicích). Také akcesorické minerály obsahují výrazný podíl Fe – jedná se o Fe karbonáty a oxohydroxidy (viz tab. 1 a tab. 2).

Jednou z nejvýznamnějších ložiskových oblastí je východní okraj Doupovských hor na styku se severočeskou pánví. V okolí Kadaně a Podbořan se nachází většina zásob i největší ložiska bentonitů v České republice (Surovinové zdroje ČR a Woller (in press)). Jedním z nejdůležitějších ložisek v této oblasti je ložisko Rokle.

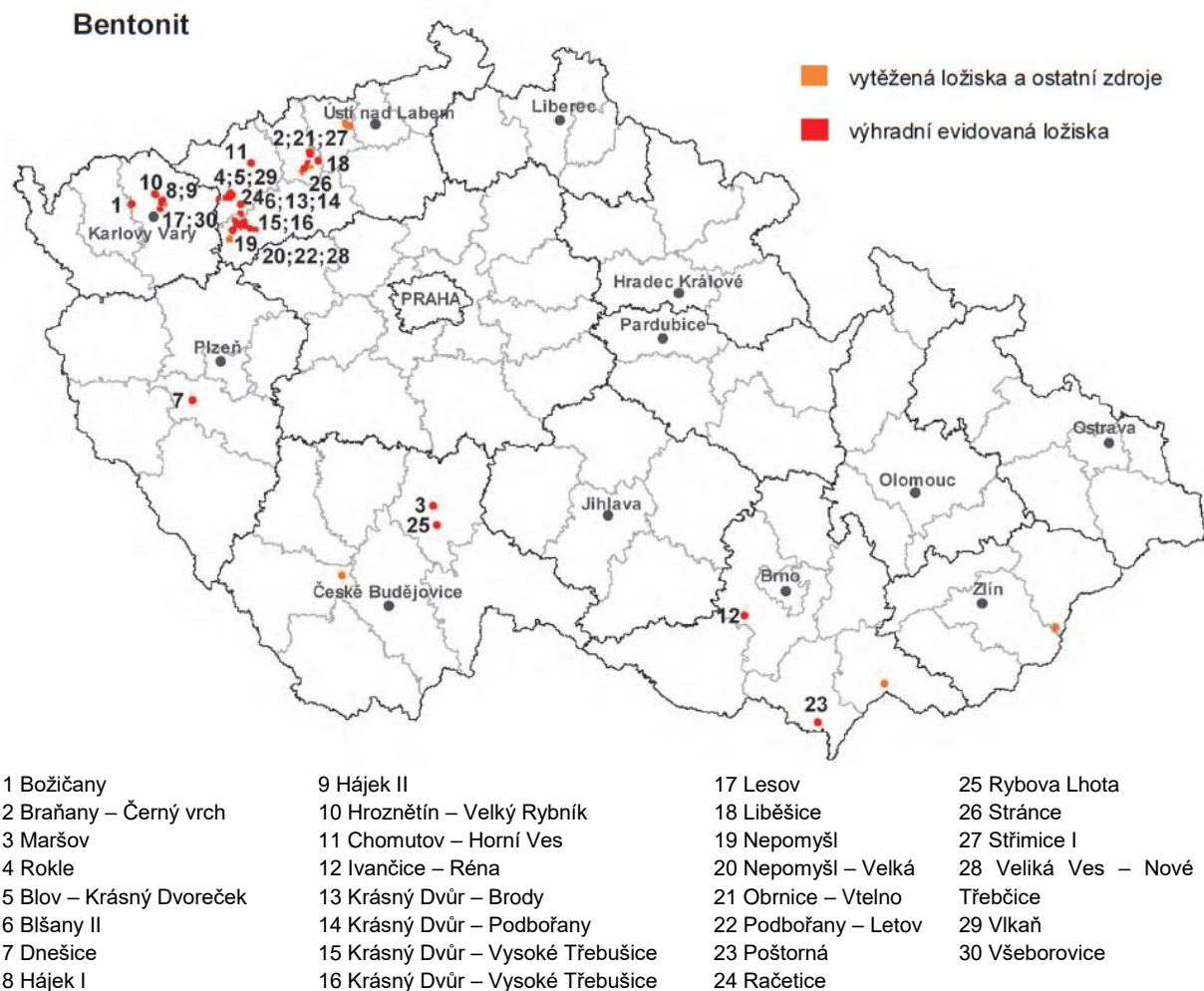
U západního okraje Doupovských hor na kontaktu s Hroznětínskou pánví jsou ložiska bentonitů soustředěna především v okolí Hroznětína. Těžba na ložisku Hroznětín – Velký Rybník byla z ekonomických důvodů ukončena v roce 1993. Převážná většina ložisek v této oblasti (kromě Všeborovic) má nepříznivé skrývkové poměry a místy i horší kvalitu suroviny než ložiska na Podbořansku, Kadaňsku a Mostecku (Surovinové zdroje ČR).

Ložiska na Mostecku – na styku jihovýchodního okraje severočeské pánve a Českého středohoří patří k další významné oblasti ložisek bentonitů v České republice. Mezi nejdůležitější ložiska tohoto regionu se řadí: Braňany – Černý vrch, Stránce a Střimice (Surovinové zdroje ČR).

Oblasti terciérních pánví (ložisko Dnešice) a jihočeské pánve (ložisko Maršov a Rybova Lhota) mají menší význam. Surovina má nižší kvalitu (Surovinové zdroje ČR). Lze ji označit jako montmorillonitický jíl s vyšší příměsí akcesorických minerálů.

V miocéních sedimentech karpatského neogénu na jižní Moravě převažují montmorillonitické jíly. Jedná se až na výjimky (ložisko Ivančice – Réna) o jakostně horší surovinu využitelnou převážně pro zemědělské účely (Surovinové zdroje ČR).

Detailnější informace o nevyužívaných ložiscích bentonitu v ČR lze najít ve zprávě Wollera 2016.



Obr. 1 - Evidovaná ložiska bentonitu v ČR (Surovinové zdroje ČR)

3 Popis testovaných českých bentonitů

Vědecko-výzkumné práce byly postupně realizovány především na čtyřech českých bentonitech, vždy se jednalo o Ca-Mg (vápenato-hořečnatý) bentonit. Nejprve byl testován bentonit z lokality 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. Více o těchto materiálech je uvedeno v nadcházejících podkapitolách. V kapitole 4 jsou prezentovány jejich vlastnosti a jejich vzájemné srovnání.

3.1 Rokle

Bentonit Rokle nese jméno ložiska, kde je těžen. Jde o klasického zástupce českých Ca-Mg bentonitů. Materiál byl dodán přímo z ložiska, což znamená, že nebyl průmyslově zpracován a byl proto do určité míry heterogenní. Pro potřeby výzkumu byl manuálně nadrcen a proset na frakci 0 - 1 mm.

Bentonit Rokle byl prvním českým bentonitem, který byl šířeji testován od roku 2001 například v rámci projektů:

- Blízké interakce (viz 5.1.4)
- Saturační média (viz 5.1.6 a 5.1.7)
- ABM (viz 5.2.1).

3.2 B75

B75 je průmyslově zpracovaný (vysušený a nadrcený) materiál z ložiska Černý vrch. Jde o Ca-Mg bentonit ze závodu Obrnice (Keramost a.s.). Chemické složení tohoto bentonitu (viz tab. 1) uvádí vyšší obsah Na_2O , což je pravděpodobně dané stopovou aktivací uhličitánem sodným během zpracování bentonitu. Vstupní vlhkost materiálu byla okolo 6 %. Pro experimentální účely byl poprvé dodán v roce 2010. V dalších letech byl znovu dodán např. pro projekt DOPAS - EPSP (viz 5.2.3). Vlastnosti materiálů se v závislosti na roce dodání lehce měnily, převážně kvůli různé míře jejich Na^+ aktivace. Jako referenční materiál byl stanoven ten z roku 2010, který byl testován v rámci mnoha projektů, mezi ty nejvýznamnější patří:


- Mock-Up Josef (viz 5.2.2)
- CEBAMA (viz 5.2.9).

3.3 BAM

Průmyslově zpracovaný (vysušený a nadrcený) Ca-Mg bentonit, který je směsný - z více ložisek vlastněných jejich zpracovatelem Keramost a.s. Materiál byl dodán v roce 2014 s počáteční vlhkostí 7-10 %. Tento produkt již není dostupný, a proto bylo upuštěno od jeho dalšího testování.

BAM byl testován v rámci projektu „Výzkumná podpora pro bezpečnostní hodnocení hlubinného úložiště“ v několika dílčích částech (zadávacích listech), např.:

- Korozní produkty (viz 5.2.12)
- Mikrobiální koroze (viz 5.2.6)
- Plynopropustnost (viz 5.2.13)

 SÚRAO	Shrnutí výzkumu českých bentonitů pro hlubinné úložiště – do roku 2018	Evidenční označení:
		TZ 309/2018

3.4 BCV

Průmyslově zpracovaný (vysušený a nadrcený) bentonit z ložiska Černý vrch. Jde o Ca-Mg bentonit ze závodu Obrnice (Keramost a.s.). Oproti materiálu B75 se liší zachováním svého složení během zpracování, nebyl Na⁺ aktivován ani ve stopovém množství. Materiál byl dodán v roce 2017 s počáteční vlhkostí 7-10 %. Charakteristika tohoto materiálu je shrnuta v reportu, který byl vypracován v rámci zadávacího listu (viz Transport 3). SÚRAO předpokládá použití tohoto materiálu pro nadcházející výzkum, než bude rozhodnuto o finálním bentonitu pro HÚ.

Tento materiál bude použit např. pro:

- Interakční experiment (viz 5.2.16)
- Korozní experiment (viz 5.3.3)
- BEACON (viz 5.2.15)
- Inženýrská bariéra 200°C (viz 5.2.18)

4 Vlastnosti testovaných českých bentonitů

V nadcházejících kapitolách jsou shrnuty základní charakteristiky českých bentonitů. Současně jsou tyto české bentonity porovnány s bentonitem MX-80, který je referenčním materiálem pro inženýrské bariéry v HÚ v řadě evropských zemí např. ve Švédsku, Finsku a Švýcarsku. Porovnání bentonitů B75, BAM a BCV vychází z porovnání prezentovaného ve zprávě od Červinka et al. (2018).

Bentonit Rokle byl testován jako pilotní a některé hodnoty byly neporovnatelné, proto nejsou v některých případech tyto hodnoty uvedeny, aby nedocházelo k zavádějícím závěrům při interpretaci.

4.1 Chemické složení

Chemické složení (tj. zastoupení jednotlivých hlavních a vedlejších prvků) bentonitu bylo 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.

Výsledky silikátových analýz jsou uvedeny v tab. 1, kde jsou dobře patrné zvýšené obsahy Fe_2O_3 a FeO , což odpovídá genezi bentonitů z ložiska Rokle a Černý Vrch.

Tab. 1 - Výsledky silikátové analýzy pro české bentonity. Reference: Rokle - Křížová et al. (2010), B75 - Červinka a Hanuláková (2013), BAM - Červinka a Gondolli (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 ₂ O	9.83	-	-	-
+H ₂ O	6.71	-	-	-
SiO ₂	43.72	51.91	49.99	49.75
TiO ₂	4.17	2.28	3.1	3.04
Al ₂ O ₃	13.85	15.52	14.56	14.8
Fe ₂ O ₃	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 ₂ O	0.94	1.27	0.9	1.15
Na ₂ O	0.26	1.21	0.19	0.34
Li ₂ O	0.0021	-	-	-
S	0.01	-	-	-
CO ₂	0.25	5.15	(4.53)	2.29
P ₂ O ₅	0.83	0.4	0.7	0.86
C	0	-	-	-

4.2 Mineralogické složení

Semikvantitativní mineralogie byla stanovena na základě rentgenografických dat a silikátových analýz Rietveldovou metodou. Tato metoda je poměrně přesná, procentuální zastoupení jednotlivých minerálních fází bylo stanoveno s chybou $\pm 0.5\%$ (viz tab. 2).

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.

Právě 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.

Tab. 2 – Mineralogické zastoupení jednotlivých fází. Reference: Rokle - Křížová et al. (2010), B75 - Červinka a Hanuláková (2013), BAM - Červinka a Gondolli (2015), BCV - stanoveno v rtg. laboratoři ČGS, MX-80 – Lajudie et al. (1996)

Minerál (% hm.)	Rokle	B75	BAM	BCV	MX-80
Smektit	66,64	75,5	87,8	87	75
K-slídy	15,5	3,9	N.D.	N.D.	N.D.
Kaolinit	17,17	3,1	N.D.	1,5	N.D.
Fáze SiO ₂	N.A.	9,5	5,3	8,5	15,2
Kalcit	0,66	3,1	N.D.	2	1,4
Anatas	N.D.	2,6	3,9	1	N.D.
Fe-oxidy, Goethit	N.D.	N.D.	N.D.	<1	N.D.
(Mg)-siderit	N.D.	1,8	3,1	N.D.	N.D.
Ankerit	N.D.	0,5	N.D.	N.D.	N.D.
Analcim	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Amorfní fáze	N.D.	N.A.	N.A.	N.D.	N.D.
Živec	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	5 - 8

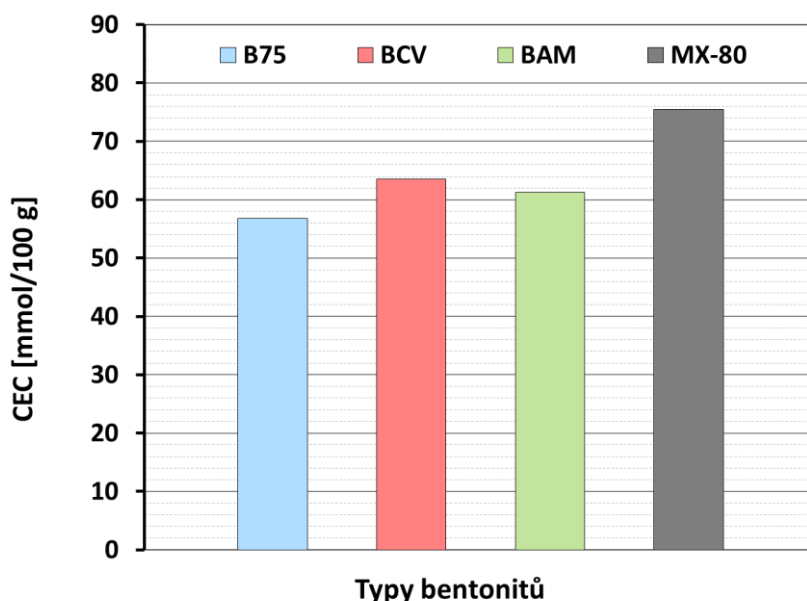
4.3 Kationtová výměnná kapacita (CEC)

Kationtová výměnná kapacita je veličina popisující schopnost materiálu (bentonitu) vyměňovat kationty s okolním prostředím. Udává se v mmol/100g nebo v meq/100g.

U všech vzorků bentonitu bylo stanovení CEC provedeno pomocí metodiky Cu(II)-trien, porovnání výsledných hodnot je znázorněno na obr. 2.

Naměřené hodnoty CEC dobře korelují s obsahem smektitu v bentonitech (viz tab. 2).

Hodnoty CEC jsou u českých bentonitů velmi podobné, rozdíly lze interpretovat drobnými nehomogenitami v rámci jednoho ložiska nebo mezi jednotlivými ložisky.



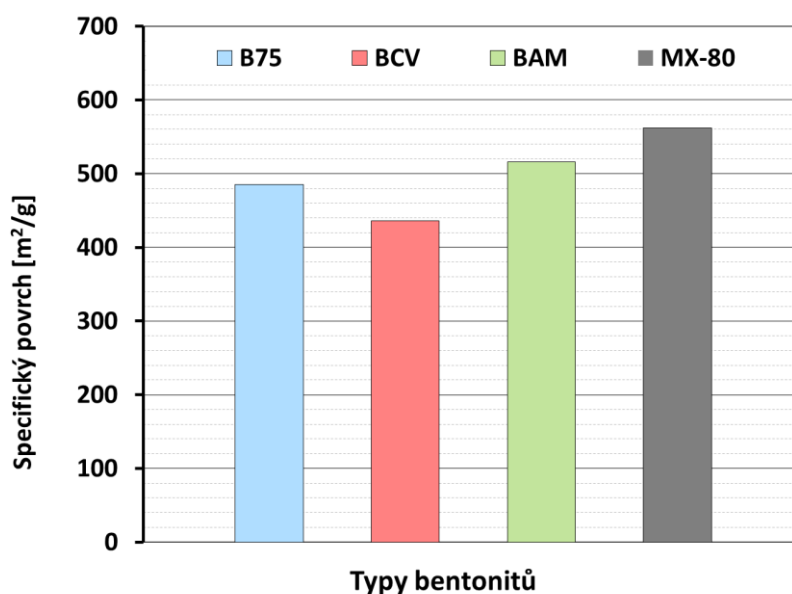
Obr. 2 – Porovnání hodnot CEC u českých bentonitů a MX-80. Reference: B75 - Červinka a Hanuláková (2013), BAM - Červinka a Gondolli (2015), BCV - Červinka et al. (2018) a MX-80 – Meier & Kahr (1999)

4.4 Specifický povrch

Pomocí adsorpce monovrstvy molekul polární kapaliny (zde Ethylenglykol-monomethylether, tzv. EGME) byl stanoven vnější i vnitřní (mezivrství) povrch jílových částic.

Bentonity mají obecně vysoké hodnoty specifického povrchu, což úzce souvisí se sorpčními schopnostmi tohoto materiálu.

Z obr. 3 je patrná nižší hodnota specifického povrchu u bentonitu BCV, což nekoreluje s jeho vysokým obsahem smektitu (tab. 2). Protože se jedná o nově testovaný materiál, bude tento jev předmětem dalšího výzkumu.



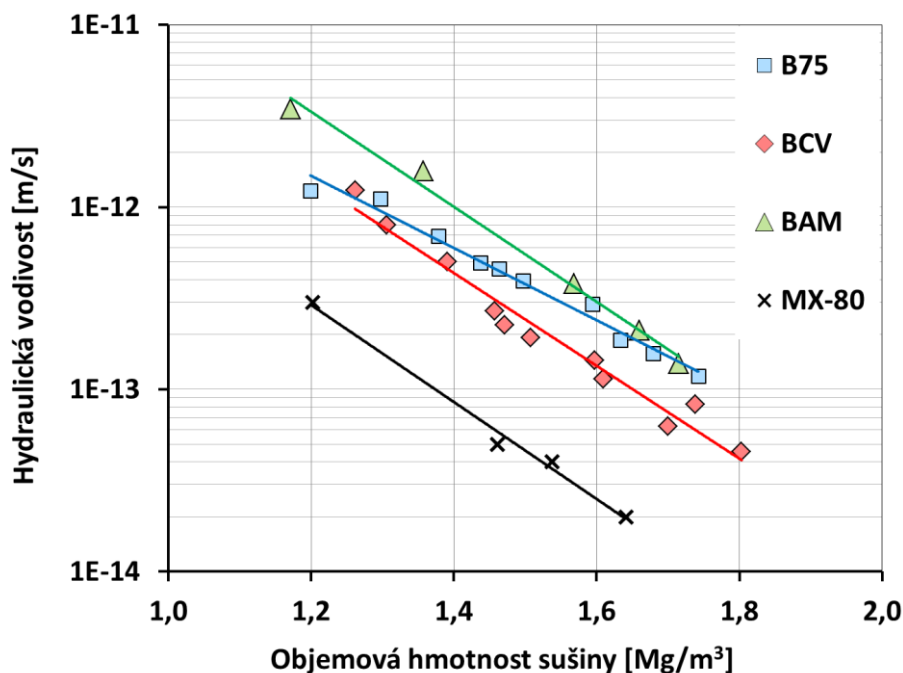
Obr. 3 – Porovnání hodnot specifického povrchu českých bentonitů a MX-80. Reference: BAM, B75 – Červinka et al (2015), BCV - Červinka et al. (2018), MX-80 - Müller-Vonmoos & Kahr (1983)

4.5 Hydraulická vodivost

Hydraulická vodivost je parametr popisující schopnost průtoku kapaliny prostředím (zeminou) účinkem hydraulického sklonu (gradientu). Je závislá jak na vlastnostech prostředí, tak na vlastnostech kapaliny. Výpočet vychází z Darcyho zákona pro ustálené proudění.

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 mezivrstvi. Detailnější rozbor faktorů ovlivňujících hydraulickou vodivost je uveden např. v disertační práci od L. Hausmannové (2017).

České bentonity mají stejný typ mezivrstevních kationtů (převaha Ca^{2+} a Mg^{2+}) a s přihlédnutím na rozptyl měření jsou jejich hodnoty hydraulické vodivosti srovnatelné (viz obr. 4). Oproti tomu MX-80, který má převahu sodných kationtů v mezivrstvi, má hodnoty hydraulické vodivosti znatelně nižší.



Obr. 4 – Hydraulická vodivost českých bentonitů a MX-80. Reference: BAM – stanoveno v laboratoři CEG (obj. č. OV2017-6132), B75 – Hausmannová (2017), BCV – Červinka et al. (2018) a CEG-nepublikovaná data, MX-80 – Karnland (2006)

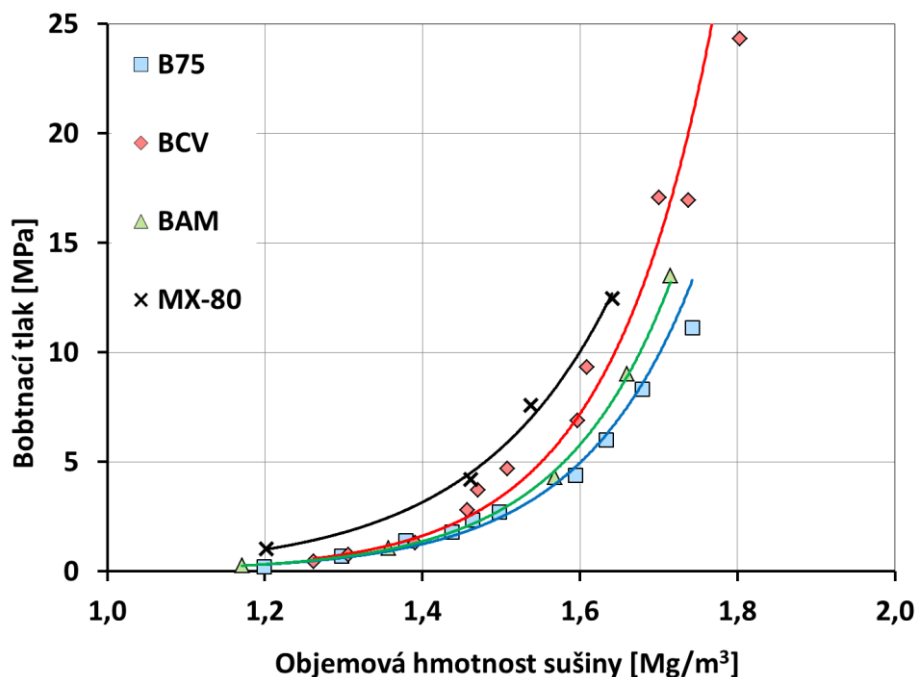
4.6 Bobtnací tlak

Bobtnavé materiály (např. bentonity či jiné montmorillonitické jíly) mají schopnost zvětšovat svůj objem sorbováním vody. Bobtnací tlak je generován bobtnavým materiálem, jemuž je při kontaktu s vodou bráněno ve změně objemu.

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 roste bobtnací tlak. Vyšší bobtnací tlak je také udáván pro bentonity s vyšším podílem smektitu a pro bentonity

s převahou Na^+ v mezivrství. Detailnější rozbor faktorů ovlivňujících bobtnací tlak je uveden např. v disertační práci od L. Hausmannové (2017).

České bentonity mají stejný typ mezivrstevních kationtů (převaha Ca^{2+} a Mg^{2+}) a s přihlédnutím na rozptyl měření jsou jejich hodnoty bobtnacího tlaku srovnatelné (viz obr. 4). MX-80, který má převahu sodných kationtů v mezivrství, má hodnoty bobtnacího tlaku vyšší.



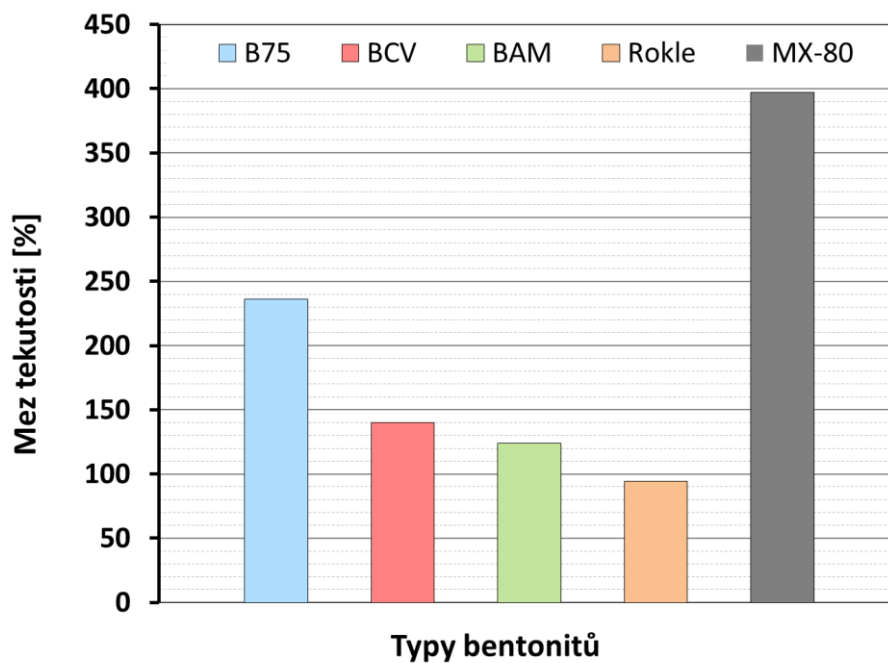
Obr. 5 – Bobtnací tlak českých bentonitů a MX-80. Reference: BAM – stanoveno v laboratoři CEG (obj. č. OV2017-6132), B75 – Hausmannová (2017), BCV – Červinka et al. (2018) a CEG-nepublikovaná data, MX-80 – Karnland (2006)

4.7 Mez tekutosti

Chování jílového materiálu je závislé na jeho vlhkosti. Při vysoké vlhkosti se bentonit stává kašovitý až tekutý. Tekutý stav odpovídá případu, kdy bentonit neklade prakticky žádný odpor proti smykovému přetvoření. Vlhkost, při které bentonit již vykazuje určitou smykovou pevnost, je uvažována za hraniční mezi stavem tekutým a plastickým. Je označována jako mez tekutosti.

Absolutní hodnoty tohoto parametru nejsou pro potřeby HÚ relevantní, jelikož plasticita jím popisovaná je u všech bentonitů dostatečná. Mez tekutosti může však sloužit a často slouží jako indikátor změn materiálu. V oblasti geotechnického testování je to indikátor nejcitlivější. Jeho velkou výhodou je jednoduchost a rychlost vyhodnocení.

Na obr. 6 jsou graficky porovnány hodnoty meze tekutosti u českých bentonitů a MX-80.



Obr. 6 – Mez tekutosti českých bentonitů a MX-80. Reference: BAM – stanoveno v laboratoři CEG (obj. č. OV2017-6132), B75 – Holíková (2011), BCV - Červinka et al. (2018), MX-80 – Davies et al. (2017)

5 Projekty / experimenty

Konkrétní studie zaměřené na výzkum možnosti využití českých bentonitů pro HÚ byly realizovány až po roce 2000. V nadcházejících kapitolách jsou uvedeny všechny zásadní projekty, jak české tak mezinárodní. Popis projektů je velmi stručný, avšak je vždy uveden zdroj, kde lze nalézt detailnější informace. Některé části textů jsou přejaté z uvedených referencí. Projekty jsou rozděleny do třech skupin: ukončené, probíhající a plánované.

Mezinárodní projekty jsou specifické velkým počtem účastníků, obsáhlejším cílem výzkumu a větším počtem testovaných materiálů. Zapojení českých organizací je většinou formou konsorcia se společným cílem výzkumu, přičemž je vždy tímto CZ konsorciem zkoumán český bentonit. U těchto projektů bude popis zaměřen jen na ty části, kde byl řešen český bentonit.

5.1 Ukončené

Níže uvedené experimenty si kladly za cíl vytipovat a popsat jílové suroviny vhodné pro HÚ (bentonity a montmorillonitické jíly české provenience). Studována byla především mineralogie, chemie, geochemie a geotechnika. Jedním z významných cílů těchto projektů bylo vytvořit soubor verifikovaných metodik pro jednotlivá stanovení důležitých parametrů.

Po pilotní charakterizaci bentonitů a montmorillonitických jílu se experimenty zaměřily také na interakce materiálů relevantních pro HÚ a výstavbu fyzikálního modelu bufferu (Mock-Up CZ).

Na základě dat získaných z uvedených experimentů byla naplánována další experimentální fáze, která se podrobněji věnuje studiu interakcí materiálů v prostředí HÚ, matematickému modelování, výstavbě a demonstraci v in-situ prostředí.

Výčet ukončených projektů/experimentů, které jsou v nadcházejících kapitolách stručně popsány:

1. Metody hodnocení
2. Mock-Up CZ
3. Verifikace
4. Blízké interakce
5. Stříkané bentonity
6. Saturační média – geochemie
7. Saturační média – geotechnika
8. MPO TIP (FR-TI1/362)
9. Zelené jíly
10. Belbar

5.1.1 Metody hodnocení

Plný název: Zavedení metod hodnocení inženýrských bariér

Reference: Vokál A. (2001, 2003)

Doba řešení: 2001 - 2003

Řešitel: ÚJV Řež, VŠCHT

Bentonit: Rokle

Popis: V rámci tohoto projektu byly zavedeny metodiky umožňující hodnotit vlastnosti materiálů UOS v prostředí kandidátních lokalit pro HÚ. Pro zjištění náchylnosti kovových materiálů k lokální korozi za podmínek HÚ byly zavedeny metodiky elektrochemického stanovení koroze kovů. V rámci první etapy byly prostudovány různé modely predikce koroze kovových kontejnerů umožňující odhadnout životnost kontejneru v prostředí úložiště.

V rámci další etapy byly zavedeny metodiky stanovení migračních parametrů radionuklidů v bentonitu. Byla provedena řada experimentů studujících vliv různých faktorů (např. pH, Eh, přítomnost určitých minerálních fází) na sorpci radionuklidů. Bylo zjištěno, že i menší přítomnost sekundárních minerálních fází, které se mohou v průběhu vývoje úložiště stát součástí bentonitu, ovlivňuje významně sorpci některých radionuklidů na bentonit.

V poslední etapě byly studovány modely výpočtu tzv. zdrojového členu, tj. množství a rychlosti uvolňování radionuklidů z úložiště do geosféry. V rámci etapy byly ověřeny výpočetní kódy PAGODA a MIVCYL (vyvinutý na FJFI). Ze srovnání těchto kódů na výpočtech rychlosti uvolňování vybraných radionuklidů (rozpadový řetězec 4N+3 zahrnující ^{239}Pu , ^{129}I a ^{14}C) vyplynula velmi dobrá shoda výsledků potvrzující schopnost těchto kódů modelovat rychlost uvolňování radionuklidů z úložiště do geosféry.

Cíl: Cílem bylo zavést metody hodnocení fyzikálně chemických a radiochemických vlastností materiálů pro hodnocení inženýrských bariér hlubinného úložiště radioaktivních odpadů v rozsahu následujících etap:

Etapa 1: Zavedení experimentálních metod stanovení rychlosti degradace úložného kontejneru VJP pro podmínky HÚ

Etapa 2: Zavedení metod stanovení sorpce a difúze na inženýrských bariérách úložišť

Etapa 3: Výzkum a vývoj modelů zdrojového členu hlubinného úložiště

Závěr a přínos pro HÚ a jeho podpůrný program:

Byla zavedena metodika měření rychlosti anaerobní koroze kovových materiálů měřením vývoje vodíku a doplňující metodiky měření elektrochemických potenciálů umožňující stanovit náchylnost kovových materiálů k lokální korozi za daných podmínek.

Byly vyvinuty, ověřeny a zavedeny metodiky stanovení migračních parametrů radionuklidů v bentonitu.

Byly rovněž zavedeny pokročilé metodiky výpočtů rychlosti uvolňování radionuklidů z úložiště do geosféry, jež jsou nezbytné pro posouzení bezpečnosti úložišť radioaktivních odpadů.

V rámci tohoto projektu byla také vytvořena databáze fyzikálně-chemických vlastností inženýrských bariér, která bude sloužit zejména k uchování vstupních parametrů pro výpočetní kódy.

5.1.2 Mock-Up CZ

Plný název: Mock-Up CZ experiment

Reference: Pacovský et al. (2007)

Doba řešení: 2001 - 2005

Řešitel: ČVUT (CEG)

Bentonit: Rokle

Popis: Mock-Up-CZ experiment simuloval chování bentonitové bariéry v HÚ. Jednalo se o fyzikální model v KBS-3V uspořádání s použitím českého bentonitu z lokality Rokle v podobě lisovaných bloků. Topidlo umožnilo zatěžovat bentonitovou vrstvu zvýšenou teplotou do max. 95 °C. Fyzikální model byl uměle saturován syntetickou granitickou vodou.

Celý experiment byl plně instrumentován (6 měřících profilů), takže bylo možné studovat proces saturace a vývoj teplot v bentonitu.

Po ukončení provozu Mock-Up-CZ došlo k disantlingu celého experimentu. Vzorky byly detailně charakterizovány – geotechnické parametry, mineralogie a geochemie.

Cíl: Účelem projektu byla výstavba a několikaletý provoz fyzikálního modelu Mock-Up-CZ v laboratorním prostředí, který simuluje systém vertikálního ukládání radioaktivních odpadů v hlubinném úložišti.

Závěr a přínos pro HÚ a jeho podpůrný program: Experiment Mock-Up-CZ poskytl informace a data o chování českého bentonitu v podmínkách blízkých hlubinnému úložišti. Jednalo se o první experiment tohoto typu v ČR.


Bentonitová vrstva (směs bentonitu Rokle, křemenného písku Provodín a grafitu) byla v experimentu zatěžovaná teplotou do 100 °C a byla saturována syntetickou granitickou vodou. Z měřených hodnot tlaků bylo zjištěno, že došlo k plné saturaci bentonitové bariéry.

Přestože byla směs bentonitu, písku a grafitu homogenizována před ulisováním jednotlivých bloků, došlo v experimentu k vytvoření nehomogenních zón, více či méně nabohacených pískem nebo grafitem.

Z detailnějších mineralogických analýz (po disantlingu) vyplynulo, že v některých profilech došlo k drobným změnám minerálních asociací a k tvorbě sekundárních fází (zejm. sulfátů). Zastoupení těchto novotvořených fází je však v celkovém měřítku experimentu zanedbatelné.



Obr. 7 - VLEVO: instalace topidla do modelu, VPRAVO: sestavený Model Mock-Up-CZ (Čechová, 2005)

 SÚRAO	Shrnutí výzkumu českých bentonitů pro hlubinné úložiště – do roku 2018	Evidenční označení:
		TZ 309/2018

5.1.3 Verifikace

Plný název:	Verifikace substituce bentonitů za montmorillonitické jíly
Reference:	Příkryl et al. (2004), Pacovský et al. (2004)
Doba řešení:	2002 - 2004
Řešitel:	UK PřF, ČVUT - CEG
Bentonit:	Bentonity české provenience

Popis: V rámci tohoto projektu byla provedena základní mineralogická, chemická a geotechnická charakteristika vzorků bentonitů a montmorillonitických jílu české provenience. Jednalo se o vzorky bentonitů z ložiska Rokle, Černý vrch, Stránce, Nepomyšl a Krásný Dvůr. Dále pak o montmorillonitické jíly z ložiska Maršov, Dnešice a Zelená – Skalná.

Všechny vzorky byly kopané přímo z lokalit, nebyly průmyslově zpracovány. Před analytickými pracemi byly homogenizovány, ale přesto vykazovaly značnou míru nehomogenity.

U všech vzorků byla provedena základní identifikace pomocí RTG difrakce. Amorfní minerály byly stanoveny pomocí FTIR. Na základě rentgenografických dat, dat z infračervené spektrometrie a silikátových analýz, bylo metodou CQPA vypočítáno procentuální zastoupení jednotlivých minerálních fází.

U všech vzorků byla také stanovena kationtová výměnná kapacita, vodorozpustné soli a specifický povrch. U vybraných vzorků byly pak studovány sorpční charakteristiky.

U všech vzorků byly dále stanoveny základní geotechnické parametry: bobtnací tlak, swell index, hydraulická vodivost, mez tekutosti, tepelná vodivost atd.

Cíl: Účelem projektu byla pilotní charakterizace různých bentonitů a montmorillonitických jílu české provenience.

Závěr a přínos pro HÚ a jeho podpůrný program: Byla provedena základní mineralogická a chemická charakteristika vzorků z vybraných bentonitových ložisek ČR a vybraných českých montmorillonitických jílu.

Nejdůležitějším závěrem z pohledu geotechnického výzkumu bylo, že je možné, aby bentonity byly nahrazeny montmorillonitickými jíly v oblasti backfillu.

Po 9 měsících zatěžování bentonitů a montmorillonitických jílu teplotou 80 a 110 °C nebyly pozorované žádné degradační změny.

Nejlepší vlastnosti (z pohledu využití v HÚ) vykazoval bentonit z ložiska Rokle a Dnešice.

Budoucí výzkum v této oblasti by měl být zaměřen na dlouhodobější zatěžovací experimenty.

5.1.4 Blízké interakce

Plný název: Výzkum procesů pole blízkých interakcí hlubinného úložiště vyhořelého jaderného paliva a vysoce aktivních odpadů

Reference: Vokál et al. (2008)

Doba řešení: 2005 -2008

Řešitel: ÚJV Řež, ČVUT, VŠCHT, TUL

Bentonit: Rokle

Popis: V rámci projektu byl řešen bentonit ve dvou oblastech:

1) Studium migrace a retardace vybraných radionuklidů v materiálech bariér

- Hodnocení migrace jednomocných a dvojmocných kationtů, reprezentovaných cesiem a stronciem, aniontů technecia a jódu a vlivu Eh na přechod technecia do kationtové formy vlivem různých podmínek, například přidávkem sloučenin železa v různých valenčních stavech.
- Hodnocení difúze radionuklidů v bentonitu a výzkum pórové vody bentonitu.

2) THMC procesy

- Zatěžování bentonitu po celkovou dobu 16 měsíců.
- Matematický model – tepelných podmínek, výpočet transportu vody v bufferu a napjatostních podmínek v UOS a v bufferu

Cíl: Účelem projektu bylo stanovení vědeckých a technických základů pro hodnocení bezpečnostní funkce „zachycení a minimalizování úniku“ pole blízkých interakcí hlubinného úložiště vysoce aktivních odpadů a vyhořelého jaderného paliva v koncepci úložného systému navrženého referenčním projektem hlubinného úložiště.

Závěr a přínos pro HÚ a jeho podpurný program: Výsledky zdokonalené charakterizace a rozvoje modelu difúze vybraných kritických radionuklidů vrstvou kompaktovaného bentonitu by měly být v dalším období začleněny do zdokonaleného modelu zdrojového členu. Byly analyzovány nejistoty jednotlivých kroků stanovení distribučního koeficientu (K_d) a posouzeny jejich příspěvky pro zhodnocení celkové nejistoty. Bylo potvrzeno, že výsledky jsou velmi závislé na experimentálních podmínkách a zvoleném měřítku experimentu. Bylo zjištěno, že chování bentonitu Rokle (Ca-Mg bentonit) je velmi odlišné od chování bentonitu uvažovaného ve švédském konceptu úložiště (Na bentonit). Příčinou je pravděpodobně velká heterogenita složení bentonitu Rokle, obsahujícího více než 30 % doprovodných a akcesorických minerálů. Pro další rozvoj této problematiky bude třeba dále vyřešit i další problematické otázky, jako je např. vliv filtru v difúzní cele, vliv heterogenity bentonitu či vliv nelineárního charakteru sorpčních izoterm radionuklidu na bentonitu.

Zatěžování bentonitu (různé kombinace teploty a syčení vodou) po dobu až 16 měsíců, nevyvolalo relevantní degradaci geotechnických parametrů testovaného bentonitu z lokality Rokle. Při studiu degradačních vlivů na bentonit bude nutné při dalším výzkumu využívat procedury umožňující působení extrémního zatížení, kumulace různých typů zatížení, cyklického zatížení, či jejich kombinaci, a to za současného prodloužení časového faktoru jejich působení.

Na referenčních úlohách matematického modelování bylo provedeno srovnání s výsledky výpočtu v rámci švédského a finského programu HÚ, které potvrdilo správnost použitých modelů a rovněž významný vliv rozdílu tvaru a rozměru obalového souboru mezi českým a skandinávským konceptem na odvod tepla. Pro budoucí matematické výpočty byly identifikovány složitější vlivy, které v použitých modelech nebyly zahrnuty a dle zahraničních studií mají velký význam: konstrukční spáry mezi obalovým souborem, bufferem a hostitelskou horninou, časový postup zaplňování úložiště a počáteční tepelná vodivost tlumícího materiálu v závislosti na obsahu vody.

5.1.5 Stříkané bentonity

Plný název: 1. projekt: Technologie stříkaného backfillu, 2. projekt: Výzkum možnosti využití stříkaného bentonitu pro konstrukci těsnicí vrstvy hlubinného úložiště

Reference: Vašíček R. (2009), Pacovský et al. (2012)

Doba řešení: 2007-2012

Řešitel: ČVUT

Bentonit: UB bentonit

Popis: Výzkum a vývoj technologie stříkaných jííl probíhal v rámci dvou projektů. Stříkané jíly mohou být v budoucnu využity pro výstavbu těsnicích vrstev v HÚ, zejména v hůře dostupných oblastech – např. přístropí zavážecích chodeb.

Postupně byly odzkoušeny dvě technologie, které vychází z technologie stříkaných betonů, využívané především v podzemním stavitelství. První byla testována technologie stříkaného betonu suchou metodou, kde musela být upravena nástřiková tryska. V rámci druhého projektu pak byla odzkoušena odlišná sestava, která se používá pro mokrou metodu. Základním předpokladem úspěšného použití obou metod je dosažení přijatelného zhutnění materiálu (dostatečně vysoké objemové hmotnosti sušiny).

Pro testování byl vybrán granulovaný bentonit UB, který při zvolení vhodného obsahu vody nepráší a vykazuje přijatelné zhutnění. Tento bentonit je průmyslovým produktem společnosti Keramost a.s.

Cíl: Cílem projektu bylo nalezení vhodné technologie pro stříkané jíly s cílem dosažení maximální objemové hmotnosti nástřiku a provedení zkušebního nástřiku v Podzemí laboratoři Josef.

Závěr a přínos pro HÚ a jeho podpůrný program: Po optimalizaci obou technologií bylo dosaženo suché objemové hmotnosti $1,45 \text{ g/cm}^3$ suchou metodou a $1,36 \text{ g/cm}^3$ mokrou metodou. Vývoj byl ukončen výstavbou modelu zaplnění přístupových štol hlubinného úložiště radioaktivních odpadů. Tímto modelem byla technologie stříkaného backfillu suchou metodou za použití materiálu utrabentonitu UB úspěšně odzkoušena v podzemí.



Obr. 8 - VLEVO: zkušební nástřik do odběrných prstenců a VPRAVO: Model zastříkání přístropí v podzemní laboratoři Josef

5.1.6 Saturační média - geochemie

Plný název: Sledování dlouhodobé stability inženýrských bariér na bázi bentonitu s využitím zatěžovacích procedur a experimentů in-situ a hodnocení jejich retardační funkce

Reference: Křížová et al. 2010

Doba řešení: 2008 - 2010

Řešitel: VŠCHT, MU, UK

Bentonit: Rokle, dále pro porovnání Febex a materiál zatížený z Mock-up CZ

Popis: Projekt je úzce propojen s projektem Saturační média – geotechnika (viz 5.1.7) Popis vzorků, způsob a doba jejich zatížení je uveden ve zmíněném navazujícím projektu.

Projekt byl rozdělen do několika etap, jejichž předmětem byla:

- Analýza složení pórových vod a jejich vztah ke zdrojovému bentonitovému materiálu
- Vyhodnocení transportních a retardačních procesů zvolených radionuklidů
- Mineralogické, chemické a strukturní změny zdrojového materiálu
- Zhodnocení dlouhodobé stability bentonitového materiálu v daném prostředí
- Vytvoření geochemického modelu

Cíl: Projekt si klade za cíl experimentální výzkum dlouhodobé stability inženýrských bariér na bázi bentonitu s využitím zatěžovacích procedur realizovaných za laboratorních podmínek a v prostředí podzemní laboratoře Josef, vedoucích ke ztrátě jejich retardační funkce pro radioaktivní kontaminanty. Pro tento účel byly vyhodnoceny chemické, geochemické a mineralogické změny bentonitových směsí s ohledem na požadavky inženýrských bariér. Dále byl v rámci projektu vytvořen kompletní geochemický model interakce bentonitových substrátů se sytíci médii.

Závěr a přínos pro HÚ a jeho podpůrný program:

Výsledky chemických, geochemických a mineralogických výzkumů lze shrnout do následujících závěrů:

1. Interakce mezi sledovanými bentonity a vodnými médii je při teplotě 95 °C poměrně rychlá, po třech měsících bylo dosaženo relativně stabilního složení vod i substrátů (bentonity saturované vodou).
2. Při vzájemných interakcích dochází ve vodě k výraznému snižování poměru Mg/Ca a K/Na, který ukazuje na přednostní vázání hořčíku a draslíku v substrátech.
3. Přes stabilní mineralogické složení substrátů z výsledků vyplývá, že v dlouhodobějším časovém horizontu (v rámci studie 1,5 roku) dochází ke konsolidaci –dalšímu uspořádávání minerálních struktur, kt. je doprovázeno snižováním koncentrace složek ve vodě v rovnováze s bentonitovým substrátem, což vede k další postupné mírné změně specifického povrchu.
4. U bentonitu Rokle nebyl zaznamenán vznik nových fází.
5. U bentonitu Rokle byl zaznamenán pokles měrného povrchu v oblasti mezopórů.
6. V rámci geochemických změn sytících médií a substrátů dochází k nevýznamným změnám, modelové složení substrátů se mění do 0,5 hmotnostního procenta.
7. Z výsledků sorpčních studií cesného kationtu na bentonitových materiálech Febex a Rokle je patrné, že prodlužující se doba interakce bentonitového materiálu se syntetickými saturačními médii nemá významný vliv na změnu sorpčního chování cesného iontu.
8. Odlišné složení syntetických saturačních médií neovlivnilo zastoupení chemických forem I.
9. Byla potvrzena stabilita iontů I⁻ v širokém rozpětí pH a Eh odpovídající zároveň charakteristickým hodnotám pro reálné vodné prostředí vč. potenciálních anaerobních podmínek v HÚ.

5.1.7 Saturační média - geotechnika

Plný název: Experimentální výzkum materiálu na bázi bentonitu při dlouhodobém působení teploty a saturačního média s extrémními účinky

Reference: Pacovský et al. (2010)

Doba řešení: 2008 - 2010

Řešitel: ČVUT

Bentonit: Rokle, dále pro porovnání Febex a materiál zatížený z Mock-up CZ

Popis: V rámci projektu byl realizován soubor geotechnických zkoušek na třech typech materiálu (bentonitu) v kombinaci se dvěma různými sytíciemi medii při jejich dlouhodobém zatěžování. Část materiálu byla zatěžována teplem při současném syčení v tlakových nádobách v laboratoři. Část materiálu byla umístěna ve vrtech v Podzemní laboratoři Josef. Realizovány byly také fyzikální modely rozhraní hutněný/práškový bentonit, kde byl modelován (sledován) postup homogenizace této oblasti. Součástí projektu jsou kompletní výsledky geotechnických zkoušek provedených na materiálech získaných postupně při čtyřech odběrech (3, 6, 12 a 18 měsíců) a jejich porovnání s výsledky nezatíženého materiálu.

Mezi testované vlastnosti patří: zejm. atterbergovy meze (mez tekutosti a mez plasticity), hydraulická vodivost, bobtnací tlak, pevnost v prostém tlaku lisovaných prefabrikátů a termofyzikální vlastnosti.


Na práce prováděné v CEG navazují činnosti dalších organizací v rámci projektu „Saturační média – geochemie“ (viz 5.1.5).

Cíl: Stanovení vlivu saturačního média (s extrémním chemismem) a teploty na stabilitu geotechnických parametrů bentonitu (THM stabilita). Dále se jedná o stanovení podmínek (chemismus, teplota, čas), při kterých dochází k degradaci rozhodujících geotechnických parametrů testovaných bentonitů.

Závěr a přínos pro HÚ a jeho podpůrný program: Rozdíly v chování testovaných bentonitů byly, vzhledem k jejich odlišnostem, očekávané. Ačkoliv jedno ze sytících medií bylo připraveno jako „maximálně agresivní“, tj. s velkým potenciálem pro vyvolání změn v bentonitu, jejich vliv se z hlediska geotechniky ukazuje jako neprůkazný, tj. rozhodující pro dlouhodobé chování testovaných bentonitů se zdají být jiné charakteristiky, než složení sytícího media. Zejména bude vhodné soustředit pozornost na vliv stavu materiálu během zatěžování. Dalším z důležitých bodů by mělo být určení nejistot stanovení jednotlivých parametrů na bentonitech při laboratorních zkouškách. Některé výsledky projektu však indikují změny materiálu v průběhu experimentu. Bližší vysvětlení dějů je možné pouze na základě dlouhodobějších experimentů a chemických, geochemických, popř. mineralogických analýz.



Obr. 9 – Testované bentonity – Rokle, Mock-Up CZ, Febex

	Shrnutí výzkumu českých bentonitů pro hlubinné úložiště – do roku 2018	Evidenční označení:
		TZ 309/2018

5.1.8 MPO TIP (FR-TI1/362)

Plný název: Výzkum vlastností materiálů pro bezpečné ukládání radioaktivních odpadů a vývoj postupů jejich hodnocení

Reference: Trpkošová et al. (2013)

Doba řešení: 2009–2013

Řešitel: ÚJV Řež. a. s., ČVUT, TUL, VŠCHT

Bentonit: B75, Sabenil 65 (průmyslové produkty)

Popis: V rámci projektu byl bentonit řešen ve dvou oblastech:

- 1) Výzkum tlumících, těsnících, výplňových a konstrukčních materiálů hlubinného úložiště a metodik hodnocení jejich degradace
 - Výzkum a vývoj metodik hodnocení geotechnických a geochemických vlastností tlumících, výplňových a konstrukčních materiálů (popis geotechnických a geochemických metodik a jejich využití na studovaných materiálech, hodnoty parametrů důležitých z hlediska bezpečnosti HÚ, funkční vzorky, výpočet bentonitové pórové vody)
 - Laboratorní výzkum tlumících, výplňových a konstrukčních materiálů (zatěžovací procedury studovaných materiálů, zejména vliv zvýšené teploty, interakce)
 - Výzkum a vývoj metodik hodnocení tlumících, výplňových, těsnících a konstrukčních materiálů inženýrských bariér v reálném přírodním prostředí (interakční experimenty studovaných materiálů in-situ – Štola Josef)
- 2) Výzkum interakce radionuklidů s inženýrskými bariérami hlubinného úložiště
 - Výzkum metodik interakce radionuklidů s inženýrskými bariérami hlubinného úložiště (metodiky laboratorního stanovení K_d pro jílové materiály, metodiky stanovení difúzního koeficientu D_e pro jílové materiály, stanovení titračních křivek bentonitu a jejich vyhodnocování)
 - Výzkum interakčních procesů vybraných radionuklidů s materiály inž. bariér (stanovené difúzních dat pro HTO, Cl, I, Cs, Sr, Se a sorpčních dat pro Cs a Sr)
 - Výzkum pokročilých modelů hodnocení interakce radionuklidů s materiály inženýrských bariér (modelování speciací v pórové vodě B75, modelování difúze)

Cíl: Předmětem řešení projektu byl výzkum nových materiálů pro bezpečné ukládání vyhořelého jaderného paliva a radioaktivních odpadů a postupů a metodik jejich hodnocení jako nezbytného předpokladu kontinuity jaderné energetiky. Výzkum pokrýval vypracování nových metodik výpočtu inventáře radionuklidů a posuzování kritičnosti úložiště v době po jeho uzavření, výzkum vlastností materiálů inženýrských bariér a horninového prostředí a výzkum interakce radionuklidů s materiály bariér.

Závěr a přínos pro HÚ a jeho podpůrný program:

Byly identifikovány hlavní geotechnické a geochemické parametry tlumících, těsnících a výplňových a konstrukčních materiálů a jejich metodiky stanovení. Tyto metodiky byly aplikovány na vybrané materiály a byl získán poměrně rozsáhlý soubor dat. Dále byly studovány interakce těchto materiálů s podzemní vodou v laboratorních (studován rovněž vliv zvýšené teploty) a in-situ (Štola Josef) experimentech.

Sorpční vlastnosti bentonitů byly porovnány pro vybrané prvky (Cs, Sr) s vlastnostmi technologicky neupraveného (přírodního) bentonitu. Výsledky v případě Sr ukázaly na nezanedbatelný vliv technologického procesu a nutnost věnovat pozornost způsobu technologické úpravy a jejímu vlivu na vlastnosti bentonitu. Rozsáhlý soubor dat (K_d , D_p , D_e) byl získán pro různé podmínky a objemové hmotnosti bentonitů sorpčními a zejména difúzními experimenty s využitím vyvinutých metodik a matematických modelů. Výsledky potvrdily rozdílné chování Bentonitu 75 a aktivovaného bentonitu Sabenil 65. V rámci projektu byl též zahájen interakční experiment v podzemní laboratoři.

5.1.10 Zelené jíly

Plný název:	Geotechnický výzkum přírodních zelených jílu miocénního cyprisového souvrství z lokality Skalná - Nová Ves
Reference:	Pacovský et al. (2011)
Doba řešení:	2010-2011
Řešitel:	ČVUT
Bentonit:	Zelený jíl (dodavatel: LB Minerals)

V rámci projektu byl prováděn základní geotechnický výzkum, jehož výstupem bylo, na základě zhodnocení THM parametrů zkoumaného materiálu, stanovení využitelnosti zelených jílu při návrhu těsnicí bariéry (buffer) popř. výplňové bariéry (backfill) hlubinného úložiště.

Hlavním nástrojem pro zhodnocení materiálu byla sada laboratorních geotechnických zkoušek provedených na vstupním (nezatíženém) a zatíženém materiálu (3, 6 a 9 měsíců). Také bylo využito fyzikální modelování.

Cíl: Cílem projektu je ověřit možnost využití kvalitních českých zelených jílu z lokality Skalná-Nová Ves při návrhu inženýrských bariér hlubinného úložiště.

Závěr a přínos pro HÚ a jeho podpůrný program: U výsledků vstupních zkoušek Zelených jílu jsou zřejmé nižší hodnoty než u Rokle – a to mez tekutosti, mez plasticity, bobtnací tlak, swell index, a pevnost v tlaku. Hydraulická vodivost je vyšší, což znamená, že je zelený jíl více propustný. S výjimkou pevnosti v tlaku jde o pokles očekávaný, vzhledem k odlišnému genetickému původu jílu. Z hlediska bobtnacího tlaku a hydraulické vodivosti lze tyto hodnoty kompenzovat lisováním na vyšší objemovou hmotnost. Zelený jíl může relativně snadno splnit požadavky na minimální bobtnací tlak i maximální hydraulickou vodivost vyžadovanou pro buffer i backfill (dle požadavků SKB a POSIVA).

Výsledky na zatíženém materiálu ukazují určité rozdíly dle jednotlivých procedur, popř. doby zatížení. Nicméně v souhrnu neukazují jednoznačně na zhoršení sledovaných parametrů. Při porovnání s výsledky na materiálu Rokle, zatěžovaných stejnými procedurami, lze konstatovat, že rozdíly jsou u Zelených jílu ve stejném, popř. menším rozsahu hodnot (rozptylu) než u Rokle. Lze se domnívat, že určité změny v čase jsou způsobeny interakcí materiálu a sytícího media (při vlastní zatěžovací proceduře, popř. během zkoušek). Podrobný popis a širší rozbor chování je však možné udělat pouze s pomocí analýz z jiných oborů, zejm. geochemie.

Pro chování těsnicí vrstvy HÚ bude důležitá schopnost homogenizace - rozdíl ve výsledné objemové hmotnosti jednotlivých částí jílové vrstvy a rychlost tohoto procesu. Pro objasnění chování byly využity fyzikální modely. Z hlediska rychlosti i kvality homogenizace jsou materiály Zelený jíl a Rokle totožné.

Lze konstatovat, že při zohlednění specifík materiálu (některé parametry nižší než u bentonitů), mohou být z geotechnického hlediska Zelené jíly uvažovány jako kandidátní materiál pro těsnicí vrstvu hlubinného úložiště. Otázkou ovšem nadále zůstává podrobnější analýza chování a dlouhodobá stabilita materiálu při různých typech zatížení a v interakci s okolním prostředím.

	Shrnutí výzkumu českých bentonitů pro hlubinné úložiště – do roku 2018	Evidenční označení:
		TZ 309/2018

5.1.11 Belbar

Plný název:	Bentonite Erosion: effects on the Long term performance of the engineered Barrier and Radionuclide transport
Reference:	Červinka R. et al., 2015
Doba řešení:	2012 - 2016
Řešitel:	Koordinátor: SKB (Švédsko), EU projekt – 9 partnerů Za ČR – ÚJV Řež
Bentonit:	B 75

V rámci projektu byla řešena role koloidů v HÚ, jejich vliv na transport radionuklidů z pohledu dlouhodobé bezpečnosti.

Výzkum byl soustředěn na 3 hlavní oblasti:

1. Eroze bentonitového bufferu (zejm. definice mechanismů eroze a její rozsah)
2. Stabilita bentonitových koloidů (tvorba koloidů a jejich stabilita v lokálních geochemických podmínkách)
3. Interakce koloidů s radionuklidy (do jaké míry ovlivňuje stabilita koloidů mechanismy sorpce a desorpce)

Cíl: Získat informace o chování bentonitových koloidů (B75) a jejich interakci s radionuklidy (^{137}Cs , ^{85}Sr).

Závěr a přínos pro HÚ a jeho podpůrný program:

Dlouhodobé experimenty stability ukazují, že koloidní jílové částice kontinuálně a velmi pomalu koagulují a to i přesto, že se původní podmínky systému (např. složení elektrolytu) zdály zpočátku ideální pro stabilizaci těchto koloidů. Distribuce a velikost jílových koloidů je ovlivněna zejména složením elektrolytu a především koncentrací vápenatých iontů. Koncentrace vápenatých iontů hraje zásadní roli v reologických vlastnostech bentonitů a jílových disperzí (a to jak přítomnost vápníku na výměnných pozicích jílu, tak přítomnost vápníku v roztoku).

Přítomnost vápníku a hořčíku v podzemních vodách může vést ke koagulaci bentonitových koloidů i v případě, že jejich individuální kritické koagulační koncentrace nejsou dosaženy, ale součet koncentrací obou kationtů v roztoku je vyšší než individuální kritická koagulační koncentrace. Toto platí i pro sodík a draslík, experimentálně zjištěné hodnoty jsou však o řád vyšší než u vápníku a hořčíku. Vliv aniontů běžně přítomných v podzemních vodách na stabilitu bentonitových koloidů je neprůkazný. Disagregace již agregovaných bentonitových koloidů je na rozdíl od rychlé agregace (v průběhu koagulace) velmi pomalý proces, který závisí na počátečních podmínkách systému a z experimentálních dat se ukazuje, že nevede k dosažení iniciálního (koloidního) stavu. V dlouhodobém horizontu je však možné koagulaci považovat za plně reverzibilní. Příznivým akcelerátorem procesu disagregace jsou elektrolyty s nízkou iontovou silou. Přítomnost minerálních příměsí v bentonitu může ovlivnit stabilitu bentonitu a jeho erozní chování. Bylo zjištěno, že illit neovlivňuje stabilitu bentonitu a neinhibuje jeho erozi, kdežto přítomnost kaolinitu, případně nanočástic Al_2O_3 , za určitých podmínek ano.

5.2 Probíhající

Probíhající experimenty se zaměřují na detailní studium klíčových parametrů vybraných českých bentonitů (B75, BAM a BCV).

Osm projektů se věnuje materiálovým interakcím (bentonit/hornina, bentonit/UOS a bentonit/beton). Nově v této fázi probíhají experimenty zaměřené na mikrobiální aktivitu a plynopropustnost. Od experimentů v menším měřítku v laboratorním prostředí se výzkum přesunul také do prostředí reálného horninového masivu.

Databáze dat českých bentonitů umožňuje rozvíjet projekty týkající se numerického modelování v oblasti THM(C).

Na základě teoretických podkladů vyplynula nutnost vývoje a testování technologií přípravy bentonitových prefabrikátů. Tato problematika je v současnosti v počáteční fázi řešení.

Od ukončených izolovanějších národních projektů, které byly řešeny v předchozích letech, je SÚRAO nyní zapojeno do několika EU projektů a buduje rozsáhlejší mezinárodní spolupráci. Výčet probíhajících projektů/experimentů, které jsou v nadcházejících kapitolách stručně popsány:

1. ABM
2. Mock-Up Josef
3. DOPAS – EPSP
4. MACOTE
5. VaV UOS
6. Mikrobiální koroze (ZL20)
7. Transport 3 (ZL13)
8. MIND
9. CEBAMA
10. Decovalex 2019
11. Experimenty s UOS (ZL21)
12. Korozní produkty (ZL25)
13. Plynopropustnost (ZL36)
14. Pelety
15. BEACON
16. Interakční experiment
17. BCV do 80 °C
18. Inženýrská bariéra 200 °C

5.2.1 ABM

Plný název:	Alternative buffer materials
Reference:	Anders et al, 2007; SKB, 2016
Doba řešení:	2006 - ?
Řešitel:	SKB (hl. řešitel)
Bentonit:	Rokle + 10 dalších zahraničních bobtnavých jíílů

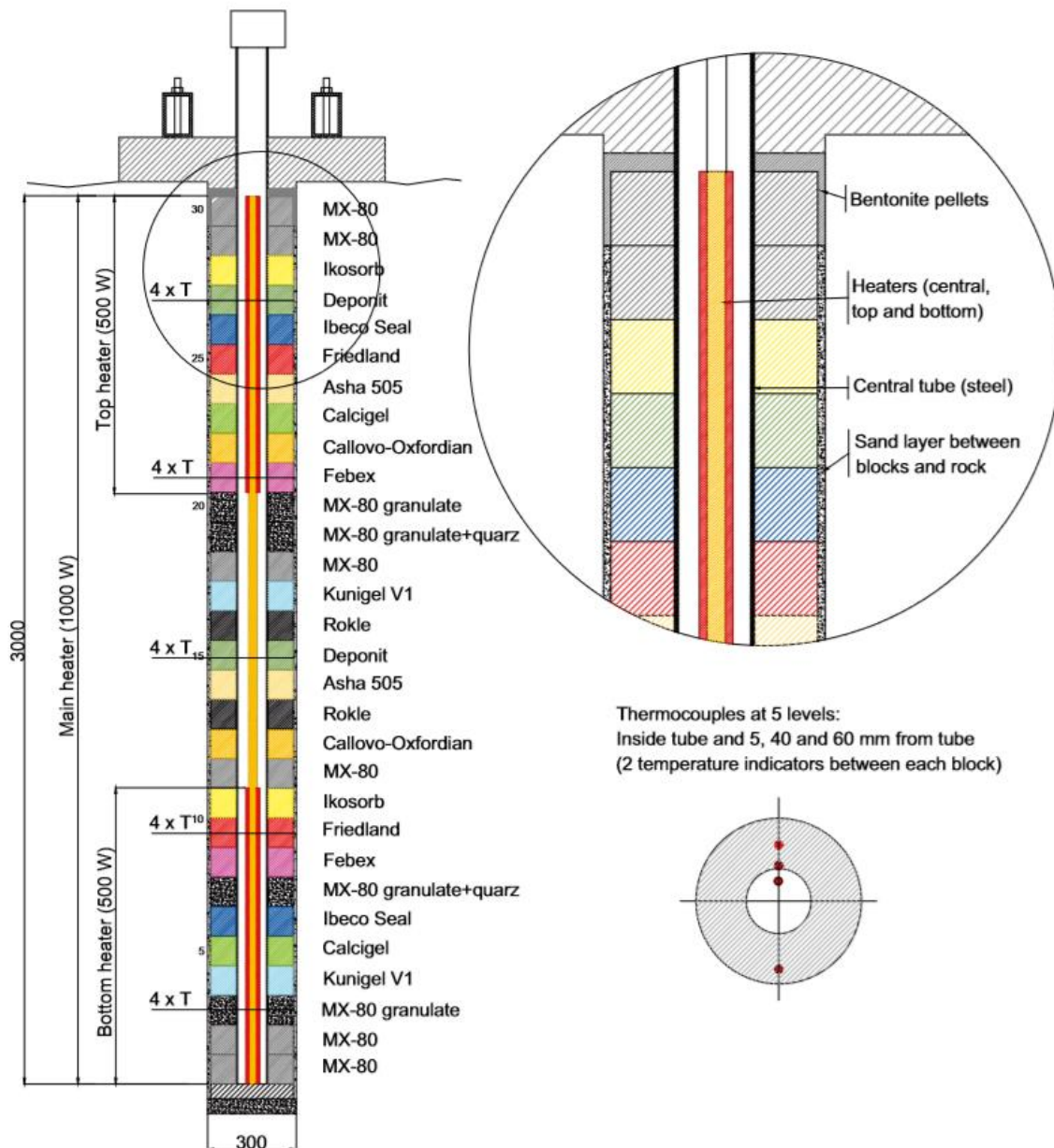
Popis: Cílem tohoto projektu bylo porovnání chování jedenácti materiálů vhodných pro buffer v reálném horninovém prostředí (podzemní laboratoř Aspo). Pro tento účel byly v podzemí instalovány 3 modely bufferu dle KBS-3V v menším měřítku (viz obr. 10). Po instalaci modelů bylo zahájeno jejich zahřívání s cílenou teplotou 130 °C. Každý model byl/bude rozebrán po různém časovém úseku, což umožní sledovat vývoj změn uvnitř materiálů. V každém modelu bylo všech jedenáct bentonitů ve formě bentonitových prefabrikátů, většina ve formě homogenních bloků, některé ve formě pelet. První dva modely byly syceny uměle a jsou již rozebrány, poslední model byl sycen přírodně a je stále umístěn v podzemí.

Cíl: Testování vhodnosti bentonitu MX-80 a dalších alternativních bentonitů pro využití jako buffer (jednou z alternativ je i Rokle bentonit). Vyhodnocení ovlivnění teplotou (do 130°C) v in-situ prostředí svými podmínkami podobnému HÚ.

Závěr a přínos pro HÚ a jeho podpůrný program:

Analýza vzorků z prvního i druhého modelu prokázala vzájemné ovlivnění bentonitů, např. byl zaznamenán přesun mezivrstevních kationtů, což mělo u některých bentonitů vliv i na jejich fyzikální vlastnosti jako je bobtnací tlak. (Svensson et al., 2011; Dohrmann and Kaufhold, 2017)

Celkové zhodnocení celého projektu bude provedeno po rozebrání posledního modelu a analýze vzorků.



Obr. 10 - Schéma prvního modelu ABM I s vyznačenými teploměry a pozicí topidel (Svensson et al., 2011)

5.2.2 Mock-Up Josef

Plný název: Výstavba, provozování a vyhodnocení demonstračního experimentu Mock-Up-Josef

Reference: Šťástka et al. (2016)

Doba řešení: 2011 - 2018

Řešitel: ČVUT (CEG)

Bentonit: B75

Popis: Projekt Mock-Up-Josef je provozován od roku 2012. Jedná se o in-situ experiment zaměřený na výstavbu a provoz in-situ experimentu, který simuluje systém vertikálního ukládání radioaktivních odpadů v hlubinném úložišti. Projekt poskytuje unikátní a velice cenné znalosti o chování českého bentonitu, který je v řešeném experimentu kontinuálně zatěžován od prosince roku 2012 podobně jako v HÚ.

Po celou dobu provozu experimentu je bentonitová vrstva kontinuálně zatěžována teplem a saturací podzemní vodou v Podzemní laboratoři Josef. Důležitou částí experimentu je topný systém, který zatěžuje bentonit požadovanou teplotou bez větších výpadků. Další částí experimentu je instalovaný monitoring. Monitoring poskytuje data, podle kterých se experiment vyhodnocuje. K vyhodnocování experimentu přispívají také znalosti získané z odběrů ze zatíženého bentonitu. Bentonit z odběrů je také vyhodnocován mineralogicky. Mineralogické hodnocení provádí SÚRAO. V experimentu jsou mj. umístěné i korozní vzorky, které odpovídají možným materiálům úložného obalového souboru pro VJP.

Cíl: Účelem projektu je výstavba a dlouhodobý provoz in-situ experimentu Mock-up Josef v reálném prostředí URC Josef, který simuluje systém vertikálního ukládání v HÚ.

Závěr a přínos pro HÚ a jeho podpůrný program: Experiment Mock-up Josef poskytuje unikátní znalosti o chování českého bentonitu v podmínkách blízkých hlubinnému úložišti. Bentonitová vrstva je v experimentu zatěžována teplem do 100°C a saturací podzemní vodou. Ani po šesti letech provozování nedošlo k vážnějším problémům, které by ohrozily provozování a vyhodnocování experimentu.


Podle průběhů naměřených tlaků a teplot je pravděpodobné, že dochází k postupnému ustálení měřených dat. V průběhu provozování jsou mj. odebírány vzorky, které poskytují unikátní a cenné znalosti o chování zatížené bentonitové vrstvy.

Podle průběžných výsledků z odběrů je zřejmé, že stále nedošlo k úplnému ustálení dějů v experimentu. Provoz experimentu se předpokládá minimálně do konce roku 2018.

Po několikaleté fázi úspěšného provozu bude navazovat projekt Mock-up-Josef dismantling v jehož rámci dojde k laboratorním rozběrům bentonitové náplně, výzkumu materiálových kontaktů (hornina-bentonit, bentonit-povrch topidla), apod. Analýze bude podroben i celý měřicí systém. U všech senzorů bude provedena recalibrace.



Obr. 11 – VLEVO: Výstavba superkontejneru s nosnými závitovými tyčemi a vystavěnou první vrstvou prefabrikátů, VPRAVO: Spouštění fyzikálního modelu do úložné studny v podzemní laboratoři Josef

 SÚRAO	Shrnutí výzkumu českých bentonitů pro hlubinné úložiště – do roku 2018	Evidenční označení:
		TZ 309/2018

5.2.3 DOPAS – EPSP

Plný název: Full Scale Demonstration of Plugs and Seals
Reference: Dvořáková et al. (2014), Svoboda et al. (2016)
Doba řešení: 2012 – 2016 (prodloužení projektu min do roku 2018 za podpory SÚRAO)
Řešitel: Koordinátor: Posiva (Finsko), EU projekt - Posiva, ANDRA, DBE-TEC, GRS, Nagra, NDA, SÚRAO, SKB, ČVUT, NRG, GSL, BTECH, VTT, ÚJV Řež, a. s.
Bentonit: B75

Popis CZ výzkumu: Mezinárodní projekt DOPAS (Demonstration of Plugs and Seals) byl jedním z nejvýznamnějších mezinárodních projektů podporovaným Technologickou platformou IGD-TP. Je zaměřen na konstrukční řešení zátek pro potřeby hlubinného úložiště radioaktivních odpadů. Experiment EPSP - Experimental Pressure and Sealing Plug realizovalo české sdružení parterů (SÚRAO, ČVUT v Praze a ÚJV Řež, a.s.) v podzemní laboratoři Josef v reálném horninovém prostředí granitoidů. EPSP byl navržen jako prototyp zátky pro budoucí HÚ. Předpokládá se, že taková zátky bude potřeba v průběhu provozování HÚ, a je tedy nutné ji navrhnou s životností 150 let při předpokládaném maximálním zatížení 7MPa.

EPSP byl navržen jako vícebariérový systém, který se skládá ze dvou hlavních strukturálních prvků zajišťujících jeho mechanickou stabilitu (dvou betonových zátek) a těsnicího prvku (bentonitové těsnění) mezi nimi. Zátky jsou postaveny ze stříkaného betonu se sníženým pH a skelnými vlákny. Těsnicí prvek byl zhotoven z bentonitových pelet, které byly vibračně hutněny nebo aplikovány pomocí metody stříkaného bentonitu (viz 5.1.5).

Výběr technologií a materiálů byl proveden na základě zkušeností z předchozích podobných staveb. Tam, kde to bylo možné, byly použity běžně dostupné technologie a materiály s přihlédnutím na specifické požadavky EPSP. Geometrie experimentu byla optimalizována tak, aby experiment co nejméně zasáhl do horninového prostředí při zachování požadované funkčnosti (minimalizace výrubu) a s ohledem na zvolenou technologii – stříkaný beton.

Cíl CZ výzkumu: Cílem experimentu byl nejen proces výstavby, monitoring a ověření funkčnosti zátky, ale také detailní charakteristika všech použitých materiálů. Po celou dobu realizace zde byl kladen vysoký důraz na kvalitu a primární využití českých materiálů a technologií dostupných v České republice.

Závěr a přínos pro HÚ a jeho podpůrný program (CZ výzkum): Experiment EPSP byl úspěšně postaven a je testován v Podzemní laboratoři Josef. Tím byl splněn první cíl projektu DOPAS - byla demonstrována použitelnost materiálů a technologií pro výstavbu zátky HÚ.

Experimentální běh EPSP začal a přináší důležité poznatky o chování sendvičové konstrukce beton-bentonit. Funkčnost EPSP je testována pomocí tlakování vzduchem, vodou a bentonitovou suspenzí. Chování experimentu a jeho okolí je přitom sledováno pomocí rozsáhlé instrumentace. Vynucená změna v experimentálním procesu tlakování EPSP se ukázala jako přínos, neboť umožnila studovat důležité procesy, které by při dodržení původního plánu nenastaly.

Přestože EPSP není konkrétní zátkou HÚ, získané poznatky poslouží pro návrh zátek v budoucím HÚ v ČR.

	Shrnutí výzkumu českých bentonitů pro hlubinné úložiště – do roku 2018	Evidenční označení:
		TZ 309/2018

5.2.4 MACOTE

Plný název: Material Corrosion Test

Reference: Dobrev et al. (2017b)

Doba řešení: 2013 – 2022

Řešitel: Nagra, RWMC, NWMO, SÚRAO, NUMO, (později GRS), za ČR – SÚRAO, ÚJV Řež

Bentonit: BAM

Popis: Experiment MaCoTe je zaměřen na dlouhodobé hodnocení rychlosti a mechanismu koroze materiálů obalových souborů.

V rámci tohoto projektu probíhají dva typy experimentů:

První typ experimentů simuluje podmínky v počátcích anaerobní fáze hlubinného úložiště, to znamená v prostředí bez přítomnosti kyslíku a při zvýšené teplotě, protože vyhořelé jaderné palivo zpočátku emituje zbytkové teplo.

Vzorky vybraných materiálů (ocel s povrchovou úpravou mědí, uhlíková ocel) jsou umístěny v jednotlivých modulech a obklopeny buď sodným bentonitem (MX-80), nebo vápenato-hořečnatým bentonitem české provenience (BAM). Tyto moduly jsou umístěny ve vrtech cca 5 m hlubokých. Jednotlivé moduly budou vyjímány po určitém časovém intervalu – po 1, 2, 5 a 7 letech, aby bylo možné sledovat časovou závislost koroze vybraných materiálů, což nám umožní získat představu o jejich chování v daných podmínkách a zároveň predikovat jeho budoucí vývoj.

Druhý typ experimentů simuluje podmínky časově vzdálenějšího období vývoje hlubinného úložiště, tedy opět v anaerobním prostředí, ale za teploty odpovídající okolnímu prostředí. Vyjímatelné moduly se sledovaným materiálem (měď, ocel s povrchovou úpravou mědí, uhlíková a nerezová ocel, obklopené sodným bentonitem (MX-80) jsou umístěny velkokapacitním vrtu a postupně vyjímány po jednom roce, poslední modul pak po 10 letech.

Cíl:

Získání znalosti o korozní odolnosti kandidátních materiálů pro ukládací obalový soubor (UOS) v horninovém prostředí hlubinného úložiště a predikci jejího časového vývoje, vlivu koroze tohoto materiálu na vlastnosti bentonitu, a vyhodnocení vlivu působení mikroorganismů na inženýrské bariéry (bentonit a kovové materiály).

Závěr a přínos pro HÚ a jeho podpůrný program:

Projekt probíhá, v současné době jsou vyjmuty korozní vzorky po 2leté expozici a průběžně vyhodnocovány. Na konci letošního roku budou vyjmuty vzorky po 3leté expozici. Analýzy jsou především zaměřeny na:

- stanovení korozní rychlosti kandidátních materiálů, a identifikaci korozních produktů,
- ovlivnění vlastností bentonitu vznikajícími korozními produkty,
- sledování vývoje mikrobiální aktivity ve vodě a v bentonitu s ohledem na ovlivnění koroze materiálů,
- vývoj chemizmu podzemní vody a
- stanovení míry ovlivnění mikrobiální aktivity teplotou.

Vzhledem k tomu, že analyzovány byly vzorky pouze po 1 a 2leté expozici, je k dispozici pouze omezené množství výsledků. Nicméně už teď je možné říci, že trend odpovídá výsledkům experimentů, provedených v laboratorních podmínkách. Důležité ovšem v tomto případě bude sledovat sledování ovlivnění koroze mikrobiální aktivitou, způsobenou in-situ podmínkami.

 SÚRAO	Shrnutí výzkumu českých bentonitů pro hlubinné úložiště – do roku 2018	Evidenční označení:
		TZ 309/2018

5.2.5 VaV UOS

Plný název:	Výzkum a vývoj ukládacího obalového souboru pro hlubinné ukládání vyhořelého jaderného paliva do stádia realizace vzorku
Reference:	Dobrev et al. (2017a)
Doba řešení:	2013 - 2021
Řešitel:	Škoda JS (ÚJV Řež, Energovýzkum, VŠCHT)
Bentonit:	BAM


Popis: Předmětem tohoto projektu jsou výzkumně-vývojové práce vedoucí k návrhu obalových souborů typu D, určených k ukládání vyhořelého jaderného paliva ze stávajících jaderných elektráren EDU a ETE a z nových jaderných bloků, návrh materiálového provedení, konstrukce a výroba vzorku UOS. V rámci tohoto projektu byly dále řešeny i experimenty s přímým kontaktem mezi materiálovým vzorkem a zhutněným bentonitem za aerobních i anaerobních podmínek při zvýšené teplotě, a experimenty v poli ionizujícího záření za anaerobních podmínek. Kovové materiály navržené pro vnější obal ukládacího obalového souboru budou v hlubinném úložišti radioaktivních odpadů vystaveny prostředí suchého, polonasyčeného a nasyceného kompaktovaného bentonitu. Toto prostředí bude rovněž ovlivněno polem ionizujícího záření. Po ustálení geochemických podmínek v systému by již mělo být prostředí okolo UOS plně nasycené vodou a anaerobní, teplota by však měla být stále zvýšená v důsledku zbytkového tepelného výkonu VJP. Navržené experimenty se zhutněným bentonitem simulují právě tyto podmínky.

Cíl: Návrh vhodných materiálů pro výrobu UOS, jejich experimentální ověření, návrh konstrukčního řešení UOS a výroba vzorku UOS.

Závěr a přínos pro HÚ a jeho podpůrný program: Primárně práce není zaměřena na výzkum chování bentonitu, jedná se o jeden z podpůrných výstupů z projektu.

Zkoumané materiálové rozhraní: uhlíková oceli 422707.9 / BAM, měď Cu-OF/BAM

Korozní zkoušky provedené s ocelí v kontaktu s kompaktovaným bentonitem neprokázaly významné negativní ovlivnění bentonitu korozním procesem a korozními produkty vytvořenými v průběhu této zkoušky. RTG fázová analýza neprokázala vznik nových krystalických fází s výjimkou novotvořeného aragonitu, který se v bentonitu BAM nevyskytuje. Analýzy provedené Ramanovou spektroskopií na ocelových vzorcích se zachycenými korozními produkty a bentonitem neprokázaly přítomnost korozních produktů v množství nad mezí detekce této metody. Saturace kompaktovaného bentonitu v čase se u analyzovaných vzorků bentonitu významně neměnila – a to jak v parametru celkové vlhkosti vzorků, tak ve vertikálním profilu vlhkosti jednotlivých kompaktovaných vzorků. Lze konstatovat, že kompaktovaný bentonit přítomný v korozních celách byl saturován v celém svém objemu. Pro ověření vlivu byly doplněny experimenty v poli IZ v prostředí zhutněného bentonitu. Výsledky zatím nejsou dostupné.

 SÚRAO	Shrnutí výzkumu českých bentonitů pro hlubinné úložiště – do roku 2018	Evidenční označení:
		TZ 309/2018

5.2.6 Mikrobiální koroze (ZL20)

Plný název: Chování ÚOS pro VJP a RAO / Mikrobiální koroze (ZL 20 v rámci projektu: v rámci projektu: Výzkumná podpora pro projektové bezpečnostní hodnocení hlubinného úložiště)

Reference: Černík et al. (2017)

Doba řešení: 2015 – 2018

Řešitel: ÚJV Řež, TUL, CHEMCOMEX a CV Řež

Bentonit: BAM


Popis: Tento projekt se primárně zabývá sledováním chování UOS v podmínkách HÚ a snaží se nalézt způsob, jak zabránit či redukovat mikrobiální korozi.

Experimentální práce zahrnují přípravu bentonitových vzorků o různé hustotě v definovaném rozmezí (tomu odpovídá různý bobtnací tlak nasyceného bentonitu), jejich případné osídlení mikrobiálními společenstvy a sledování jejich proliferace. V úvahu přichází jak mikrobiální oživení vlastního bentonitu konkrétním společenstvem před jeho zhutněním, tak jeho oživení živým společenstvem až v průběhu saturace bentonitu a jeho bobtnání.

Cíl: Cílem tohoto projektu je posoudit:

- vliv bobtnacího tlaku na životaschopnost mikroorganismů při zhoršení jejich životních podmínek (vlivem tlaku)
- schopnosti mikrobiálních společenstev oživit prostředí s omezenými životními podmínkami

Závěr a přínos pro HÚ a jeho podpůrný program: Zatím nelze shrnout.

 SÚRAO	Shrnutí výzkumu českých bentonitů pro hlubinné úložiště – do roku 2018	Evidenční označení:
		TZ 309/2018

5.2.7 Transport 3 (ZL13)

Plný název: Transport radionuklidů z úložiště/Vstupní parametry a procesní modely pro hodnocení transportu radionuklidů přes inženýrské bariéry (ZL 13 v rámci projektu: Výzkumná podpora pro projektové bezpečnostní hodnocení hlubinného úložiště)

Reference: Zadávací list

Doba řešení: 2015 – 2018

Řešitel: ÚJV Řež, CV řež

Bentonit: B75

Popis: V rámci tohoto zadávacího listu jsou realizovány difúzní experimenty s vybranými kritickými radionuklidy (zejm. Cl, I) přes kompaktní bentonit české provenience. Dále probíhají difúzní experimenty na homoionních jílech (Ca-bentonit, Na-bentonit) při jedné definované objemové hmotnosti a studium sorpce vybraných radionuklidů (Cs, Sr) na české bentonity.

Jsou studovány migrační procesy pro vybrané kritické radionuklidy přes simulovaná rozhraní: bentonit/korozní produkty a bentonit/granit.

Cíl: Shrnutí a analýza transportních procesů (difúze, sorpce, precipitace atd.), modelů a výpočetních kódů potřebných pro hodnocení transportu radionuklidů přes inženýrské bariéry Experimentální ověření a srovnání transportních charakteristik inženýrských bariér, zejména bentonitu při daném stupni zhutnění, pro mobilní radionuklidy vyplývající z aktualizace referenčního projektu v hypotetické lokalitě.

Výzkum a vývoj procesních modelů a výpočetních kódů pro predikci transportu kritických radionuklidů v systému inženýrských bariér včetně transportu radionuklidů přes rozhraní ÚOS-bentonit a bentonit-granit podpořených jednoduchými experimenty.

Shrnutí a aktualizace transportních parametrů pro inženýrské bariéry ve formě databáze parametrů včetně odhadu jejich nejistot na základě experimentálních prací a analýzy dosavadních poznatků dosažených při přípravě HÚ v ČR.

Závěr a přínos pro HÚ a jeho podpůrný program: Zatím nelze shrnout, jelikož projekt stále probíhá.

 SÚRAO	Shrnutí výzkumu českých bentonitů pro hlubinné úložiště – do roku 2018	Evidenční označení:
		TZ 309/2018

5.2.8 MIND

Plný název: Microbial diversity in aged bentonites (EU projekt, H2020)

Reference: Ševců et al. (2018)

Doba řešení: 2015 – 2019

Řešitel: Koordinátor: SKB (Švédsko)

15 výzkumných organizací z EU zemí, za ČR – TUL, CV Řež

Bentonit: BAM

Popis CZ výzkumu: Bentonit BAM byl v projektu MIND řešen ve dvou studiích:

- 1) Kompaktovaný bentonit BaM o hustotě 1400 a 1600 kg/m³ byl saturován podzemní vodu z podzemní laboratoře Josef, která obsahuje společenstva anaerobních mikroorganismů. Sycení probíhalo v anaerobním prostředí do tlaku max. 2 MPa. Po ukončení saturace byl bentonit rozdělen na vrstvy a sledována přítomnost mikroorganismů v jednotlivých vrstvách.
- 2) Suspenze připravená z bentonitu BAM a podzemní vody (CEG Josef), která obsahuje společenstva anaerobních mikroorganismů, byla ozařována malým dávkovým příkonem. U stejně inokulované suspenze byl sledován vliv tlaku v několik tlakových hladinách (2, 4 a 5 MPa). Dvě DNA extrakce byly porovnány (založené na protokolech získaných od parterů projektu HZDR a SCK•CEN), dále byl testován další způsob ultrazvukové dezintegrace materiálu.

Cíl CZ výzkumu: Cíle jsou stanoveny pro každou studii zvlášť:

- 1) Aplikace nově vyvinuté metody pro studium mikrobiální mobility v nasyceném zhutněném bentonitu. Pro tento cíl je nejprve třeba vyvinout celou pro nasycení bentonitu o různých hustotách uvažovaných v HÚ a vyvinout spolehlivou metodu pro přímou detekci přítomnosti bakterií (živých a mrtvých buněk) v zhutněném a nasyceném bentonitu.
- 2) Hodnocení vlivu tlaku a ionizujícího záření na společenstva mikroorganismů v bentonitu.

Závěr a přínos pro HÚ a jeho podpůrný program: Zatím nelze shrnout, jelikož projekt stále probíhá.

Průběžné výstupy v obou studiích:

- 1) Byla vyvinuta experimentální cela a sestavena aparatura pro sycení bentonitu. Byla vyvinuta metoda, která je založena na extrakci bakterií z bentonitu za použití centrifugace s hustotním gradientem a jejich následné barvení Live / Dead. Metoda bude užitečná pro budoucí výzkum bakteriální přítomnosti v různých vzorcích bentonitu. Tímto způsobem byla charakterizována mobilita mikroorganismů. Bylo zjištěno, že bakterie se mohou pohybovat přes zhutněný bentonit s relativně vysokou objemovou hmotností sušiny (1600 kg/m³).
- 2) Očekává se určení vlivu hladin tlaku a ionizujícího záření na přítomné mikroorganismy, především na zpomalení jejich metabolismu a trvalé poškození (usmrcení).

5.2.9 CEBAMA

Plný název: Cement based materials

Doba řešení: 2015 - 2019

Řešitel: Koordinátor: KIT (Německo), EU projekt - 27 výzkumných organizací z 9 EU zemí + Švýcarsko a Japonsko, za ČR – ČVUT, ÚJV Řež

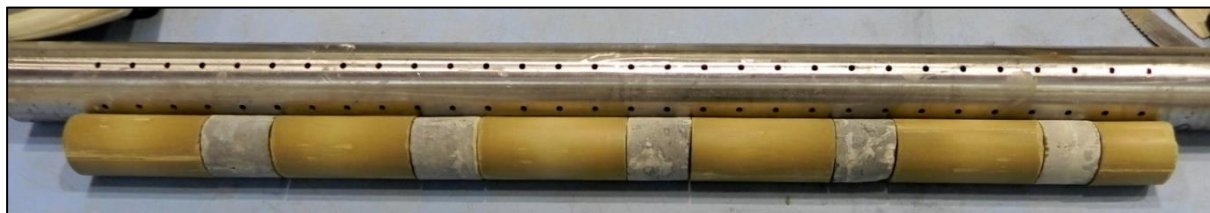
Bentonit: B75

Popis CZ výzkumu: Český výzkum je zaměřen na studium vlastností betonových vzorků, které jsou zatíženy různými vlivy – teplotou (10 a 95°C), podzemní vodou a bentonitovou suspenzí. Pro porovnání jsou testovány betony s klasickým pH (OPC) a se sníženým pH (LPC). Doplnkovým výzkumem je také studium vlastností bentonitu, který byl v interakci s betonovými vzorky. Vzorky jsou analyzovány po 9, 18 a 27 měsících, aby byl vidět časový vývoj vlastností a jejich trend.

U betonu jsou sledovány jak mechanické vlastnosti (např. pevnost v tlaku a elasticita), tak geochemické parametry (např. chemické složení a pH výluhu, difuzní koeficient a mineralogické změny).

Cíl CZ výzkumu: Analýza vlastností betonu v podmínkách blízkých HÚ. Porovnání chování betonu s běžným pH a se sníženým pH. Součástí je také sledování bentonitu v interakci s betonovými vzorky v podmínkách HÚ.

Závěr a přínos pro HÚ a jeho podpůrný program (CZ výzkum): Zatím nelze shrnout. Průběžné výsledky ukazují změny u obou betonů, tyto změny jsou však různého charakteru. K finálnímu shrnutí této problematiky dojde až na konci projektu. Výsledky na bentonitu nebyly zatím prezentovány.



Obr. 12 – Připravené válečky vylisovaného bentonitu (hnědé) a betonu (šedé), které se vloží do perforované trubky a umístí do vrtu v podzemí, kde na ně bude působit podzemní voda a konstantní teplota okolo 10°C (Vašíček et al. 2011)

	Shrnutí výzkumu českých bentonitů pro hlubinné úložiště – do roku 2018	Evidenční označení:
		TZ 309/2018

5.2.10 Decovalex 2019

Plný název: Vývoj a ověřování metodik modelování THMC procesů v rámci mezinárodního projektu DECOVALEX 2019

Reference: Maryška et al (2016)

Doba řešení: 2016 – 2019

Řešitel: ANDRA, BGR, CNSC, DOE, ENSI, IRSN, JAEA, KAERI, NWMO, RWM, SSM, SÚRAO, Taipower, UFZ, za ČR –SÚRAO, TUL a ÚGN

Bentonit: FEBEX, MX-80

Popis CZ výzkumu: DECOVALEX (Development of Coupled Models and their Validation against Experiments“) je projekt mezinárodní spolupráce v oblasti rozvoje metodik matematického modelování sdružených termo-hydro-mechanických (THM) procesů v geologickém prostředí. Zapojení SÚRAO a českých organizací do tohoto projektu usnadní vývoj a validaci kódů modelování fyzikálních a chemických procesů v horninovém prostředí a inženýrských bariérách v ČR. SÚRAO je prostřednictvím řešitelů tohoto projektu zapojeno do úkolu potřebného pro získání hlubšího porozumění problematice THMC modelování bentonitu: Task D (INBEB) – Hydro-mechanical interactions in bentonite engineered barriers).

Cíl CZ výzkumu: Cíl Task D „INBEB“ je porozumění a modelování THMC procesů v bentonitové inženýrské bariéře za pomoci dat z experimentů FEBEX a EB.

Závěr a přínos pro HÚ a jeho podpůrný program (CZ výzkum): Řešení Tasku D – INBEB přinese zkušenosti v oblasti matematického modelování bentonitové bariéry ve formě bloků doplněných o zásyp peletami. Takto získané zkušenosti bude možné využít při výzkumu a hodnocení chování „českého“ bentonitu a modelování THMC procesů.

5.2.11 Experimenty s UOS (ZL21)

Plný název: Experimenty s materiály UOS pro bezpečnostní rozbor (ZL 21 v rámci projektu: v rámci projektu: Výzkumná podpora pro projektové bezpečnostní hodnocení hlubinného úložiště)

Reference: Dobrev et al. (2016)

Doba řešení: 2016 – 2018

Řešitel: ÚJV Řež, a. s, CV Řež

Bentonit: BAM

Popis: V rámci tohoto projektu se primárně řeší koroze UOS v podmínkách HÚ, okrajově je také řešen bentonit na kontaktu s UOS. Korozní zkoušky budou probíhat v prostředí kompaktního bentonitu (suchá objemová hmotnost 1,6 g/cm³), který bude sycen syntetickou granitickou vodou pod tlakem 5 MPa, za anaerobních podmínek a při zvýšené teplotě 70 °C. Vzorky budou v těchto podmínkách různě dlouho dobu (1měsíc, 2 měsíce, 4 měsíce, 1 rok, 2 roky a do konce projektu) a poté budou analyzovány. Na bentonitu, který bude v kontaktu s ocelovým vzorkem, bude stanovena CEC a porovnána se vstupní hodnotou.

Cíl: Vyhodnocení změny CEC bentonitu BAM po jeho interakci s ocelí uvažovanou pro UOS v různých časových intervalech. Interakce probíhá za anaerobních podmínek, teplotě 70 °C a pod tlakem sytícího média (syntetická granitická voda) 5MPa.

Závěr a přínos pro HÚ a jeho podpůrný program (CZ výzkum): Zatím nelze stanovit.

5.2.12 Korozní produkty (ZL25)

Plný název: Chování UOS pro VJP a RAO / Korozní produkty (ZL 25 v rámci projektu: Výzkumná podpora pro projektové bezpečnostní hodnocení hlubinného úložiště)

Reference: Gondolli et al. (2018)

Doba řešení: 2016 – 2018

Řešitel: ÚJV Řež, CV řež

Bentonit: BAM

Popis: V rámci tohoto zadávacího listu jsou realizovány laboratorní experimenty zaměřené na korozi železa v saturovaném bentonitu za anaerobních podmínek v rukavicovém boxu (viz obr. 13). Pro urychlení koroze je použito práškové železo. Zhutněný bentonit je v průběhu experimentu tlakově sycen podzemní vodou. Analýzy vzorků jsou prováděny v různých časových intervalech (0,25; 0,5; 1 a 1,5 roku).

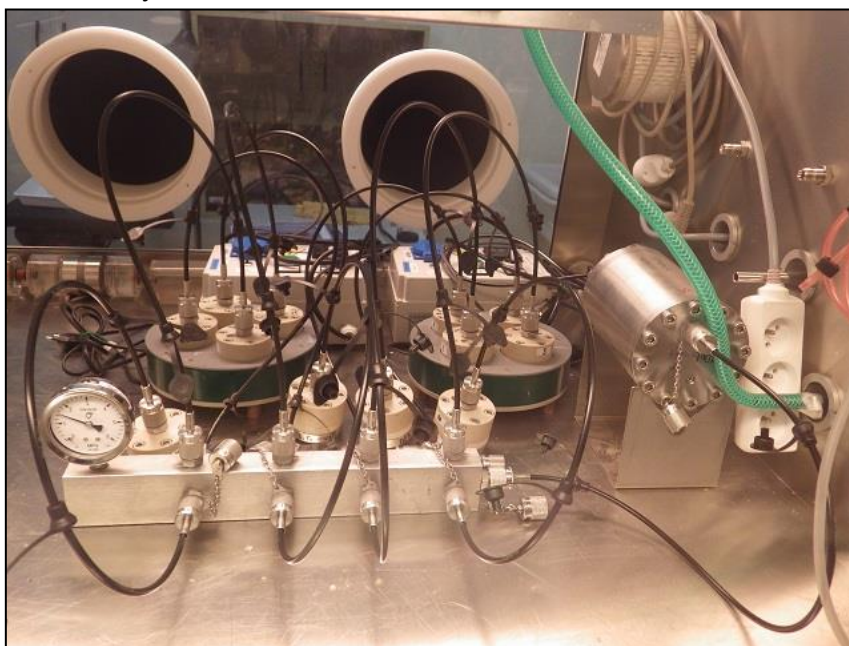
Současně budou probíhat práce na vytvoření geochemického modelu rozhraní materiálu ukládacího obalového souboru a bentonitu se zaměřením na korozi uhlíkové oceli v prostředí reálného bentonitu použitého v experimentálních pracích. Modelování bude zaměřeno na realizované experimenty tak, aby bylo možné výsledky ověřit.

Cíl: Studium koroze železa v interakci se zhutněným bentonitem v anaerobním prostředí za různých teplot, čímž se navodí podmínky blízké budoucímu HÚ. Konkrétně se budou analyzovat korozní produkty a míra alterace bentonitu v kontaktu (zejména ovlivnění CEC a dosah migrace iontu Fe^{2+} , pokud to bude technicky proveditelné).

Závěr a přínos pro HÚ a jeho podpurný program: Zatím nelze shrnout, jelikož projekt stále probíhá.

Předpokládané výstupy:

- stanovená míra ovlivnění zhutněného bentonitu korozními produkty
- stanovený dosah migrace iontu Fe^{2+}
- geochemický model rozhraní: materiál ukládacího obalového souboru a bentonitu



Obr. 13 - Sestavná experimentální aparatura v rukavicovém boxu v průběhu sycení korozních cel (Gondolli et al., 2018)

 SÚRAO	Shrnutí výzkumu českých bentonitů pro hlubinné úložiště – do roku 2018	Evidenční označení:
		TZ 309/2018

5.2.13 Plynopropustnost (ZL 36)

Plný název: Experimentální hodnocení plynopropustnosti inženýrských bariér hlubinného úložiště (ZL36 v rámci projektu: Výzkumná podpora pro bezpečnostní hodnocení hlubinného úložiště)

Reference: Zatím žádné

Doba řešení: 2017 - 2019

Řešitel: ČVUT, ÚJV Řež

Bentonit: BAM

Popis: V rámci tohoto projektu se ČVUT a ÚJV zabývá laboratorním výzkumem plynopropustnosti kompaktovaného bentonitu. Obecně je problematika migrace plynů skrz jílové materiály řešena v souvislosti s možným ovlivněním bezpečnostní funkce bufferu v HÚ, kdy se předpokládá, že bentonitový buffer může být zatížen tlakem plynů (převážně vodíkem) vznikajících korozi materiálů UOS.

ČVUT se v projektu zaměřuje na výzkum plynopropustnosti kompaktovaného bentonitu při různých stupních nasycení, a dále na výzkum migračních procesů plynů v plně nasyceném bentonitu. Na sériích vzorků s různými suchými objemovými hmotnostmi jsou ve speciálních testovacích komorách prováděny tlakové zkoušky se vzduchem. Část vzorků je střídavě sycena vodou v propustoměrech a zatěžována tlakem plynu, což poskytuje data pro studium samohojící schopnosti bentonitu.

Práce ÚJV zahrnují provádění a vyhodnocení plynových tlakových zkoušek s použitím vodíku na vzorcích vodou nasyceného bentonitu. Při tlakových zkouškách je sledováno, dochází-li k transportu vodíku skrz vodou nasycený vzorek bentonitu při injektážních tlacích menších než je totální napětí uvnitř vzorku a dále jsou zjišťovány hodnoty tlaku, při kterém dojde k události označované jako „průraz“ (z anglického termínu „breakthrough“).

Cíl: Cílem testů ČVUT je určení plynopropustnosti vzorků se stupněm nasycení menším než 1,0 na základě provedených plynových tlakových zkoušek se vzduchem. Druhá série vzorků je vždy v první fázi plně nasycena vodou v propustoměru, při čemž je určena hydraulická vodivost a bobtnací tlak vzorku. Dále je vzorek zatížen konstantním tlakem plynu a je měřena doba do dosažení průrazu. Výsledkem je určení závislosti mezi suchou objemovou hmotností a doby do dosažení průrazu. Tyto zatěžovací cykly jsou opakovány, přičemž jsou sledovány změny v měřených parametrech, a je tak možné sledovat vývoj stavu vzorku ve vztahu k jeho samohojící schopnosti.

Cílem prací ÚJV bylo připravit testovací aparaturu pro tlakové zkoušky s vodíkem, a navázat tak na zkušenosti s těmito testy z projektu FORGE (2009-2013). ÚJV provádí tlakové zkoušky s vodíkem na vzorcích plně vodou nasyceného bentonitu s injektážními tlaky menšími než je teoretický bobtnací tlak ve vzorku. Cílem je určit, dochází-li k transportu plynu jinými procesy než je proudění skrz mechanicky vytvořené dilatantní cesty, a dále určení hodnoty průrazového tlaku.

Závěr a přínos pro HÚ a jeho podpůrný program:

Přínosem výzkumu je ověření dosavadních teoretických znalostí o procesech migrace plynů v bentonitu. Znalost o transportních mechanismech je klíčová pro bezpečnostní hodnocení funkce bentonitové bariéry.

Jedním z výstupů tohoto projektu by mělo být navržení navazujícího programu testování obou členů konsorcia pro projekt EURAD (WP GAS).

5.2.14 Pelety

Plný název: Návrh a výroba směsi bentonitových pelet (ZL 10 v rámci projektu: Výzkumná podpora pro projektové řešení hlubinného úložiště)

Reference: Pacovský et al. (2017), Pacovský et al. (2018)

Doba řešení: 2017 - 2018

Řešitel: ČVUT

Bentonit: BCV


Popis: Projekt je zaměřen na návrh a výrobu směsi bentonitových pelet, jejíž sypaná hmotnost sušiny bude minimálně $1,55 \text{ Mg/m}^3$. Pokud nebude dosaženo této objemové hmotnosti volným sypáním, tak dodavatel odzkouší možnosti zhutnění. Důležitým požadavkem je průmyslová výroba (při použití existujících zařízení) jak pelet, tak směsi. Výstupem bude nejen samotná směs, ale také přesný popis výroby. Receptura výroby bude předána objednateli společně s právem výhradního využití.

Cíl: Cílem výzkumu je navržení a výroba bentonitových pelet z průmyslově dodávaného materiálu – neaktivovaného Ca-Mg bentonitu z ložiska Černý vrch (BCV 2017) jejíž sypaná hmotnost sušiny bude minimálně $1,55 \text{ Mg/m}^3$.

Závěr a přínos pro HÚ a jeho podpurný program: Zatím nelze shrnout, jelikož projekt stále probíhá.



Obr. 14 – Vyvíjené pelety

 SÚRAO	Shrnutí výzkumu českých bentonitů pro hlubinné úložiště – do roku 2018	Evidenční označení:
		TZ 309/2018

5.2.15 BEACON

Plný název: Bentonite Mechanical Evolution

Reference: Beacon Proposal – Annex 1

Doba řešení: 2017 - 2021

Řešitel: Koordinátor: SKB (Švédsko), EU projekt - 25 organizací z 10 zemí, Za ČR – SÚRAO, ČVUT, UK

Bentonit: B75 a BCV (pro český výzkum)

Popis CZ výzkumu: V rámci projektu bude řešeno:

- 1) Materiálové vlastnosti bentonitu B75 a BCV
- 2) H-M vývoj bentonitové vrstvy
- 3) Finální míra homogenity/heterogenity prefabrikovaného bufferu
- 4) Validace a verifikace stávajících numerických modelů

Cíl CZ výzkumu: Vývoj požadavků na homogenitu bentonitové bariéry z pohledu dlouhodobé bezpečnosti.

Závěr a přínos pro HÚ a jeho podpůrný program: Zatím nelze shrnout.

5.2.16 Interakční experiment

Plný název: Interakční fyzikální in-situ modely v PVP Bukov

Reference: Svoboda et al. (2018)

Doba řešení: 2017 - 2022

Řešitel: ČVUT, ÚJV Řež, ČGS

Bentonit: BCV

Popis: Projekt zahrnuje realizaci 10 zkušebních vrtů s fyzikálními modely typu Mock-up. Tyto modely budou simulovat prostředí a děje, ke kterým bude docházet v HÚ. Bude se sledovat chování a interakce: bentonitu, betonu a horninového prostředí při různých teplotách (přirozená teplota masivu, 100°C a 200°C). Bentonitová bariéra bude tvořena granulovaným bentonitem (peletami), lisovanými tvárnici a jejich kombinací. V experimentu budou použity dva typy betonů pro jejich porovnání: beton se sníženým pH (LPC) a s pH běžným ve stavební praxi (OPC). Stručný popis fyzikálních modelů je uveden v tab. 3.

Zahřívání experimentu bude zajištěno kovovým topidlem válcového tvaru zhotoveného z materiálu odpovídajícímu koncepci ukládacího obalového souboru pro budoucí HÚ v ČR, umístěným uprostřed experimentu.

Unikátní kombinací materiálů získáme jedinečnou možnost porovnání jednotlivých interakcí a reakcí v materiálech, které mohou nastat v budoucím HÚ.

Tab. 3 – Popis fyzikálních modelů plánovaných v rámci Interakčního experimentu


Model č.	průměr	teplota	náplň	objemová hmotnost výplně*	typ betonu
1	250 mm	100°C	pelety	1600 kg/m ³	LPC
2	250 mm	100°C	tvárnice	1600 kg/m ³	LPC
3	250 mm	100°C	pelety + tvárnice	1600 kg/m ³	LPC
4	250 mm	100°C	pelety + tvárnice	1600 kg/m ³	OPC
5	250 mm	200°C	pelety + tvárnice	1600 kg/m ³	LPC
6	100 mm		tvárnice	1200 kg/m ³	OPC
7	100 mm		tvárnice	1600 kg/m ³	OPC
8	100 mm		tvárnice	1200 kg/m ³	LPC
9	100 mm		tvárnice	1600 kg/m ³	LPC
10	100 mm		pelety	1600 kg/m ³	OPC

* vstupní objemová hmotnost tvárnice/peletového zásypu

Cíl: Cílem projektu je, na základě provedených in-situ experimentů v reálném horninovém prostředí, porovnat několik druhů materiálů a jejich interakce v prostředí podobnému hlubinnému úložišti (HÚ). Na základě tohoto srovnání bude možné vyhodnotit a následně doporučit nebo vyloučit použití konkrétních materiálů a jejich kombinací v budoucím HÚ.

Závěr a přínos pro HÚ a jeho podpůrný program: Zatím nelze shrnout, jelikož projekt stále probíhá.

Předpokládané výstupy: parametrická studie, detailní popis chemických, mineralogických a mikrobiálních procesů vznikajících na základě interakce materiálů (bentonit, beton, hornina) a porovnání možných procesů v závislosti na nastavených podmínkách v konkrétním vrtu v prostředí saturovaném podzemní vodou.

 SÚRAO	Shrnutí výzkumu českých bentonitů pro hlubinné úložiště – do roku 2018	Evidenční označení:
		TZ 309/2018

5.2.17 BCV do 80 °C

Plný název: Numerické modelování a laboratorní charakterizace bentonitové bariéry v úložištích odpadu z jaderných zařízení v ČR

Reference: Zatím bez reference

Doba řešení: 2018 - 2022

Řešitel: UK (hl. řešitel), ČVUT

Bentonit: BCV


Popis: Projekt je podpořen z TAČR, SÚRAO má roli aplikačního garanta.

Projekt je zaměřen na:

- Charakterizaci THM vlastností českého bentonitu BCV při teplotách do 80°C v laboratoři
- Numerický model THM vlastností bentonitu BCV při teplotách do 80°C

Cíl: Kalibrace a validace numerického modelu THM vlastností bentonitu BCV při teplotách do 80°C.

Závěr a přínos pro HÚ a jeho podpůrný program: Hlavním přínosem bude validovaný THM model bentonitu BCV při teplotách do 80°C.

 SÚRAO	Shrnutí výzkumu českých bentonitů pro hlubinné úložiště – do roku 2018	Evidenční označení:
		TZ 309/2018

5.2.18 Inženýrská bariéra 200°C

Plný název: shodný
Reference: zatím bez reference
Doba řešení: 2018 - 2025
Řešitel: ČVUT (hl. řešitel), UK, ČGS, TERAMED
Bentonit: BCV

Popis: Projekt je podpořen z TAČR, SÚRAO má roli aplikačního garanta.

Projekt je zaměřen na studium vlastností bufferu při teplotách do 200°C. Hlavním nástrojem bude plně instrumentovaný in-situ fyzikální model úložného místa. Instalace modelu proběhne v podzemní laboratoři Josef v roce 2019. V experimentu bude použit peletizovaný bentonit BCV, materiál topidla bude vybrán z kandidátních materiálů pro UOS a konstrukční betonové prvky budou z betonu se sníženým pH. Před zahájením experimentu, jeho průběhu a dismantlingu budou na bentonitu stanoveny:

- mineralogicko-geochemické charakteristiky
- materiálové parametry termo-hydro-mechanického hypoplastického modelu
- parametry popisující propustnost a tepelnou vodivost
- a geomikrobiologické studie chování mikrobiálního osídlení.

V roce 2024 bude model rozebrán a vzorky analyzovány. V rámci projektu bude také kalibrován a validován numerický THM model bufferu zatěžovaného teplotami do 200°C.

Cíl: Hlavním cílem projektu je studium chování bufferu při teplotách do 200°C. Pro naplnění tohoto cíle budou analyzovány klíčové parametry bentonitu a bude kalibrován a validován numerický model THM chování bufferu.

Závěr a přínos pro HÚ a jeho podpůrný program: Zatím nelze shrnout, jelikož projekt stále probíhá. Závěry z tohoto projektu by mohly sloužit k optimalizaci konceptu HÚ radioaktivních odpadů, což by vedlo ke značným finančním úsporám při výstavbě a provozu HÚ.

Předpokládané výstupy:

- Databáze materiálových charakteristik založená na datech získaných v průběhu projektu, a to na základě laboratorního měření, měření samotného experimentu Mock-Up, numerických optimalizačních analýz a mineralogicko-geochemických analýz změn v bentonitu zatíženého do 200°C
- geomikrobiologické studie chování mikrobiálního osídlení
- numerický THM model bufferu do 200 °C.

5.3 Plánované

Plánované experimenty se nově zaměří na stabilitu bentonitu za teplot nad 100 °C. Bude pokračovat řešení problematiky migrace plynu a materiálových interakcí v in-situ prostředí v hloubce relevantní pro HÚ.

Experimentální plán bude postupně doplňován po ukončení probíhajících experimentů, neboť bude možné lépe definovat potřebu dat/modelů v různých oblastech výzkumu.

Výčet plánovaných projektů/experimentů, které jsou v nadcházejících kapitolách stručně popsány:

- EURAD – GAS
- EURAD – HITEC
- Korozní experiment

 SÚRAO	Shrnutí výzkumu českých bentonitů pro hlubinné úložiště – do roku 2018	Evidenční označení:
		TZ 309/2018

5.3.1 EURAD – GAS

Plný název: EURAD - Work Package: Mechanistic understanding of gas migration in clay materials (GAS)
Reference: Zatím žádné
Doba řešení: 2019 - 2023
Řešitel: Za českou republiku - SÚRAO, ČVUT, ÚJV Řež
Bentonit: BCV

Popis CZ výzkumu: European Joint Programme on Radioactive Waste Management (EURAD) je evropský projekt, který byl podán na konci září 2019 a zatím není rozhodnuto o jeho podpoře ze strany Evropské komise. V rámci EURAD se bude řešit většina aktuálních témat spojených s problematikou HÚ. Dle oblastí výzkumu se projekt dělí na 7 RD&D WP. Jednou z těchto WP je GAS, mezi jehož hlavní cíle patří zlepšení porozumění mechanismu transportu plynu v přírodních a inženýrských jílových materiálech, a dále určení režimů transportu plynu v prostředí bariér hlubinného úložiště ve vztahu k potencionálnímu narušení jejich integrity.

V rámci tohoto WP se bude konsorcium SÚRAO-ČVUT-ÚJV zabývat laboratorním výzkumem migrace plynu ve vodou nasyceném kompaktním bentonitu. Jak ČVUT, tak ÚJV by mělo přispívat v oblasti zabývající se advektivními procesy proudění plynu. Dle současných znalostí dochází k migraci plynů ve vodou nasycených jílových materiálech především sítí dilatantních cest, které se v materiálu začínají tvořit při překročení určité vstupní hranice tlaku plynu. Experimentální program bude zahrnovat provádění plynových tlakových zkoušek na vzorcích vodou nasyceného bentonitu, a to s použitím stlačeného vzduchu v případě laboratoří ČVUT, a s použitím vodíku v laboratořích ÚJV.

Cíl CZ výzkumu: Cílem celého programu oblasti WP, kde bude konsorcium přispívat, je definování dochází-li k migraci plynů v jílových materiálech visko-kapilárním nebo dilatantním prouděním, nebo kombinací obou zmíněných způsobů. Cílem zkoušek konsorcia bude především zkoumání jevu označovaného jako „průraz“ (z angl. termínu breakthrough), při kterém dochází k propagaci preferenční cesty skrz zkoumaný materiál a začátku advektivního proudění plynu.

Program ČVUT bude dále obsahovat provádění opakovaných cyklů zatěžování vzorků tlakem plynu a opakovaného sycení vzorků vodou. Cílem těchto testů bude testování samohojící schopnosti bentonitu. ČVUT bude těmito testy přispívat v oblasti WP zabývající se integritou jílových bariér.

Závěr a přínos pro HÚ a jeho podpůrný program: Přínosem navrženého programu testů je ověření dosavadních teoretických znalostí o procesech proudění plynů přímo na českém bentonitu. Znalost o transportních mechanismech je klíčová pro bezpečnostní hodnocení funkce bentonitové bariéry.

Velkým přínosem je možnost zkoumat procesy přímo s použitím vodíku (laboratoře ÚJV), tedy druhem plynu, vznikajícího korozí materiálů UOS, který bude ovlivňovat bezpečnostní funkci bentonitové bariéry.

 SÚRAO	Shrnutí výzkumu českých bentonitů pro hlubinné úložiště – do roku 2018	Evidenční označení:
		TZ 309/2018

5.3.2 EURAD – HITEC

Plný název: EURAD - Work Package: Influence of temperature on clay-based material behaviour

Reference: Zatím žádné

Doba řešení: 2019 -2022

Řešitel: Za českou republiku - SÚRAO, ČVUT, UK, ÚJV Řež

Bentonit: BCV

Popis CZ výzkumu: European Joint Programme on Radioactive Waste Management (EURAD) je evropský projekt, který byl podán na konci září a zatím není rozhodnuto o jeho podpoře ze strany Evropské komise. V rámci EURAD se bude řešit většina aktuálních témat spojených s problematikou HÚ, dle oblastí výzkumu se projekt dělí na 7 RD&D WP. Jednou z těchto WP je právě HITEC.

V rámci HITEC se bude CZ konsorcium zabývat testováním a numerickým modelováním THM vlastností BCV bentonitu zahříváného v rozmezí teplot 100 – 150°C.

Práce CZ konsorcia lze rozdělit do těchto oblastí:

1. Charakteristika materiálu ovlivněného teplotami do 150°C
 - Materiál zahříván na teploty do 150 °C a poté charakterizován při laboratorní teplotě.
2. Procesy při zvýšené teplotě
 - Sledování procesů (mechanické chování, hydraulické vlastnosti) při různých teplotách (do 150 °C) v průběhu zahřívání vzorků.
3. Laboratorní experimenty středního měřítka
 - Ověření chování bentonitu ve fyzikálním modelu simulujícím buffer (bentonit z jedné strany sycen a z druhé zahříván) při různých sytících tlacích. Toto měření umožní i sledování vývinu par.
4. THM model
 - Materiálový model, kalibrace hypoplastického modelu na základě provedených laboratorních experimentů. Studium předpovědí modelu při teplotách nad 100 °C. V případě nesrovnalostí další vývoj modelu či charakterizování změn v hodnotách materiálových parametrů.
 - MKP model laboratorních experimentů středního měřítka – pro validaci materiálového modelu a eventuální úpravu kalibrace hypoplastického modelu

Cíl CZ výzkumu: Hlavním cílem je analýza vlastností BCV do 150°C a THM numerický model.

Závěr a přínos pro HÚ a jeho podpůrný program: Zatím nelze shrnout. Závěry z tohoto projektu by mohly sloužit k optimalizaci konceptu HÚ radioaktivních odpadů, což by vedlo ke značným finančním úsporám při výstavbě a provozu HÚ.

Předpokládané výstupy:

- Komplexní charakterizace českého bentonitu BCV při teplotách do 150°C
- Kalibrace a validace numerického modelu THM vlastností bentonitu BCV při teplotách do 150°C.

 SÚRAO	Shrnutí výzkumu českých bentonitů pro hlubinné úložiště – do roku 2018	Evidenční označení:
		TZ 309/2018

5.3.3 Korozní experiment

Plný název: Testování vlivu in-situ prostředí v hloubce úložiště na korozi materiálů obalového souboru
Reference: Zatím žádné
Doba řešení: 2019 -2031
Řešitel: Zatím nebyl vysoutěžen
Bentonit: BCV

Popis: Projekt je zaměřen na sledování dlouhodobé koroze (až 10 let) kandidátních materiálů pro UOS. Pro tyto potřeby budou instalovány fyzikální modely v in-situ prostředí podzemní laboratoře PVP Bukov a v laboratorním prostředí. Vše bude probíhat v anaerobních podmínkách nebo podmínkách jim blízkým pro simulaci prostředí HÚ.

Práce jsou rozděleny do dvou navazujících fází:

1. etapa prací – charakterizace vybraných oblastí horniny v PVP Bukov:
 - stanovení chemického složení vody, teploty vody ve vrtu, obsahu kyslíku, Eh, pH, charakteru přítomných mikrobiálních kolonií;
 - určení potřebné hloubky pro umístění experimentu, které by splňovalo požadavky na anaerobní prostředí;
 - analýzy vrtného jádra;
 - geologická dokumentace a interpretace geologického prostředí;
 - stanovení objemu přítoků vody do vrtu.
2. etapa prací – experimenty v PVP Bukov a v laboratoři: V rámci této etapy budou navrženy, realizovány a vyhodnoceny dva typy korozních experimentů – in-situ v PVP Bukov a srovnávací v laboratorním prostředí. V obou experimentech bude sledována koroze kandidátních materiálů v různých teplotních podmínkách – za přirozené teploty v horninovém masivu v hloubce úložiště a dále za zvýšené teploty (70-90°C) odpovídající teplotě povrchu UOS v HÚ. Hlavní experimentální práce budou obsahovat:
 - popis počátečních podmínek v místě experimentu (parametry podzemní vody, mikrobiální aktivita, teplota, atd.),
 - analýzy vzorků z experimentu in-situ a v laboratoři v intervalech 1, 2, 4, 7, 10 let a
 - kontinuální monitorování korozních sond a modulů.

Cíl: Cílem zakázky je získat znalosti o korozní odolnosti kandidátních materiálů pro UOS v horninovém prostředí hlubinného úložiště a predikci jejího vývoje. Dále bude výzkum zaměřen na sledování vlivu koroze tohoto materiálu na vlastnosti bentonitu a vyhodnocení vlivu působení mikroorganismů na inženýrské bariéry (bentonit a kovové materiály).

Závěr a přínos pro HÚ a jeho podpůrný program: Zatím nelze shrnout, jelikož projekt ještě nezačal.

Požadované výstupy jsou:

- stanovení korozní rychlosti kandidátních materiálů
- identifikace korozních produktů
- ovlivnění vlastností bentonitu vznikajícími korozními produkty
- vývoj chemizmu podzemní vody
- sledování vývoje mikrobiální aktivity ve vodě a v bentonitu s ohledem na ovlivnění koroze materiálů
- stanovení míry ovlivnění mikrobiální aktivity teplotou.

5.4 Shrnutí

České bentonity pro HÚ jsou zkoumány od roku 1999. Během této doby se realizovalo mnoho projektů různého rozsahu. Tyto projekty lze rozdělit do 8 kategorií dle jejich zaměření (viz tab. 4). Těchto 8 kategorií je dále popsáno a je u nich stručně shrnuto, čeho bylo v této oblasti dosaženo.

1) Geochemická charakteristika

Detailní strukturní a chemická charakteristika bentonitu je důležitá pro přípravu laboratorních modelů, in-situ experimentů a predikci chování daného materiálu při interakci s ostatními bariérami HÚ.

Studované české bentonity (Rokle, B75 a BAM) jsou detailně popsány v mnoha pracích, u každého prováděného experimentu je zdokumentován počáteční stav bentonitového materiálu, aby bylo možné porovnat případné změny po disantlingu.

V rámci geochemie byla poměrně detailně studována i problematika tvorby koloidů (projekt Belbar). Na základě příznivých výsledků z tohoto projektu nebyly prozatím koloidy u českých bentonitů dále testovány.

Bentonit BCV je stále ještě testován – jak z hlediska mineralogie, tak z hlediska chemických vlastností.

2) Geotechnická charakteristika

Pro správnou funkci bentonitových bariér v HÚ jsou klíčovými parametry bobtnací tlak a hydraulická vodivost. Doplňkovým geotechnickým parametrem je tepelná vodivost, která je zásadní z hlediska dimenzování HÚ.

Hodnoty geotechnických parametrů se u českých Ca-Mg bentonitů příliš neliší. Tyto parametry jsou závislé na zhutnění vzorku, čím více je vzorek zhutněn, tím je bentonit méně propustný, má větší bobtnací schopnost a je více tepelně vodivý. Z tohoto hlediska bude důležité znát míru nehomogenity bentonitových bariér (aktuálně se řeší v rámci projektu BEACON, viz 5.2.15). Dále je nutné znát, jak jsou tyto parametry ovlivněny podmínkami v HÚ (teplo, podzemní voda, bakterie a radioaktivita). Několik projektů bylo, či je přímo zaměřených na vliv tepla, chemismu podzemní vody a mikrobiální aktivity. Výsledky vždy ukazují zanedbatelné změny těchto parametrů, což může být způsobeno nedostatečnou dobou provozování experimentu.

3) THM(C) numerické modely

Hlavním cílem numerických modelů THM(C) procesů je predikovat chování bentonitových materiálů v HÚ v horizontu desítek až statisíců let. Tyto matematické modely je třeba validovat pomocí fyzikálních modelů realizovaných za podmínek, které se blíží podmínkám, které budou v hlubinném úložišti, tj. zpravidla v podmínkách podzemních laboratoří. Je zřejmé, že je možno ověřit pouze počáteční trendy těchto změn, ale i tyto trendy mohou indikovat vypovídací schopnost matematických THM(C) modelů predikovat procesy probíhající v bentonitu.

THM modely bentonitové bariéry byly vyvinuty několika českými týmy, ale stále probíhají validace a dodatečné kalibrace v rámci různých projektů (viz tab. 4). Sdružený THMC model zatím není k dispozici.

4) Mikrobiální aktivita

Mikrobiální aktivita je v současné době aktuálním tématem při návrhu bariér HÚ. Mikrobi uvnitř bentonitu nebo ti, kteří se dostanou do bentonitu z okolní horniny, mohou snížit bobtnací schopnost bentonitu. To nebylo v ČR experimentálně prokázáno. V současnosti je

několik projektů zaměřených na tuto problematiku s hlavním cílem: nalézt při jaké objemové hmotnosti sušiny ustává mikrobiální aktivita uvnitř bentonitu.

5) Rozhraní bentonit/UOS, bentonit/beton, bentonit/horninové prostředí

Tyto tzv. reaktivní zóny představují oblasti, kde bude v HÚ docházet k větším či menším změnám u původních materiálů (bentonit, beton, horninové prostředí, UOS).

V ČR byla a je problematika interakce materiálů řešena v několika projektech (např. Mock-Up-CZ, Mock-Up Josef, Interakční experimenty, MaCoTe).

Při dlouhodobějších interakcích (v řádu několika let) byly zjištěny a popsány geochemické/mineralogické změny v bentonitech. Tyto změny v minerálních asociacích jsou velice malé a novotvořených fází je zpravidla <1 hm. %.

V současné době je provozováno několik experimentů a další full-scale experiment je v přípravě (HotBENT). Po dokončení experimentální fáze a následném dismantlingu bude k dispozici více informací o chování českých bentonitů v prostředí relevantním pro HÚ.

6) Migrace plynů, plynopropustnost


V této oblasti jsou řešeny mechanismy migrace plynů zhuštěným bentonitem. V HÚ se po nasycení bufferu dostane voda na kontakt s ukládacím kontejnerem a začnou probíhat korozní procesy, při kterých vznikají plyny, především vodík. Při laboratorních testech jsou proto simulovány případy, kdy je plně nasycený bentonit zatěžován tlakem plynu. Dle současných znalostí nedochází k migraci plynu ve vodou nasycených jílových materiálech visko-kapilárním prouděním, kdy je výrazným způsobem vytlačována voda z již existujících pórů, ale v počátku difuzí, a při větších objemech generovaných plynů sítí dilatantních cest, které se v materiálu začínají tvořit při překročení určité vstupní hranice tlaku plynu.

V ČR se touto problematikou zabývá CEG-ČVUT a ÚJV Řež. Testy byly v minulosti prováděny na materiálu B75 a Sabenil 65. V současnosti probíhá projekt ZL 36 (viz 5.2.13), kde je testován materiál BAM, a program by měl pokračovat v rámci projektu EURAD – GAS (viz 5.3.1).

7) Transportní charakteristiky

Jednou z klíčových funkcí bentonitu 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. Významné poznatky a metodiky pro hodnocení transportu radionuklidů přes inženýrské bariéry, tj. v tzv. poli blízkých interakcí, byly získány především ze dvou velkých projektů řešených konsorciem výzkumných organizací koordinovaných ÚJV Řež, a. s., v letech 2001 až 2003 a v letech 2005 až 2008 v projektu „Zavedení metod hodnocení inženýrských bariér“ (viz 5.1.1) a „Výzkum procesů pole blízkých interakcí hlubinného úložiště VJP a vysoce aktivních odpadů“ řešeného v letech 2006 - 2008, (5.1.4). 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 rozbor. Práce byla zaměřena zejména na české typy bentonitů, ale i srovnání získaných výsledků se zahraničními bentonity. Na tyto práce navázal projekt „Výzkumná podpora pro bezpečnostní hodnocení lokalit“, který byl zahájen v roce 2014. Hlavním cílem prací zaměřených na transportní vlastnosti bentonitu bylo:

- experimentální ověření a srovnání transportních parametrů bentonitu o různém stupni zhuštění, pro mobilní radionuklidy

 SÚRAO	Shrnutí výzkumu českých bentonitů pro hlubinné úložiště – do roku 2018	Evidenční označení:
		TZ 309/2018

- výzkum a vývoj procesních modelů a výpočetních kódů pro predikci transportu kritických radionuklidů v systému inženýrských bariér včetně transportu radionuklidů přes rozhraní UOS-bentonit a bentonit-granit,
- shrnutí a aktualizace hodnot transportních parametrů pro bentonit a rozhraní s ostatními bariérami ve formě databáze parametrů včetně odhadu jejich nejistot na základě provedených experimentálních prací a analýzy dosavadních poznatků dosažených při přípravě HÚ v ČR a aktualizace analýz zahraničních poznatků.

8) Demonstrační experimenty / vývoj prefabrikátů

Demonstrační experimenty mají za cíl ověřit chování inženýrských bariér v in-situ prostředí. Zároveň mohou být cílené na ověření výrobních a manipulačních technologií pro různé druhy bentonitových prefabrikátů.

V ČR byl v in-situ podmínkách vystavěn model bufferu (Mock-Up Josef, viz 5.2.2) a model zátky (EPSP – DOPAS, viz 5.2.3), oba experimenty stále běží.

Vývojem prefabrikátů v průmyslovém měřítku se zabývá jen projekt na vývoj pelet (viz 5.2.14), v menším měřítku byla vyvinuta technologie stříkaného bentonitu a lisovány bentonitové tvárnice pro mock-up experimenty.

Tab. 4 – Rozdělení projektů (kde byl testován CZ bentonit) do 8 kategorií dle jejich zaměření. Barva výplně rozděluje projekty dle jejich ukončení – červené (ukončené), zelené (probíhající), žluté (plánované)

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	Geochemická charakteristika	Mock-Up CZ	Saturační média - geochemie	Verifikace	MPO TIP FR– T11/362	Transport 3 (ZL13)	Mock-Up Josef	VAV UOS	Interakční experiment	Inženýrská bariéra 200°C	DOPAS-EPSP	Korozní produkty (ZL25)	Belbar ABM	EURAD - HITEC	Korozní experiment
2	Geotechnická charakteristika	Mock-Up CZ	Saturační média - geotechnika	MPO TIP FR– T11/362	Blízké interakce	Verifikace	BEACON	Mock-Up Josef	DOPAS-EPSP	Interakční experiment	Inženýrská bariéra 200°C	BCV do 80°C	ABM	EURAD - HITEC	
3	THM(C) modely	Mock-Up CZ	Blízké interakce	BEACON	Decovalex 2019	BCV do 80°C	Interakční experiment	Inženýrská bariéra 200°C	EURAD - HITEC						
4	Bakteriální interakce	Mikrobiální koroze (ZL20)	Mock-Up Josef	MACOTE	MIND	Inženýrská bariéra 200°C	Korozní experiment								
5	Rozhraní : bentonit/ÚOS, bentonit/beton, bentonit/hornina	MPO TIP FR– T11/362	CEBAMA	Mock-Up Josef	MACOTE	VAV UOS	Experiment y s UOS	Korozní produkty (ZL25)	Inženýrská bariéra 200°C	Interakční experiment	Korozní experiment				
6	Migrace plynů a plynopropustnost	Plynopropustnost (ZL36)	EURAD - HITEC	EURAD-GAS											
7	Transportní charakteristiky	Metody hodnocení	Saturační média - geochemie	Blízké interakce	MPO TIP FR– T11/362	Transport 3 (ZL13)									
8	Demonstrační experimenty / vývoj prefabrikátů	Stříkané bentonity	Mock-Up CZ	Mock-Up Josef	DOPAS-EPSP	Pelety (ZL10)	Inženýrská bariéra 200°C								

6 Současný střednědobý plán výzkumu a vývoje

Pro následující období do roku 2025 existuje obecný střednědobý plán (Pospíšková et al., 2015), který je potřeba konkretizovat. Navazující text je většinou přímo přejet ze střednědobého plánu. Některé části byly aktualizovány, jelikož jde o 3 roky starý report.

V následujícím období bude třeba především ověřit, zda tuzemské typy vápenato-hořečnatých bentonitů, je možno využít v plánovaném hlubinném úložišti. Je nutné porovnat vlastnosti tuzemských typů bentonitu a bentonitů navrhovaných v zahraničí. Při této práci budou využity především výsledky mezinárodního projektu ABM (viz 5.2.1), ve kterém jsou srovnávány vlastnosti různých typů bentonitu včetně bentonitu z českých ložisek.

Dojde k vyhodnocení demonstračního experimentu Mock-up-Josef (viz 5.2.2), který bude zhodnocen v navazujícím projektu „Mock-up Josef - Dismantling“. Budou získány praktické zkušenosti o chování bentonitové bariéry zatížené dlouhodobým působením vysoké teploty a podzemní vody. Dále dojde k hodnocení projektu Interakčních experimentů v PVP Bukov (viz 5.2.16), jehož výsledky poskytnou informace o interakčním chování navržených materiálů pro hlubinné úložiště.

I nadále budou pokračovat projekty zaměřené na problematiku výroby bentonitových komponent v HÚ (pelety, tvárnice, nástřik atd.), studium technologických spár a vlivu samohojení v inženýrských bariérách.

V závislosti na dalších výzkumech (teplo-technické, mineralogické atd.) je třeba optimalizovat nejen tloušťku, ale i složení inženýrské bariéry, bufferu, v okolí ukládacího obalového souboru. V oblasti mezinárodní spolupráce budou dále využívány mezinárodní projekty pro získání dat o chování v zahraničí používaných materiálů.

V oblasti vývoje backfillu jsou v současnosti k dispozici pouze obecné informace, v této oblasti je tedy potřeba navrhnout plán dlouhodobého výzkumu, který bude zaměřen nejen na obecné charakteristiky materiálu, ale i na konkrétní formu, a případně návrh směsi vhodné pro použití v hlubinném úložišti.

Pro období 2018 - 2025 jsou plánovány následující práce:

- analýza výsledků projektu „Alternative Buffer Materials“ a stanovení odlišností českých typů bentonitu a nejistot jeho aplikace v českém konceptu HÚ, návrh výzkumného programu pro prokázání vhodnosti českých typů bentonitu,
- dokončení a analýza projektu Mock-Up Josef, realizace s následným dismantlingem experimentu
- výzkum v oblasti vzájemných interakcí materiálů (low pH beton, injektážní hmoty, ocelový kontejner atd.).
- Korozní experiment v PVP Bukov (interakční chování s bentonitovým materiálem)
- optimalizační studie tloušťky a složení výplňového bentonitového materiálu v návaznosti na udržení jeho požadované funkce v prostředí konkrétních lokalit,
- prověření možnosti různých způsobů výroby bentonitových komponent,
- demonstrace vhodnosti českých typů bentonitu pro využití v HÚ (návrh a implementace experimentů in-situ a v laboratořích).
- ověření materiálů využitelných pro výplňové a těsnicí systémy s primárním využitím zejména materiálů z českých jílových ložisek či jejich směsi s rubaninou
- výzkum optimální formy výplňových materiálů (bloky, pelety, nástřik)

7 Závěr

Česká republika má perspektivní ložiska bentonitu a montmorillonitických jíly, která by mohla být využita pro potřeby HÚ. Jelikož geneze českých bentonitů je velmi podobná, materiál se charakteristikami a vlastnostmi příliš neliší. Montmorillonitické jíly se i přes nižší obsah smektitu a vyšší podíl akcesorických minerálů ukazují jako přijatelná alternativa bentonitů.


Od roku 1999 SÚRAO realizovalo ve spolupráci s dodavateli okolo 30 výzkumných projektů týkajících se problematiky využití českého bentonitu v HÚ. Tento dvacetiletý výzkum umožnil vybudování kvalitního výzkumného a modelářského týmu ve všech klíčových oblastech, verifikaci metodik stanovení důležitých parametrů a verifikaci a validaci numerických THM(C) modelů.

Stávající střednědobý plán výzkumu udává jen obecné oblasti, ve kterých je potřeba realizovat detailnější výzkum. Vzhledem k již získaným zkušenostem je vhodná doba pro konkretizaci potřebných oblastí výzkumu. Výstupem detailního střednědobého plánu by měl být experimentální program zaměřený na získání hraničních hodnot bentonitových parametrů pro bezpečnostní rozbor.

8 Reference

- Anders E., Nilsson U., Svensson D. (2007) Aspö Hard Rock Laboratory, Alternative Buffer Material, Installation report, IPR-07-15, SKB, Stockholm
- ANDRA Dossier (2005) Argile-Phenomenological Evolution of a geological Disposal System. Chatenay-Malabry, France: ANDRA 2005.
- Čechová Z., Jann J., Liu Y., Kudrnáčová I., Martinez M. A., Pacovský J., Svoboda J., Vašíček R. (2005), Dismantling Procedures for the Mock-Up-CZ Experiment, SÚRAO (TZ 11-05)
- Černík M. et al. (2016), Mikrobiální koroze za podmínek hlubinného úložiště pro koncepci ocelový UOS – zhutněný bentonit, SÚRAO, TZ 196/2017
- Červinka R. a Vejsadů, J., Studium vývoje vlastností a eroze bentonitu z lokality Rokle, (arch. č. SÚRAO 42/10, 42/11)
- Červinka R., Vašíček R. a kolektiv (2018), Kompletní charakterizace bentonitu BCV 2017 - Samostatná příloha 3. průběžné zpráv, SÚRAO (technická zpráva v tisku)
- Červinka R., Vopálka D., Adam R., Brázda L., Dřtinová B., Hofmanová E., Kittnerová 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.
- Červinka, R. (2014): Stanovení kationtové výměnné kapacity (CEC) a výměnných kationtů pomocí metody s Cu(II)triethyltetraminem. Certifikovaná metodika. Č.j. SÚJB/ONRV/15452/2014.
- Davies C.W., Davie C.T., Edward A.C., White M.L. (2017), Physicochemical and Geotechnical Alterations to MX-80 Bentonite at the Waste Canister Interface in an Engineered Barrier System, Geoscience
- Dobrev D., Gondolli J., Kouřil M. (2016), Návrh dlouhodobých korozních zkoušek, SÚRAO, TZ 75/2016
- Dobrev D., Gondolli J., Kouřil M., Stouřil J. a Straka M. (2017a) Korozní zkoušky s materiály navrženými pro konstrukci ukládacích obalových souborů (SÚRAO, TZ 319/2018)
- Dobrev D., Gondolli J., Mendoza Miranda A.N., Steinova J., Zuna M. (2017b) Korozní zkouška v přírodním granitoidním prostředí (SÚRAO, TZ 194/2017)
- Dohrmann R. and Kaufhold S. (2017), Characterization of the Second Package of the Alternative Buffer Material (ABM) Experiment – II Exchangeable Cation Population Rearrangement, Clays and Clay Minerals, Volume 65
- Franče, J. (1992): Bentonity ve východní části Doupovských hor, Sborník geologických věd 30, 43-90.
- Gondolli et al. (2018), Korozní produkty - 3. Průběžná zpráva, (zpráva SÚRAO č. 217/2018)
- Hausmannová L. (2017), Vliv sytícího tlaku na hydraulickou vodivost a bobtnací tlak českých bentonitů, disertační práce, Fakulta stavební ČVUT v Praze,
- Holíková P. (2011), Vliv zpracování vzorku na výsledky meze tekutosti bobtnavých jíílů, diplomová práce, Fakulta stavební ČVUT v Praze
- Karnland O., Olsson S., Nilsson U. (2006), Mineralogy and sealing properties of various bentonites and smectite-rich clay materials, TR-06-30, SKB
- Křížová V. et al. (2008) Mineralogický, chemický a geochemický výzkum stability dlouhodobě tepelně zatíženého materiálu bentonitové bariéry na vzorcích získaných z experimentu Mock-Up-CZ, (arch. č. SÚRAO 14/06, 62/06, 10/07, 25/07, 5/08, 8/08 (závěrečná zpráva)

- 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)
- Lajudie A., Raynal J., Petit J.C., et al. (1996) Clay-based materials for engineered barriers: a review, Materials Research Society Symposium Proceeding, 353, pp. 221-229
- Maryška J., Blaheta R., Hokr M., Říha J. (2018), Vývoj a ověřování metodik modelování THMC procesů v rámci mezinárodního projektu DECOVALEX 2019 (Průběžná zpráva)
- Meier L.P. & Kahr G. (1999), Determination of the cation exchange capacity (CEC) of clay minerals using the complexes of copper (II) ion with triethylenetetramine and tetraethylenepentamine, Clay and Clay Minerals, Vol. 47
- Müller-Vonmoos, M. & Kahr, G. (1983): Mineralogische Untersuchungen von Wyoming Bentonite MX-80 und Montigel. Nagra Tech. Rep. NTB 83-13.
- Pacovský J. a Svoboda J. (2007), Fyzikální modelování – uplatnění přírodních bentonitů; Analýza, vývoj a experimentální ověření materiálů na bázi bentonitů a smektitických jílů, (arch. č. SÚRAO 50/07)
- Pacovský J. a Šťástka J. (2012) Výzkum možnosti využití stříkaného bentonitu pro konstrukci těsnicí vrstvy hlubinného úložiště, (arch. č. SÚRAO 47/10, 5/11, 15/11, 24/11, 32/11, 10/12)
- Pacovský J. et al. (2001) Studium geotechnických charakteristik IB HÚ, (arch. č. SÚRAO 25/99, 32/00, 33/00, 34/00, 35/00, 36/00, 37/00, 38/00, 38/01)
- Pacovský J. et al. (2004) Verification of substitution of bentonites by montmorillonitic clays, (arch. č. SÚRAO 47/02, 58/02, 68/03, 17/04, 40/04, 61/04 (závěrečná zpráva).
- Pacovský J. et al. (2006), Mock-Up-CZ – fyzikální model multibariérového systému, (arch. č. SÚRAO 32/00, 16,37/02, 62/03, 64/03, 22/04, 52/04, 10/05, 11/05, 24/05, 28/06, 29/06 (závěrečná zpráva)
- Pacovský J., Matějka P., Zeman J. et al. (2008), Geotechnický, bakteriologický a korozní výzkum dlouhodobě tepelně zatíženého materiálu bentonitové bariéry při saturaci syntetickou granitickou vodou, (arch. č. SÚRAO 63/06, 9/07, 24/07, 47/07, 7/08, 8/08 (závěrečná zpráva)
- Pacovský J., Svoboda J. a Zapletal L. (2007): Saturation development in the bentonite barrier of the Mock-Up-CZ geotechnical experiment. Physics and Chemistry of the Earth 32: Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement – Part 2, 767 – 779.
- Pacovský J., Šťástka et al. (2017), Návrh a výroba směsi bentonitových pelet - 1. Průběžná zpráva - Shrnutí stávajícího stavu řešené problematiky a návrh prací, (zpráva SÚRAO č. 311/2018)
- Pacovský J., Šťástka et al. (2018), Návrh a výroba směsi bentonitových pelet - 2. Průběžná zpráva: Výroba pelet a laboratorní ověření (zpráva SÚRAO č. 312/2018)
- Pacovský J., Vašíček R. a Hausmannová L., (2011) Geotechnický výzkum přírodních zelených jílů miocenního cyprisového souvrství z lokality Skalná – Nová Ves, (arch. č. SÚRAO 49/10, 7/11, 33/11 (závěrečná zpráva)
- Pacovský J., Vašíček R., Hausmannová L. (2010), Experimentální výzkum materiálu na bázi bentonitu při dlouhodobém působení teploty a saturačního média s extrémními účinky (zpráva SÚRAO č. 17/10)
- Posiva SKB (2017), Report 01 - Safety Functions, performance targets and technical design requirements for s KBS-3V repository
- Pospíšková I., Vokál A., Vondrovic L. et al. (2015), Střednědobý plán výzkumu a vývoje pro potřeby umístění hlubinného úložiště, (zpráva SÚRAO č. 1/2015)

 SÚRAO	Shrnutí výzkumu českých bentonitů pro hlubinné úložiště – do roku 2018	Evidenční označení:
		TZ 309/2018

- Příkryl R., Hanus R., Kolaříková I. a Vejsada J. (2004): Verification of substitution of bentonites by montmorillonitic clays. Final report, SÚRAO (10/2002/Wol).
- SKB (2016), Åspö Hard Rock Laboratory Annual Report 2015, TR-16-10, SKB, Stockholm
- Surovinové zdroje České republiky, Nerostné suroviny 2010, MŽP, ČGS – Geofond.
- Svensson D., Dueck A., Nilsson U., Olsson S., Sandén T., Lydmark S., Jägerwall S., Pedersen K., Hansen S. (2011), Alternative buffer materiál. Status of the ongoing laboratory investigation of reference materials and test package 1, TR-11-06, SKB, Stockholm
- Svoboda J., Pacovský J., Štáštka J., Vašíček R., Pacovská D., Nádherná D. (2018), Interakční experiment - Realizační projekt, (zpráva SÚRAO č. 245/2018)
- Štáštka J. (2009) Technologie stříkaného backfillu, (arch. č. SÚRAO 45/07, 12/08, 36/08, 37/08, 5/09, 38/09 (závěrečná zpráva)
- 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.
- Vašíček R., (2009) Technologie stříkaného backfillu -závěrečná zpráva (zpráva SÚRAO 38/09)
- Vašíček, R.; Hausmannová, L.; Holíková, P.; Smutek, J.; Levorová, M.; Kaisr, Z.; Červinka, R.; Večerník, P. et al. (2011) Závěrečná zpráva řešení Podetapy 4.1 projektu FR-TI1/362: Výzkum vlastností materiálů pro bezpečné ukládání radioaktivních odpadů a vývoj postupů jejich hodnocení FR-TI1/362 4.1.
- 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)
- Woller, F. (2016): Nevyužívaná ložiska bentonitu v ČR, zpráva SÚRAO 2016.
- Woller, F. (in press): Bentonit – potenciální ložisko suroviny pro budování HÚ, zpráva SÚRAO.

NAŠE BEZPEČNÁ BUDOUCNOST



SÚRAO

Správa úložišť radioaktivních odpadů

Dlážděná 6, 110 00 Praha 1

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

www.surao.cz