Technická zpráva 632/2022

ANALÝZA ČESKÝCH BENTONITŮ – VYHODNOCENÍ DAT Z DATABÁZE

Šachlová Š., Černochová K., Černá K.
a kol.

Praha, 2022

SÚRAO

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

NÁZEV ZPRÁVY: Analýza českých bentonitů – vyhodnocení dat z databáze

NÁZEV PROJEKTU: Výplně a ostatní inženýrské komponenty HÚ

IDENTIFIKACE V RÁMCI PROJEKTU: Závěrečná zpráva Dílčího úkolu 3

ČÍSLO SMLOUVY: SO 2020-092

AUTORSKÝ KOLEKTIV: Šachlová Š.[1], Černochová K.[2], Černá K.[3], Svoboda J.[2], Vašíček R.[2], Macková D.[1], Havlová V.[1], Zuna M.[1], Večerník P.[1], Kolková K.[3], Hlaváčková V.[3]

ÚJV Řež, a. s.[1], České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební[2], Technická univerzita v Liberci[3]

(Horní indexy u jmen autorů odkazují na výčet institucí výše)

BIBLIOGRAFICKÝ ZÁPIS: ŠACHLOVÁ Š., ČERNOCHOVÁ K., ČERNÁ K., SVOBODA J., VAŠÍČEK R., MACKOVÁ D., HAVLOVÁ V., ZUNA M., VEČERNÍK P., KOLKOVÁ K., HLAVÁČKOVÁ V. (2022): Analýza českých bentonitů – Vyhodnocení dat z databáze, Zpráva SÚRAO 632/2022, Praha.

Lucie Hausmannová

Manažer projektu (SÚRAO)

Jiří Svoboda

Manažer projektu (ČVUT)

SÚRAO

Obsah

1 Úvod 11

1.1 Technické zadání úkolu 11

1.2 Struktura zprávy 12

1.3 Filtrování dat – kritéria 12

2 Charakterizace českých bentonitů v nezatíženém stavu 15

2.1 Chemické složení 15

2.2 Mineralogické složení 15

2.3 Kationtová výměnná kapacita 16

2.4 Specifický povrch 18

2.5 Hydraulická vodivost 18

2.6 Bobtnací tlak 19

2.7 Swell index 20

2.8 Mez tekutosti 21

2.9 Mez plasticity 23

2.10 Specifická hustota 24

2.11 Pevnost v tlaku 25

2.12 Tepelná vodivost 26

2.13 Mikrobiologické charakterizace vstupních (neovlivněných) materiálů 27

3 Zhodnocení stability 29

3.1 Stabilita za laboratorní teploty – chování bentonitové suspenze a kompaktovaného bentonitu v kontaktu s destilovanou vodou 30

3.1.1 Geochemické, mineralogické a geotechnické parametry 31

3.1.2 Mikrobiologické parametry 34

3.2 Stabilita za teploty do 100 °C 36

3.2.1 Geochemické, mineralogické a geotechnické parametry 36

3.2.2 Mikrobiologické parametry 40

3.3 Stabilita za teploty vyšší než 100 °C 44

3.3.1 Geochemické, mineralogické a geotechnické parametry 44

3.3.2 Mikrobiologické parametry 48

3.4 Složení vody (Josef, SGW2, SGW3) bez vlivu teploty 50

3.4.1 Geochemické, mineralogické a geotechnické parametry 50

3.4.2 Mikrobiologické parametry 54

3.5 Stabilita v kontaktu s UOS/práškové Fe za různé teploty 60

3.5.1 Geochemické, mineralogické a geotechnické parametry 60

3.5.2 Mikrobiologické parametry 64
3.6 Stabilita v kontaktu s YCW/LPC/C za různé teploty 66
3.6.1 Geochemické, mineralogické a geotechnické parametry 66
3.6.2 Mikrobiologické parametry 70
3.7 Radiační stabilita 72
3.7.1 Vliv ozařování na fyzikálně-chemické parametry bentonitu 72
3.7.2 Mikrobiologické parametry 73
3.8 Vliv objemové hmotnosti 76
3.8.1 Mikrobiologické parametry 77
3.9 Vliv mikrobiální aktivity na stabilitu bentonitu 79
3.9.1 Výsledky pilotního mikrobiologického zatěžování českých bentonitů 81
3.10 Stabilita bentonitu - souhrn 83
4 Navrhované práce 87
4.1 Nezatížené vzorky 87
4.1.1 Charakterizace bentonitů z vybraných ložisek 87
4.1.2 Ověření vlivu průmyslové úpravy (bez natrifikace) na parametry bentonitu 88
4.1.3 Stanovení limitní hodnoty suché objemové hmotnosti pro mikrobiologickou aktivitu u českých bentonitů 88
4.2 Teplotní zatěžování BCV při 95 °C v suchém, mokrém a kompaktovaném stavu 89
4.3 Teplotní zatěžování BCV při 150 °C v kompaktovaném stavu 90
4.4 Teplotní zatěžování při 150 °C BCV ve formě práškového bentonitu a suspenze ve velké ploše 91
4.5 Analýzy homoionních forem bentonitu 91
4.6 Určení obsahu montmorillonitu jako parametru omezujícího vhodnost bentonitu v hlubinném úložišti 92
4.7 Experimentálně vyvolané „stařeníˮ bentonitu v důsledku rozdílného složení saturačních medií 93
4.8 Stabilita kompaktovaného bentonitu v důsledku sycení podzemními vodami o odlišném složení a zatěžování za 90 °C 93
4.9 Mikrobiologická degradace bentonitu 94
4.10 Zatěžování bentonitu v kontaktu s různými formami Fe 95
4.10.1 Změny vlastností bentonitu v důsledku kontaktování s Fe-bohatými roztoky za teploty 50-60 °C 95
4.10.2 Laboratorní simulace dlouhodobého působení korozních produktů vzniklých vlivem MIC na kompaktovaný bentonit 96
4.11 Dlouhodobý experiment v „reálnémˮ 1D měřítku simulující teplotní zatížení a postupnou hydrataci 97
4.12 Laboratorně kontrolovaný experiment s LPC a kompaktovaným bentonitem 97

4.13 Ozařování bentonitu v suspenzi i v kompaktovaném stavu.....98
4.14 Mikrobiální znovuosídlení sterilního bentonitu z okolí sterilní zóny 99
4.15 Metodická doporučení 99
4.15.1 Technická doporučení pro sjednocení laboratorních postupů při přípravě a zkoušení bentonitu a počtu analýz 99
4.15.2 Mezilaboratorní porovnání výsledků a metod 100
4.15.3 Ověření vhodnosti loužení při získání pórové vody 101
4.15.4 Vývoj metodiky vstupní mikrobiologickou charakterizaci bentonitu 101
5 Závěr 103
6 Reference.....105

Seznam příloh

Příloha 1. Sekvenační analýza zahřívaných vzorků suspenzí BCV a nezahřívaných kontrol. Červené obdélníky vyznačují zahřívané vzorky s vyznačením regenerační fáze. Vzorky bez obdélníků představují nezahřívané kontroly. Upraveno dle Černá et al. (2020) – zvětšené.

Příloha 2. BCV zatěžovaný 150 °C - zastoupení mikrobiálních rodů detekovaných pomocí NGS v anaerobně inkubovaných suspenzích z teplotně zatěžovaného prášku. C - kontrolní teplotně nezatěžovaný BCV prášek, K - izolační kontroly. Upraveno dle Kašpar et al (2021) – zvětšené.

Příloha 3. Výsledky sekvenace u kompaktovaných vzorků BCV s přídavkem živin. Horní graf znázorňuje Cq hodnoty detekované pomocí qPCR, dolní graf pak detekované bakteriální rody a jejich relativní zastoupení. Červenými rámečky jsou vyznačené vzorky sytících roztoků, ve kterých byly kompaktované vzorky umístěné. Označení vzorků odpovídá značení v Tabulka 4. resusp - vzorek KB resuspendovaný v miliQ vodě přes noc. 1m/3m- délka inkubace vzorku (1 či 3 měsíce). Na konci názvu každého vzorku je uvedena koizolovaná izolační kontrola, jejichž složení je v grafu napravo. Převzato z Černá et al. 2022 – zvětšené.

Příloha 4. Mikrobiální taxony detekované v kompaktovaných vzorcích s práškovým železem a kontrolních vzorcích bez práškového železa. Upraveno dle Černá et al. (2022) – zvětšené.

Příloha 5. Mikrobiální složení (vlevo) a relativní početnost (vpravo) bakterií detekovaných v suspenzích BCV o různých poměrech pevné fáze inkubovaných 48 a 84 dnů. Převzato z Černá et al. (2022) – zvětšené.

Seznam použitých zkratek

AA	anaerobní acetogeny
AAS	atomová absorpční spektroskopie
AVG	průměr
± L	interval spolehlivosti Studentova rozdělení na hladině významnosti α = 0,05.
B75	Bentonit 75 - neaktivovaný bentonit Braňany-Černý vrch
backfill	zásypová bariéra
BaM	bentonit nabohacený montmorillonitem Braňany-Černý vrch
BCV	bentonit Černý vrch dodaný na SURAO v roce 2017
BS	bentonitová suspenze
buffer	těsnící bariéra
$c_{ox.}$	obsah oxidu nepřepočtený
$c_{ox.-c}$	obsah oxidu přepočtený na 0,00 hm. % ztráty žíháním
CC	chemické složení bentonitu
CEC	kationtová výměnná kapacita
CEC-$BaCl_2$	kationtová výměnná kapacita stanovená výměnou za Ba^{2+}
CEC-Cs	kationtová výměnná kapacita stanovená výměnou za Cs^{+}
CEC-Cu	kationtová výměnná kapacita pomocí Cu(II)triethylentetraminu
CEC-NH4	kationtová výměnná kapacita stanovená výměnou na NH_4^{+}
CEC_sum	suma vyměnitelných kationtů
Cq	kvantifikační cyklus qPCR
CT	výpočetní tomografie
CT	Clay Technology, Švédsko
Ctot	celkový obsah uhlíku
ČVUT	České vysoké učení technické v Praze
dPCR	digital PCR
DIF	difúzní experimenty
DNA	deoxyribonukleová kyselina (deoxyribonucleic acid)
DÚ	dílčí úkol
DW	destilovaná voda
FeOB	bakterie oxidující železo (Fe-oxidizing bacteria)
FTIR	infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací
GE	Zelený jíl z ložiska Skalná
GTS	Grimsel Test Site
HEC	měrná tepelná kapacita
hm. %	hmotnostní %
HÚ	hlubinné úložiště
ICP-AES	atomová emisní spektrometrie s indukčně vázaným plazmatem
ICP-MS	hmotnostní spektrometrie s indukčně vázaným plazmatem
IRB	bakterie redukující železo (iron-reducing bacteria)
KB	kompaktovaný bentonit
LOI	ztráta žíháním
LPC	nízkoalkalický beton, *low pH concrete*
LUH	stanovení vyluhovatelných iontů
MB	mikrobiologie/mikrobiologický
MEDIAN	medián
miliQ voda	ultra čistá voda
MMT	montmorillonit

MÖSS	Mössbauerova spektroskopie
MNČ	Metoda nejmenších čtverců
MPN	most probable number – kultivační metoda
n	počet měření
N.A.	neanalyzováno
N.D.	nedetekováno
NGS	sekvenování nové generace (next generation sequencing)
N.Q.	nekvantifikováno
NRB	bakterie redukující dusičnany (nitrate-reducing bacteria)
NS	neovlivněný stav bentonitu
OPC	Portlandský cement, *ordinary Portland cement*
OS	ovlivněný stav bentonitu
PGM	Postgate medium – kultivační médium pro kultivaci SRB
PM	polarizační mikroskopie
PROP	nasycená hydraulická vodivost
PXRD	prášková rentgenová difrakce
qPCR	kvantitativní polymerázová řetězová reakce (quantitative polymerase chain reaction)
RAO	radioaktivní odpady
RC	pevnost v tlaku
rRNA	ribozomální RNA, součást malé podjednotky prokaryotického ribozomu
s	výběrová směrodatná odchylka
s^2	výběrový rozptyl
SE	směrodatná odchylka výběrového průměru (standard error)
SEM	skenovací elektronová mikroskopie
SGW	syntetická granitická voda
SI	swell index
SILA	silikátová analýza „na mokré cestě“
SKB	Svensk Kärnbränslehantering AB
SOB	bakterie oxidující síru (sulphur-oxidizing bacteria)
SOR	sorpční experiment
SpD	specifická hustota
SQE	vysokotlaká extrakce pórového roztoku
SRB	síran redukující bakterie
SSA_BET	vnější specifický povrch
SSA_EGME	celkový specifický povrch
St	Stránce, bentonit z ložiska Stránce
Stot	celkový obsah síry
SUM	suma
SURAO	Správa úložišť radioaktivního odpadu
SWEP	bobtnací tlak
RMN	Rokle mletá neaktivovaná, průmyslový produkt Keramost a.s.
TA	termická analýza
TAČR	Technologická agentura České republiky
THC	tepelná vodivost
TUL	Technická Univerzita v Liberci
TUT	Laboratory of Engineering Geology. Tampere University of Technology
ÚJV	Ústav jaderného výzkumu Řež, a.s.

UOS	ukládací obalový soubor
WL	mez tekutosti
WP	mez plasticity
WRC	retenční křivky
x1	minimum
xn	maximum
XRD	rentgenová difrakce
XRF	rentgenová fluorescence
YCW	mladá cementová voda

Vysvětlení pojmů

Neovlivněný stav bentonitu

Bentonit reprezentativní pro dané ložisko dodávaný zpracovatelem (těžební společností).

Ovlivněný stav bentonitu

Bentonit ovlivněný během laboratorního (resp. in-situ) experimentu. Obvykle se jedná o bentonit ovlivněný teplotou, tlakem, složením sytícího media (vody), kontaktem s ocelovými prvky, nebo ovlivněný biologicky, případně kombinací výše uvedených parametrů.

Abstrakt

Tato zpráva navazuje na předchozí zprávu dílčího úkolu: „03 Analýza českých bentonitů – vyhodnocení dat“ zprávu TZ624/2022. Cílem zprávy je na zúženém výběru dat popsat vlastnosti českých bentonitů v neovlivněném i ovlivněném stavu. Součástí zprávy je vyhodnocení faktorů ovlivňujících stabilitu českých bentonitů v krátkodobém i dlouhodobém měřítku. Navrženy jsou postupy, pomocí kterých je možné chybějící data doplnit. Navrženy jsou práce (experimenty), pomocí kterých bude možné doplnit chybějící data a přispět k porozumění stability českých bentonitů, a tím i k posouzení vhodnosti jejich použití jako výplní v hlubinném úložišti.

Klíčová slova

Hlubinné úložiště, český bentonit, mineralogie, geochemie, geotechnika, mikrobiologie, statistické parametry, BCV

Abstract

This report follows on the previous report of the sub-task: "03 Analysis of Czech bentonites - data evaluation" report TZ624/2022. The aim of the report is to describe the properties of Czech bentonites in an unaffected and affected state based on a narrowed selection of data. The report includes an evaluation of factors influencing the stability of Czech bentonites in the short and long term. Procedures are proposed by which the missing data can be filled in. Procedures (experiments) are designed with respect to complete the missing data and to contribute to understand the stability of Czech bentonites and thus to assess the suitability of their use as fillings in a deep repository.

Keywords

Deep geological repository, Czech bentonite, mineralogy, geochemistry, geotechnics, microbiology, statistic parameters, BCV

1 Úvod

České bentonity jsou zkoumány v souvislosti s využitím v hlubinném úložišti (HÚ) od konce minulého století. Dílčí úkol 02: „*Shromáždění všech dat výzkumu na českých bentonitech a LPC betonu*“ projektu měl za cíl vytvoření souboru dat (databáze dat) charakterizujících české bentonity v neovlivněném (NS) i ovlivněném (OS) stavu. Shrnuta byla data z technických zpráv i odborných článků. Data pocházejí z různých časových období a byla měřena v různých laboratořích, popř. více či méně lišícími se postupy.

Cílem dílčího úkolu: „03 Analýza českých bentonitů – vyhodnocení dat“ bylo statisticky analyzovat data z předchozí etapy projektu a následně vyhodnotit faktory ovlivňující stabilitu českých bentonitů v krátkodobém i dlouhodobém měřítku. V případě, že data chybí, nebo jsou nedostatečná, mají být navrženy způsoby jejich doplnění.

S ohledem na heterogenitu dat byl úkol 03 rozdělen do dvou částí. V první části, a její výstupní zprávě TZ624/2022 (Šachlová et al. 2022) byla data zpracována statisticky. Zpráva TZ624/2022 sloužila jako podkladová (datová) zpráva pro další analýzu. V druhé zprávě (TZ632/2022) úkolu 03 jsou nejprve data filtrována dle materiálů a metod. Z bentonitů byly vybrány pouze ty, u kterých byla na počátku jejich zpracování provedena homogenizace v celém objemu (bentonity B75, BaM a BCV). Z důvodu zatěžování teplotou 95 °C, které u předchozích bentonitů provedeno nebylo, byl přidán bentonit Rokle kopaná. Metody byly vybrány s ohledem na: dostatek dat pro ovlivněný (OS) i neovlivněný stav (NS). Zároveň byl vybrán jeden typ analýzy pro danou analytickou metodu (např. kationtová výměnná kapacita pomocí Cu(II)triethylentetraminu, CEC-Cu).

1.1 Technické zadání úkolu

Technické zadání zakázky uvádí: *Pro účely tohoto úkolu budou využita data z rešeršního úkolu: Dílčí úkol: Shromáždění všech dat výzkumu na českých bentonitech a LPC betonu. Tato data budou analyzována, čímž vznikne zpráva s detailním popisem vlastností českých bentonitů jak v jejich počátečním stavu (neovlivněném), tak ovlivněném různými podmínkami relevantními pro prostředí hlubinného úložiště či jejich kombinací (teplota, chemismus prostředí, radioaktivita, mechanické namáhání).*

Analýza dat musí proběhnout i s jejich statistickým vyhodnocením. V případě, že nebude dostatek dat pro statistické vyhodnocení, tak to bude zapracováno do výstupu z dílčího úkolu: Dílčí úkol: Návrh experimentálních prací pro tento projekt na bentonitech, betonech a ostatních konstrukčních materiálech.

Součástí analýzy bude také zhodnocení stability českých bentonitů a tím i posouzení vhodnosti jejich použití jako výplní v hlubinném úložišti. V případě, že nebude dostatek dat pro toto zhodnocení, tak to bude zapracováno do výstupu z dílčího úkolu: Dílčí úkol: Návrh experimentálních prací pro tento projekt na bentonitech, betonech a ostatních konstrukčních materiálech. V této části práce musí být využity i relevantní výsledky z probíhajících experimentů SÚRAO či těch, kde je SÚRAO účastníkem, SÚRAO poskytne data.

Zvláštní pozornost zde bude zaměřena na mikrobiální aktivitu v bentonitu. Mikrobiální aktivita může hrát významnou roli při výběru vhodných materiálů výplně v HÚ. V současnosti je její vliv primárně řešen v souvislosti s ukládacím obalovým souborem, toto téma nebude nosným tématem tohoto úkolu. Zároveň je známo, že mikrobi mohou ovlivnit i samotný bentonit. Na toto

téma proběhly či stále probíhají výzkumné aktivity. Tyto práce byly primárně zaměřeny na výzkum ovlivnění bentonitu mikrobiální aktivitou v reálných podmínkách hlubinného úložiště. V rámci tohoto projektu bude výzkum zaměřen na zjištění maximální míry mikrobiálního ovlivnění českých bentonitů. Pro tento účel budou navrženy jednoduché procedury (např. zahřívání bentonitových suspenzí na ideální teplotu při dodávání ideálního množství živin), které toto zhodnocení umožní. Nejde o simulaci reálných podmínek v hlubinném úložišti, ale o zjištění maximální míry ovlivnění, stále je však nutné zachovat racionalitu při navrhování procedur. Výstupem této části úkolu bude jasné zhodnocení, jestli mikrobi mohou český bentonit ovlivnit tak, že by nebyl vhodný pro HÚ.

1.2 Struktura zprávy

Zpráva je členěna do následujících hlavních kapitol:

Charakterizace českých bentonitů v nezatíženém stavu (Kapitola 2)

Porovnání českých bentonitů v neovlivněném stavu s ovlivněným stavem (např. za působení tepla, v přítomnosti komponent UOS nebo cementových materiálů) a tím zhodnocení stability, a i vhodnosti jejich použití jako výplní v hlubinném úložišti (Kapitola 3).

Celkové zhodnocení a návrh experimentálních prací směřujících k doplnění dat (Kapitola 4).

1.3 Filtrování dat – kritéria

V rámci dílčího úkolu „*Shromáždění všech dat výzkumu na českých bentonitech a LPC betonu“* byla vytvořena databáze dat zaměřená na vlastnosti českých bentonitů (a montmorillonitických jílů) obsažených v technických zprávách a odborných článcích. Zahrnuty byly bentonity Bentonit 75 (B75), BaM a BCV komerčně produkované závodem Keramost, a.s. (závod Obrnice), bentonity pocházející z ložisek Rokle a Stránce a montmorillonitický jíl z ložiska Zelená-Skalná (Grün Erde ~ Zelený jíl, Franče 1992, Přikryl et al. 2003, 2004).

Při statistické analýze dat (zpráva TZ624/2022, Šachlová et al. 2022) byla zjištěna heterogenita dat, která částečně souvisí se způsobem odběru bentonitů a jejich dalším zpracováním:

- B75 – bentonit komerčně produkovaný, homogenizovaný, při zpracování částečně natrifikovaný (odhadnutý obsah natrifikačního činidla 0,517 – 0,812 hm. %, Vašíček et al. 2013).
- BaM – bentonit komerčně produkovaný, homogenizovaný, průmyslově nabohacený montmorillonitem (Červinka et al. 2018).
- BCV – bentonit komerčně produkovaný, homogenizovaný. Při mikroskopické analýze byly v bentonitu patrné až několik mm velké úlomky goethitu. S ohledem na vlastnosti goethitu (vyšší specifická hustota, specifické chování šupinkovitých úlomků) může docházet k nabohacení některých partií vzorku (Červinka et al. 2018).
- Rokle – dvě varianty bentonitu lišící se přípravou. První je tzv. „Rokle“ – tj. získaná přímo na ložisku a zpracovávaná sušením a mletím na CEG FSv ČVUT. Druhá varianta je „RMN“ (Rokle mletá neaktivovaná) - průmyslově zpracovaný produkt z Keramost a.s. Bentonit RMN byl také použit jako základní surovina pro experiment (materiál) Mock-Up CZ (85 % RMN, 10 % křemičitého písku, 5 % grafitu, Vašíček et al. 2016).
- Stránce – kopaný bentonit (Přikryl et al. 2003, 2004).
- Zelený jíl – kopaný montmorillonitický jíl (Přikryl et al. 2003, 2004).

U kopaných vzorků existuje obecně problém s velkými monominerálními úlomky (např. křemen, slídy). V případě, kdy není bentonit namlet a homogenizován v celém odebraném objemu, dochází k nabohacení některých partií odebraného vzorku (SURAO, osobní diskuze 2022-09-15). Z důvodu charakteru některých bentonitů zahrnuje tato zpráva pouze vzorky B75, BaM, BCV a Rokle kopaná (z důvodu zatěžování vzorku na 95 °C, které na jiných bentonitech chybí).

Heterogenita dat byla částečně způsobena i použitím různých analytických metod pro stejný parametr bentonitu. Použití některých analytických metod souviselo s obdobím, kdy byly analýzy prováděny, a v současnosti se od těchto metod již ustupuje. Typickým příkladem takových metod je stanovení semikvantitativního složení z PXRD z korundového čísla nebo přepočtem SILA a PXRD (CQPA). V současnosti upřednostňovaná je Rietveldova metoda.

Analytické metody tak byly filtrovány s ohledem na: aktuálnost použití metody; dostatek dat napříč českými bentonity v ovlivněném a neovlivněném stavu a citlivost metody na změny v bentonitu vzniklé v důsledku jeho zatěžování. Z geochemicko-mineralogických metod byly pro charakterizaci bentonitu v NS vybrány:

- chemické složení pevného vzorku (CC) stanovené silikátovou analýzou (SILA) a rentgenovou fluorescencí (XRF) přepočtené na 0,00 hm. % LOI;
- mineralogické složení stanovené práškovou rentgenovou difrakcí (PXRD) zahrnující stanovení semikvantitativního složení pomocí Rietveldovy metody;
- kationtová výměnná kapacita (CEC) stanovená metodou za použití Cu(II)triethylentetraminu;
- celkový specifický povrch stanovený pomocí adsorpce EGME (SSA_EGME);

Z geotechnických metod byly vybrány:

- swell index (SI) odečtený po 24 hodinách;
- mez tekutosti (WL) stanovená kuželovou metodou s dobou máčení 24 hodin;
- mez plasticity (WP);
- specifická hustota (SpecD);
- hydraulická vodivost (PROP);
- bobtnací tlak stanovený metodou konstantního objemu (SWEP_CVT);
- tepelná kapacita (HEC);
- tepelná vodivost (THC);
- pevnost v tlaku (RC).

Jako málo reprezentativní nebo málo citlivé považujeme metody měření bobtnacího tlaku metodou konstantního zatížení (SWEP_CLT, metoda není reprezentativní a porovnatelná s používanější metodou SWEP_CVT a není k dispozici dostatek dat), mez tekutosti stanovenou Casagrandeho metodou (WL_Cas, metoda je méně přesná a pro bentonity neposkytuje totožné výsledky jako používanější kuželová metoda) a vnější specifický povrch stanovený metodou BET (SSA_BET, nelze pomocí ní charakterizovat celkový specifický povrch). Tyto metody byly vynechány.

U OS bentonitu byly vyloučeny parametry, které nepřinášejí zásadní informace ve vztahu ke změnám bentonitu v důsledku jeho zatížení: měrná tepelná kapacita (HEC), tepelná vodivost (THC), specifická hustota (SpD), pevnost v tlaku (RC) a mez plasticity (WP).

Z mikrobiologického hlediska byl použit podobný přístup hodnocení dat, jako v datové zprávě TZ 624/2022 (Šachlová et al. 2022), data však byla nově filtrována a uspořádána tak, aby byl shrnut aktuální stav poznání u jednotlivých parametrů diskutovaných v kapitole 3. Nebyla provedena redukce analyzovaných metod, neboť mikrobiologická aktivita je vždy vyhodnocována komplexně napříč výsledky různých analýz a jejich omezení by vedlo pouze ke snížení dostupných informací.

Ve všech podkapitolách kap. 3 s výjimkou podkapitoly 3.9 se vyhodnocení mikrobiologických parametrů netýká přímo stability bentonitu, ale je zde vyhodnocován obecný rozvoj mikrobiální aktivity za studovaných typů podmínek. To může ukázat, jaké podmínky jsou pro rozvoj MB aktivity vhodné, a tak představují riziko též z hlediska případné mikrobiologické degradace bentonitu. O vlivu mikroorganismů na stabilitu bentonitu je toho v českých podmínkách zatím známo velice málo a dosavadní poznatky jsou shrnuty v kap 3.9.

2 Charakterizace českých bentonitů v nezatíženém stavu

Charakterizace českých bentonitů vychází ze základních geochemických, mineralogických, geotechnických a mikrobiologických parametrů měřených v uplynulých 20 letech. Pro srovnání jsou uvedena kritéria z POSIVA-SKB (2017) . Parametry českých bentonitů jsou porovnány se zahraničními referenčními bentonity (MX-80, FEBEX).

2.1 Chemické složení

Chemické složení bylo charakterizováno na základě silikátové analýzy (SILA, např. ČGS 2021) a na základě analýzy metodou rentgenové fluorescence (XRF, např. Backhoff et al. 2006). Data byla sjednocena přepočtem na 0,00 hm. % ztráty žíháním (LOI, ČSN EN 15935: 2013).

Specifikem chemického složení českých bentonitů v porovnání se zahraničními je vysoký obsah Fe_2O_3, FeO, CaO a Ctot (Tab. 1). Vysoký obsah Fe_2O_3 dokumentoval Přikryl et al. (2004) i ve frakci < 2 μm, kde při přepočtu na 0,00 hm. % LOI tvořil obsah Fe_2O_3 15,93 hm. %. Nabohacení frakce < 2 μm Fe_2O_3 ukazuje na možnou vazbu Fe^{3+} na smektit, nikoliv na Fe-oxihydroxidy (Přikryl et al. 2004). Posiva-SKB (2017) uvádí mezi hlavními požadavky na těsnící a zásypovou bariéru celkový obsah síry včetně sulfidické síry (Stot < 1 hm. %) a celkový obsah organického uhlíku (TOC < 1 hm. %). U českých bentonitů data pro TOC chybí. Stot byl stanoven pouze u BCV_NS (0,02 ± 0,02).

Tab. 1 Porovnání CC českých bentonitů v NS. Data v hm. %, přepočtena na 0,00 hm. % LOI. [1]Karnland et al. (2006), [2]ENRESA (2000).

	B75_NS	± *L*	BaM_NS	± *L*	Rokle_NS	± *L*	BCV_NS	± *L*	MX-80[1]	FEBEX[2]
Al_2O_3	17,28	1,92	17,70	25,22	14,08	1,27	18,47	3,19	21,44	20,20
CaO	3,21	2,65	2,84	6,61	5,41	0,78	3,03	0,83	1,51	2,02
CO_2	2,53	2,92	na		2,53	2,44	2,45	0,89	na	na
Fe_2O_3	10,39	2,79	12,19	12,71	13,92	1,23	13,21	1,03	4,17	3,48
FeO	2,34	1,45	3,43	22,17	0,32	0,27	0,15		na	na
K_2O	1,35	0,22	2,02	13,34	0,94	0,11	1,02	0,39	0,58	1,12
MgO	2,56	1,08	3,19	2,80	2,90	0,16	3,05	0,31	2,67	4,71
MnO	0,10	0,09	0,12	0,13	0,14	0,06	0,23		na	na
Na_2O	1,22	0,64	0,32	1,40	0,34	0,13	0,35	0,08	2,32	1,46
SiO_2	56,21	4,22	54,77	10,48	50,58	3,00	54,31	2,42	66,40	65,88
TiO_2	3,45	1,23	2,16	14,99	4,40	0,37	3,24	0,72	0,23	0,22
SO_3	na		na		0,02	0,01	0,29	0,36	na	na
Ctot	na		na		2,87	2,36	0,47	0,33	0,35	0,67
Stot	na		na		0,02	0,02	0,01	0,13	0,35	0,22

2.2 Mineralogické složení

Mineralogické složení bylo charakterizováno na základě práškové rentgenové difrakce. Semikvantitativní složení vychází z vyhodnocení Rietveldovo metodou (Moore a Reynolds 1997). Pro bentonity B75_NS, BaM_NS a Rokle_NS je k dispozici pouze jedna analýza splňující výše uvedená kritéria. Pro bentonit BCV_NS je k dispozici 5 analýz. Zahrnutí amorfního podílu

v některých analýzách BCV_NS indikuje možnou souvislost s nižším obsahem smektitu (58,3-66,4 hm. % smektitu) v porovnání s analýzami, kde amorfní podíl zahrnutý nebyl (69,7-72,0 hm. % smektitu). Tato hypotéza vychází pouze z pěti údajů pro BCV_NS a nebylo možné ji ověřit u jiných typů bentonitu, kde stanovení amorfního podílu chybí. Výše uvedené faktory v kombinaci s možnou heterogenitou bentonitu způsobují velmi široké intervaly spolehlivosti v některých případech převyšující hodnotu obsahu minerálu. Jejich použití je tak velmi omezené.

Krystalochemický vzorec smektitu stanovil pro bentonity z ložisek Rokle a Černý vrch Šindelář (1982). Analyzovány byly těžené vzorky, které svými parametry nemusí plně odpovídat bentonitům Rokle a BCV zpracovaným v této zprávě. Ze vzorců je ale patrný jak výrazný podíl Fe^{3+} v oktaedrické pozici tak podíl Na^{+}, K^{+}, Ca^{2+} a Mg^{2+} v pozici vyměnitelných kationtů. Rozdíly mezi smektity analyzovanými Šindelářem (1982) jsou minimální (Tab. 2).

*Tab. 2 Krystalochemický vzorec smektitu z bentonitu z ložisek Rokle a Černý vrch (Šindelář 1982). * těžené vzorky, které svými parametry nemusí plně odpovídat bentonitům Rokle a BCV zpracovaným v této zprávě.*

Rokle*	$Na_{0.01}K_{0.08}Ca_{0.08}Mg_{0.11}(Al_{1.24}Fe^{3+}_{0.45}Fe^{2+}_{0.01}Mg_{0.01})\ [(Si_{3.84}Al_{0.16})O_{10}(OH)_2]\cdot nH2O$
Černý vrch*	$Na_{0.01}K_{0.02}Ca_{0.07}Mg_{0.16}(Al_{1.23}Fe^{3+}_{0.47}Fe^{2+}_{0.01}Mg_{0.30})\ [(Si_{3.81}Al_{0.19})O_{10}(OH)_2]\cdot nH2O$

V porovnání se zahraničními bentonity obsahují české bentonity nižší podíl smektitu a jsou nabohaceny o illit, kaolinit a goethit (Tab. 3).

Tab. 3 Porovnání mineralogického složení českých bentonitů v NS. Data v hm. %. [1] Vokál et al. (2010), [2] Červinka a Gondolli (2015), [3] Šachlová et al. (2022), [4] Karnland et al. (2006). [5] Fernández et al. (2000), AVG – průměr, f. – fáze, L – interval spolehlivosti, n.d. – nedetekováno, n.a. – neanalyzováno.

Minerál	B75_NS [1]	BaM_NS [2]	BCV_NS [3]		Rokle_NS [4]	MX-80 [4]		FEBEX [5]	
			AVG	*± L*		*AVG*	*± L*	*AVG*	*± L*
Smektit	75,5	88,0	65,7	6,9	69,4	83,5	2,4	92,0	3,0
Illit	3,9	0,0	2,3	2,2	5,4	0,7	0,1	n.d.	
Kaolinit	3,1	n.d.	6,6	4,4	3,1	n.a.		n.d.	
Křemen	10,0	5,0	8,4	3,9	3,0	2,8	0,8	2,0	1,0
Kalcit	3,0	0,0	1,2	1,0	5,0	0,2	0,3	0,6	0,1
Siderit	2,0	3,0	0,5	0,6	n.d.	n.d.		n.d.	
Goethit	n.d.		4,6	4,0	2,0	0,2	0,4	n.d.	
Sádrovec	n.d.	n.d.	n.d.		1,0	0,9	0,4	0,14	0,01
Muskovit	n.d.	n.d.	n.d.		3,0	2,8	1,3	n.d.	
Plagioklas	n.d.	n.d.	n.d.		n.d.	2,9	1,3	2,0	1,0
Ostatní	4,0	4,0	5,9		1,0	6,0		2,62	
Amorfní f.	n.a.	n.a.	7,8	3,3	n.a.	n.a.		0,038	0,005

2.3 Kationtová výměnná kapacita

Kationtová výměnná kapacita (CEC) vychází ze stanovení za použití Cu(II)triethylentetraminu (CEC-Cu, např. Dohrmann et al. 2012). Stanovení CEC-Cu bylo vybráno s ohledem na četnost použití. Ostatní metody stanovení CEC výměnou za Ba^{2+}, Cs^{+} a NH_4^{+} byly z charakterizace

bentonitů vyloučeny z důvodu možného podhodnocení/nadhodnocení CEC v porovnání s CEC-Cu (Šachlová et al. 2022). U bentonitu B75_NS vedlo omezení typu stanovení CEC ke zpřesnění intervalu spolehlivosti a k mírnému snížení průměrné hodnoty CEC (Tab. 4, průměrná hodnota CEC vycházející ze 6 metod stanovení = 60,37 ± 7,95, Šachlová et al. 2022).

Problematická zůstává hodnota CEC u bentonitu Rokle_NS. Průměrná hodnota CEC (59,63 ± 6,73 mekv/100 g, Šachlová et al. 2022) vycházející ze stanovení pomocí 4 různých metod má užší interval spolehlivosti než průměrná hodnota CEC vycházející pouze ze stanovení CEC-Cu (59,67 ± 55,49 mekv/100 g, Tab. 4). Důvodem je výrazné snížení počtu měření i heterogenita materiálu.

V porovnání se zahraničními bentonity vykazují české bentonity nižší hodnoty CEC i CEC_sum. V pozici vyměnitelných kationtů u českých bentonitů téměř chybí Na^+ a převládá Ca^{2+} a Mg^{2+}. Výjimkou je bentonit B75_NS, který byl částečně průmyslově aktivován, což se projevuje na zvýšeném podílu Na^+. Analýzy Fe^{x+} v pozici vyměnitelného kationtu u většiny bentonitů chybí. Fe^{x+} bylo analyzováno pouze v jednom případě BCV_NS a mělo nulovou hodnotu.

Tab. 4 CEC, CEC_sum a zastoupení vyměnitelných kationtů v NS bentonitu. AVG – průměr, CEC-$BaCl_2$ – kationtová výměnná kapacita stanovená výměnou za Ba^{2+}, CEC-Cs – kationtová výměnná kapacita stanovená výměnou za Cs^+, CEC-Cu – Kationtová výměnná kapacita pomocí Cu(II)triethylentetraminu, CEC-NH_4 – kationtová výměnná kapacita stanovená výměnou na NH_4^+, CEC_sum – suma vyměnitelných kationtů, L – interval spolehlivosti, n – počet analýz, n.s. – nespecifikováno, [1]Šachlová et al. (2022), [2]Muurinen a Carlsson (2013), [3]Fernández a Villar (2010), Dohrmann et al. (2012).

Název bentonitu	CEC (mekv/100 g)			Četnost použití dle typu metody	CEC_sum (mekv/100 g)		
	n	AVG	± L		n	AVG	± L
B75_NS	6 3	60,37[1] 56,23	7,95[1] 1,24	CEC-Cu > CEC-NH_4 = CEC-Cs [1] CEC-Cu	3	62,90	15,03
BaM_NS	3	62,50	4,18	CEC-Cu	3	71,83	7,67
BCV_NS	9	60,92	1,82	CEC-Cu	8	65,33	3,20
Rokle_NS	16 3	59,63 59,67	6,73 55,49	CEC-Cs > CEC-NH_4 > CEC-Cu >> CEC-$BaCl_2$ CEC-Cu	4	66,80	21,89
MX-80		88[2]		n.s.		105[4]	
FEBEX[2]		102	4	CEC-Cu		95,8	0,2

Název bentonitu		Na^+		Ca^{2+}		K^+		Mg^{2+}		Fe^{x+}	
	n	AVG	± L	AVG	± L	AVG	± L	AVG	± L	AVG	± L
B75_NS	3	56,16	10,46	5,76	19,52	5,45	3,01	32,72	27,34	n.a.	
BaM_NS	3	7,37	2,36	23,77	4,62	6,33	4,49	62,24	8,03	n.a.	
BCV_NS	8	10,29	3,20	24,33	5,79	2,22	1,39	63,03	6,11	0,00	
Rokle_NS	4	1,08	0,50	74,50	7,58	2,56	2,11	21,74	4,80	n.a.	
MX-80[2]		69		22		2		7		n.a.	
FEBEX[3]		28,2		36,5		2,71		32,4		n.a.	

2.4 Specifický povrch

Specifický povrch bentonitů byl charakterizován z dat získaných metodou sorpce polární kapaliny (ethylen glykol monoethyl ether, EGME, Carter et al. 1986) – dále označované jako SSA_EGME. České bentonity mají v porovnání s MX-80 výrazně nižší SSA (Tab. 5). Menší rozdíl je patrný v porovnání s bentonitem FEBEX. Obecný problémem metody SSA_EGME je vysoká odchylka měření a minimální (nedostatečný) počet dat způsobující velmi široký interval spolehlivosti (Tab. 5).

Tab. 5 SSA_EGME. AVG – průměr, L – interval spolehlivosti, [1]Brázda a Červinka (2016), [2]Clay Minerals Society, [3]Fernández et al. (2004).

Název bentonitu	SSA_EGME (m^2/g)		
	n	AVG	± L
B75_NS	2	469	203
BaM_NS	1	516	
BCV_NS	4	485	125
Rokle_NS		na	
MX-80[2]		635	19
FEBEX[3]		544	4

2.5 Hydraulická vodivost

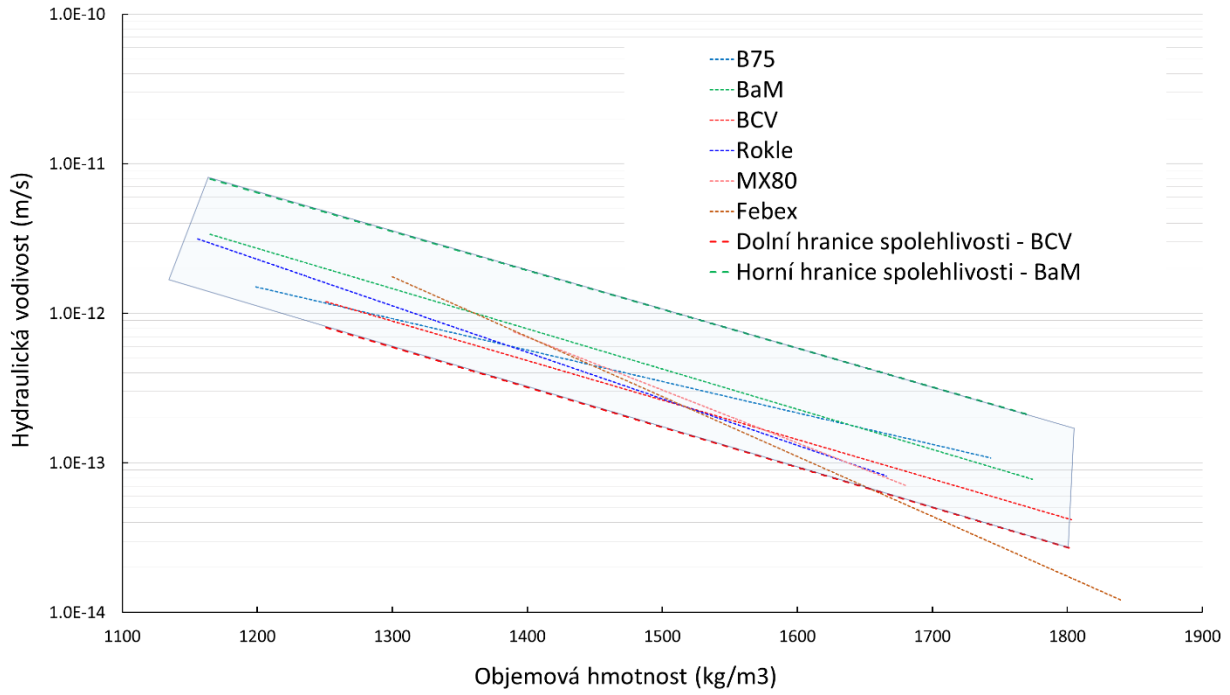
Data pro vyhodnocení hydraulické vodivosti pochází výhradně z měření metodou konstantního objemu. Metoda je podrobně popsána v metodice zaměřené na zkoušení bentonitu (Vašíček et al. 2022), která byla výstupem dílčího úkolu 1. Do vyhodnocení byly zahrnuty pouze výsledky získané z měření, při kterém byla použita jako saturační medium destilovaná voda. Vyhodnocení rozsahu hydraulické vodivosti českých bentonitů je na Obr. 1. Hydraulická vodivost jednotlivých bentonitů je v grafu vyjádřena z důvodu přehlednosti pouze regresními křivkami. Jako bentonit s nejnepříznivějšími hydraulickými vlastnostmi byl vyhodnocen bentonit BaM a z něj také vychází horní hranice spolehlivosti českých bentonitů (Šachlová et al. 2022). Jako nejpříznivější varianta byl na základě polohy regresní křivky vyhodnocen bentonit BCV a z něj vychází vyhodnocení spodní hranice spolehlivosti hodnot jakých může český bentonit s 95 % spolehlivostí nabývat. Horní i spodní hranice spolehlivosti vychází z intervalu spolehlivosti pro Studentovo rozdělení na hladině významnosti 5 %. Pro horní hranici spolehlivosti platí následující regresní rovnice ($y = 9E-09e^{-0{,}006x}$ (1):

$$y = 9E-09e^{-0{,}006x} \quad (1)$$

Pro dolní hranici, která vychází z dolní hranice spolehlivosti bentonitu BCV platí rovnice v následujícím tvaru ($y = 2E-09e^{-0{,}006x}$ (2):

$$y = 2E-09e^{-0{,}006x} \quad (2)$$

Podrobně je metoda určení intervalu spolehlivosti dvourozměrných dat popsána v datové zprávě dílčího úkolu 3 (Šachlová et al. 2022).



Obr. 1 Porovnání hydraulické vodivosti českých bentonitů ve formátu regresních křivek a určení horní hranice spolehlivosti odvozené z horní hranice spolehlivosti hydraulické vodivosti bentonitu BaM a dolní hranice spolehlivosti odvozené z dolní hranice spolehlivosti bentonitu BCV.

2.6 Bobtnací tlak

Data pro vyhodnocení bobtnacího tlaku pochází výhradně z měření metodou konstantního objemu. Metoda je podrobně popsána v metodice zaměřené na zkoušení bentonitu (Vašíček et al. 2022), která je výstupem z dílčího úkolu 1. Do vyhodnocení nebyla zahrnuta data získána pomocí metody konstantního zatížení.

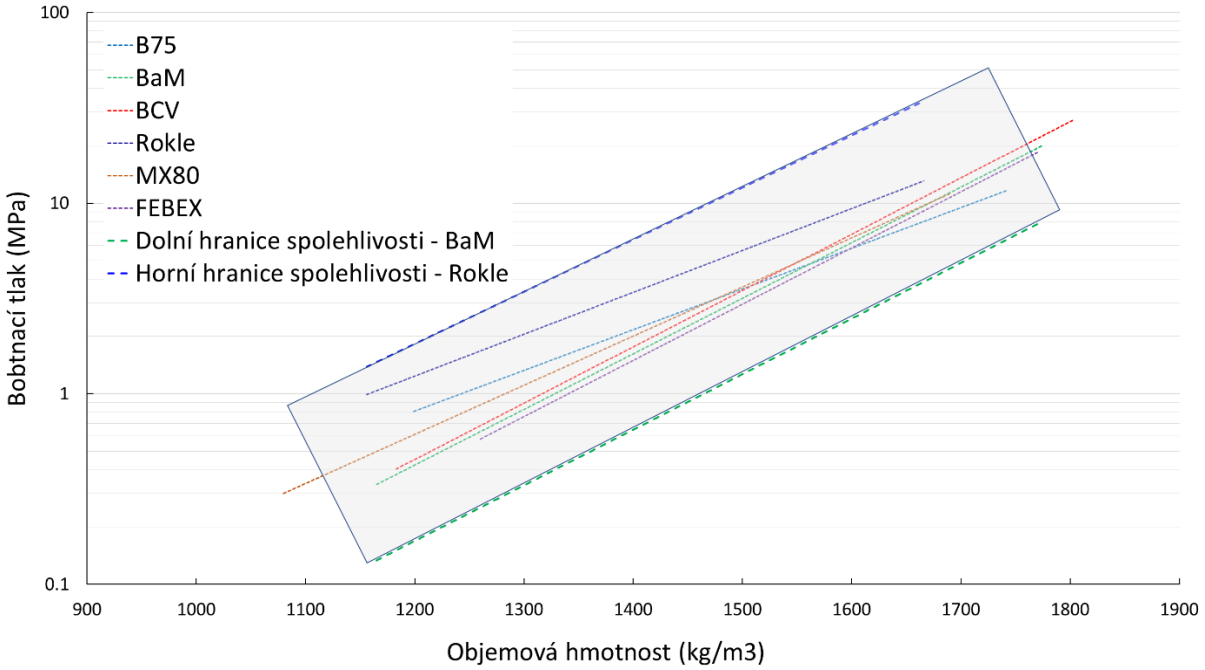
Bobtnací tlak jednotlivých bentonitů je v grafu vyjádřen z důvodu přehlednosti pouze regresními křivkami (Obr. 2). Jako nejnepříznivější typ bentonitu byl na základě polohy regresní křivky vyhodnocen BaM (Šachlová et al. 2022) a z něj také vychází dolní hranice spolehlivosti bobtnacího tlaku českých bentonitů. V grafu nejvýše je položena regresní křivka bentonitu Rokle a z ní vychází vyhodnocení horní hranice spolehlivosti hodnot jakých může český bentonit s 5 % nabývat. Zde je nutno brát ohled na fakt, že bentonit Rokle v neovlivněném stavu má velmi široký rozptyl měřených hodnot a regresní křivka a potažmo horní hranice spolehlivosti jsou určeny právě z těchto hodnot. Horní hranice spolehlivosti tedy může být nadhodnocena. Horní i spodní hranice spolehlivosti vychází z intervalu spolehlivosti pro Studentovo rozdělení na hladině významnosti 5 %. Pro horní hranici spolehlivosti platí následující regresní rovnice $y = 0{,}001e^{0{,}0063x}$ (3):

$$y = 0{,}001e^{0{,}0063x} \quad (3)$$

Pro dolní hranici, která vychází z dolní hranice spolehlivosti bentonitu BaM platí rovnice v následujícím tvaru $y = 5E - 05e^{-0{,}0067x}$ (4):

$$y = 5E - 05e^{-0{,}0067x} \quad (4)$$

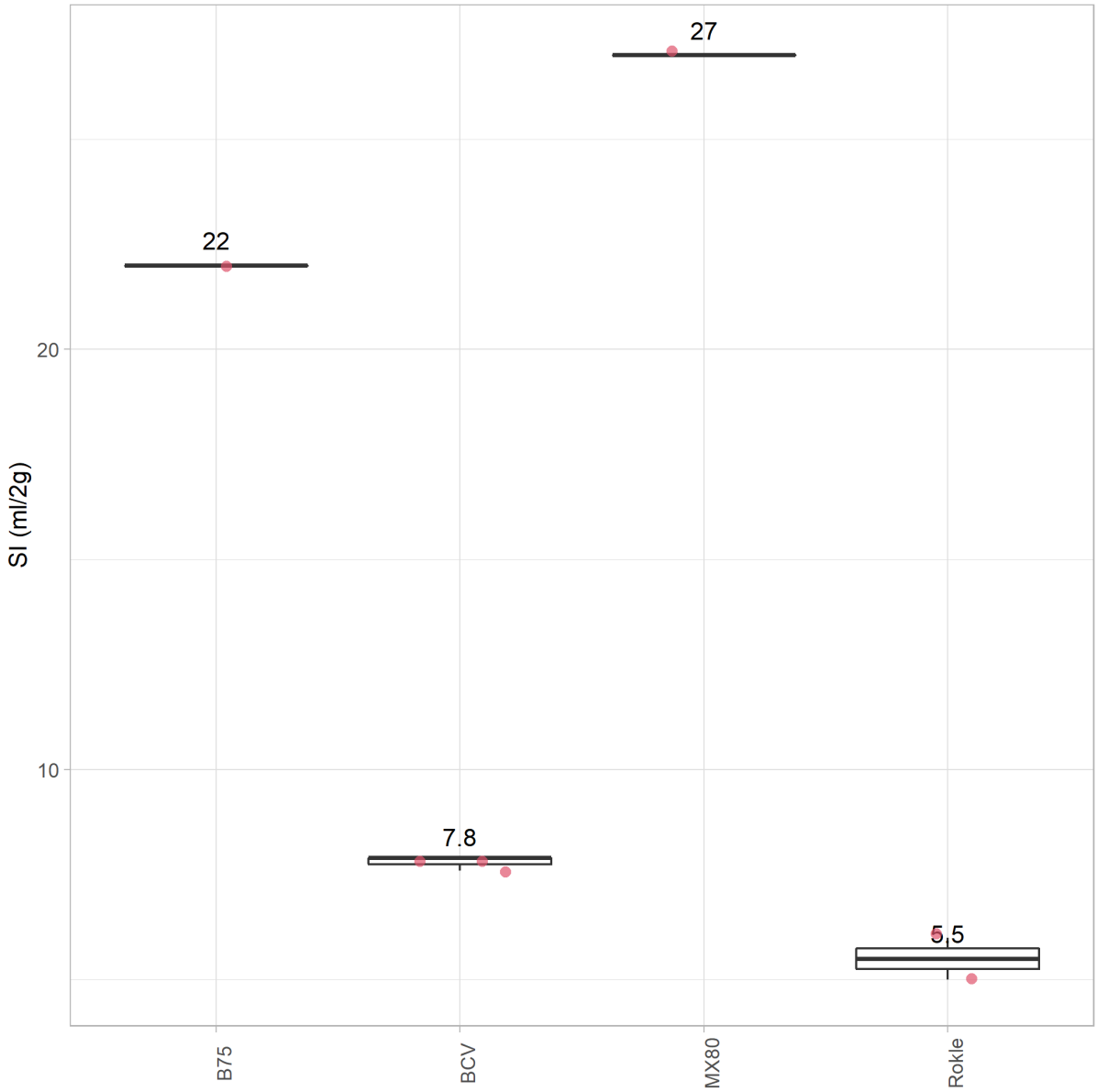
Podrobně je metoda určení intervalu spolehlivosti dvourozměrných dat popsána v datové zprávě dílčího úkolu 3 (Šachlová et al. 2022).



Obr. 2 Porovnání bobtnacího tlaku českých a vybraných zahraničních bentonitů v podobě regresních křivek a určení horní hranice spolehlivosti odvozené z horní hranice spolehlivosti bobtnacího tlaku bentonitu Rokle a dolní hranice spolehlivosti odvozené z dolní hranice spolehlivosti bentonitu BaM.

2.7 Swell index

Do vyhodnocení swell indexu byla zahrnuta data pocházející ze zkoušek, které proběhly v souladu s metodikou zaměřenou na zkoušení bentonitu (Vašíček et al. 2022), která byla výstupem dílčího úkolu 1. Swell index byl statisticky vyhodnocen pouze z hodnot získaných z intervalu odečtu 24 hod a ze zkoušek, při nichž byla použita navážka 2 g (Tab. 6). Data získaná z odlišných navážek a dob odečtu nejsou zahrnuta, mj. z důvodu vývoje swell indexu s dobou vystavení saturačnímu mediu (Birgersson et al. 2009). Grafické porovnání swell indexu českých bentonitů je zobrazeno na Obr. 3. Vysoká hodnota swell indexu bentonitu B75 je dána mírnou natrifikací během zpracování suroviny. Červené body v grafu na Obr. 3 ukazují konkrétní výsledky a souhrnně tedy i počet měření a hodnota uvedena u každého z box plotů je průměrná hodnota z měření.



Obr. 3 Swell index českých bentonitů a vybraných zahraničních v neovlivněném stavu. Červené body značí výsledky měření a hodnota uvedená u každého boxplotu vyjadřuje průměrnou hodnotu.

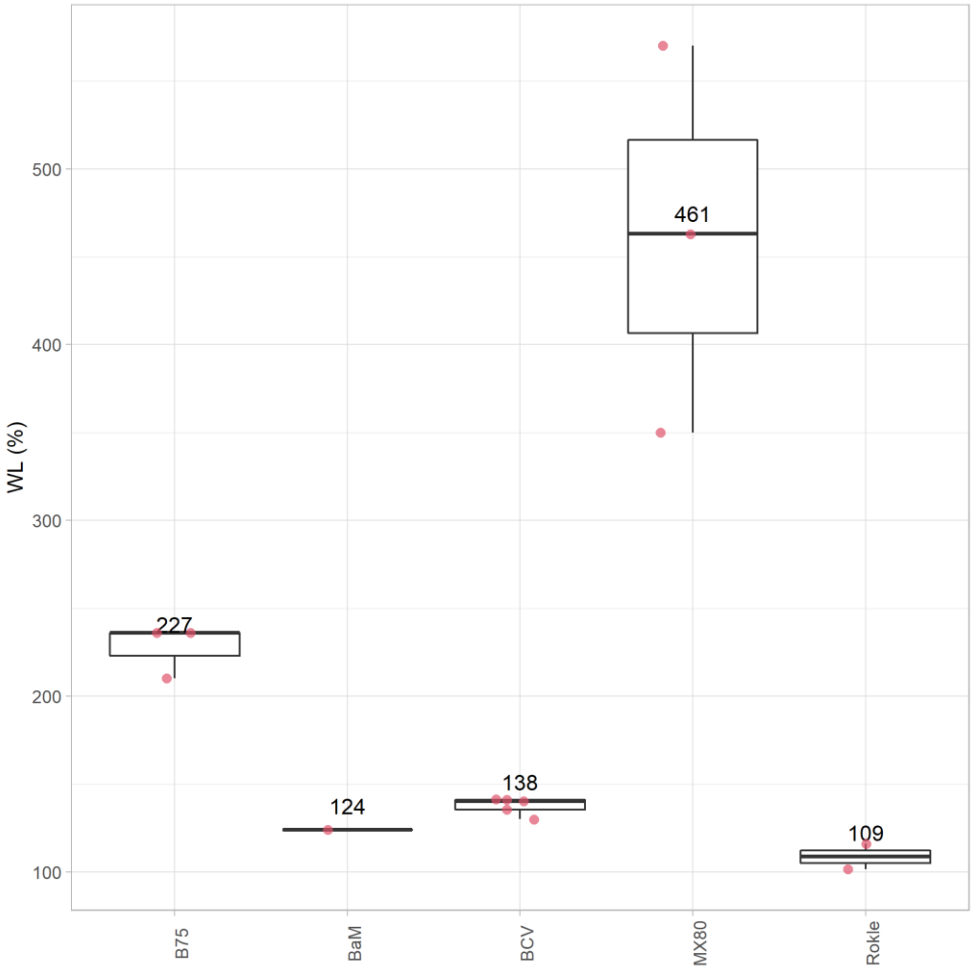
Tab. 6 Interval spolehlivosti swell indexu českých bentonitů. n – počet prvků, AVG – průměr, L – interval spolehlivosti.

Název bentonitu	Swell index (ml/2 g)		
	n	AVG	± L
B75	1	22,0	-
BaM	0	-	-
BCV	3	7,8	0,2
Rokle	2	5,5	4,5

2.8 Mez tekutosti

Mez tekutosti byla vyhodnocena výhradně z dat získaných pomocí zkoušky kuželovou metodou. Data pocházející ze zkoušky Cassagrandeho miskou nebyla z důvodu menší přesnosti a obtížné

vzájemné porovnatelnosti metod použita (Vašíček et. al. 2022). Vyhodnocení meze tekutosti bylo provedeno z dat, která byla získána ze zkoušek, při kterých byla jako saturační medium použita destilovaná voda a doba máčení před zkouškou 24 hodin. Grafické porovnání meze tekutosti českých bentonitů a porovnání s MX80 je zobrazeno na Obr. 4.



Obr. 4 Mez tekutosti českých bentonitů a vybraných zahraničních v neovlivněném stavu.

Vysoká hodnota meze tekutosti bentonitu B75 koreluje s vysokou hodnotou swell indexu a je způsobena mírnou natrifikací bentonitu vlivem předchozího výrobního procesu. Červené body v grafu na Obr. 4 vyjadřují konkrétní výsledky a souhrnně i počet měření. Hodnota uvedena u každého z box plotů je průměrná hodnota z měření. Základní statistické charakteristiky spolu s intervalem spolehlivosti jsou v Tab. 7.

Tab. 7 Interval spolehlivosti meze tekutosti českých bentonitů. n – počet prvků, AVG – průměr, L – interval spolehlivosti.

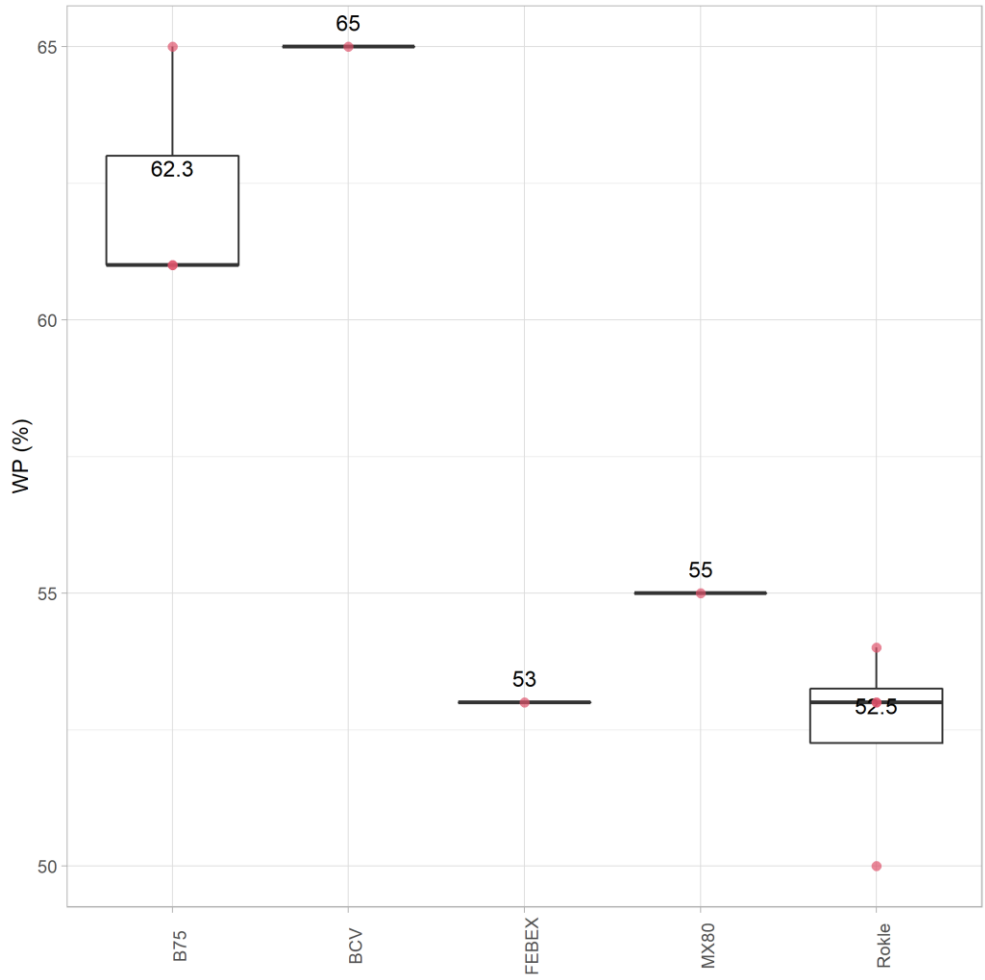
Název bentonitu	Mez tekutosti (%)		
	n	AVG	± L
B75	3	227,40	21,40
BaM	1	124,00	-
BCV	5	137,60	2,69
Rokle	2	108,75	10,04

2.9 Mez plasticity

Pro mez plasticity byly uvažovány pouze výsledky získané ze zkoušek, které byly prováděny po 24 hodinách máčení (Tab. 8). Červené body v grafu na Obr. 5 vyjadřují konkrétní výsledky a souhrnně tedy i počet měření. Hodnota uvedena u každého z box plotů je průměrná hodnota. Velký rozptyl měření je způsoben zejména vlivem nepřesnosti stanovení, která je dána již z podstaty metody, kde hraje významnou roli lidský faktor. Z tohoto důvodu je vhodné provést zkoušky v triplikátu.

Tab. 8 Interval spolehlivosti meze tekutosti českých bentonitů. n – počet prvků, AVG – průměr, L – interval spolehlivosti.

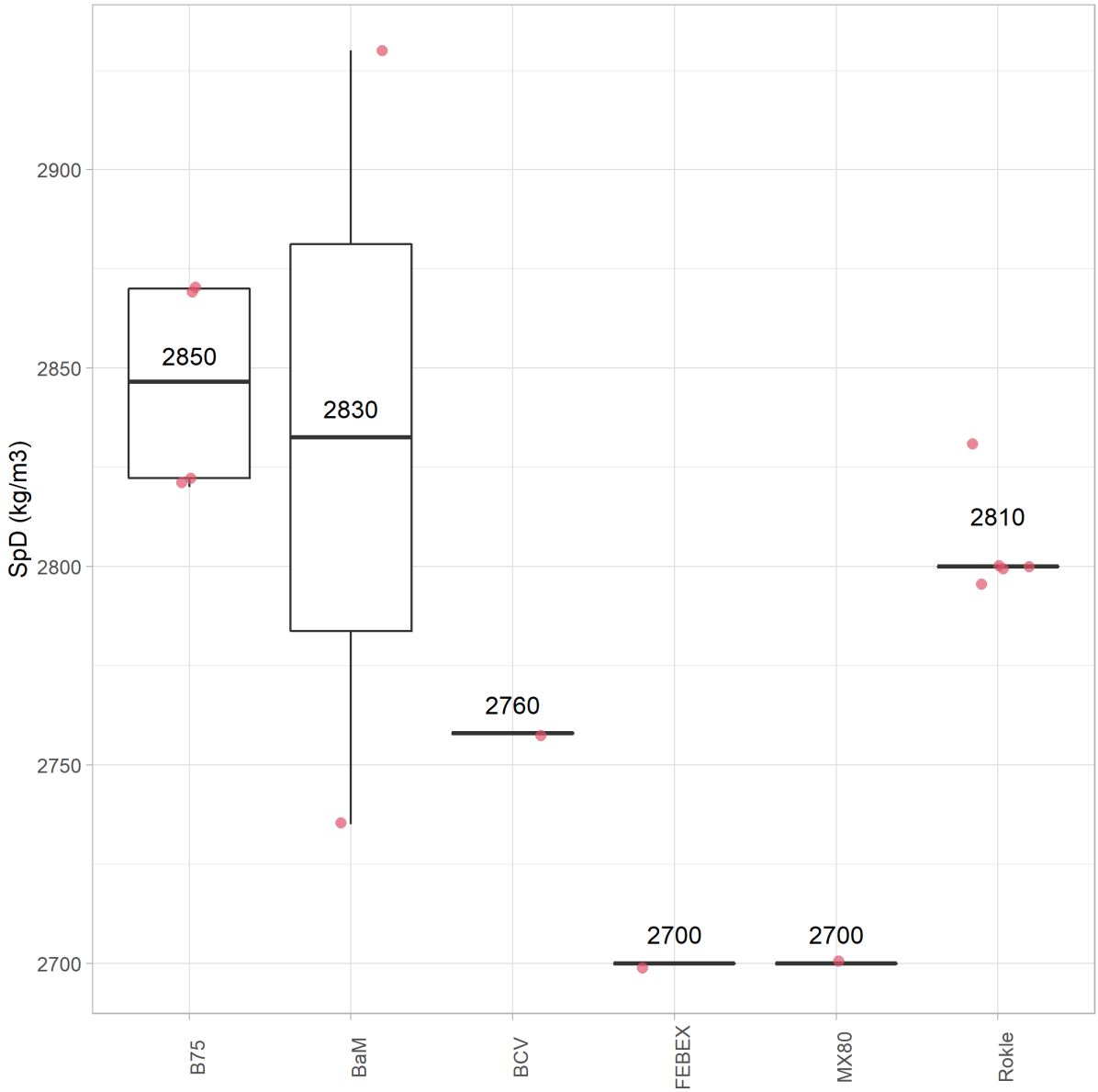
Název bentonitu	Mez plasticity (%)		
	n	AVG	± L
B75	3	62,33	3,30
BaM	0		
BCV	1	65,00	
Rokle	4	52,50	1,38



Obr. 5 Mez plasticity českých bentonitů a vybraných zahraničních v neovlivněném stavu.

2.10 Specifická hustota

Do vyhodnocení specifické hustoty pevných částic byly zahrnuty pouze hodnoty, které byly získány pyknometricky při použití destilované vody, nebo ethanolu, roztoky soli nebyly do vyhodnocení zahrnuty. Červené body v grafu na Obr. 6 vyjadřují počet měření a hodnota uvedena u každého z box plotů je průměrná hodnota z měření. Důvod velkého rozptylu měření na bentonitu BaM není znám (Tab. 9). Obě hodnoty byly získány v jedné laboratoři za použití totožné metody měření (Červinka et al. 2015, Červinka et al. 2018). V tabulce Tab. 9 jsou uvedeny základní statistické charakteristiky spolu s intervalem spolehlivosti. Za významným intervalem spolehlivosti bentonitu BaM stojí malý počet dat a jejich velký rozptyl. V ostatních případech není interval spolehlivosti významný a bentonity nevykazují významné odlišnosti v závislosti na typu.



Obr. 6 Porovnání specifické hustoty českých a vybraných zahraničních bentonitů.

Tab. 9 Interval spolehlivosti specifické hustoty částic českých bentonitů. n – počet prvků, AVG – průměr, L – interval spolehlivosti.

Název bentonitu	Specifická hustota (kg/m^3)		
	n	AVG	± L
B75	4	2846	22
BaM	2	2832	876
BCV	1	2758	
Rokle	5	2805	8

2.11 Pevnost v tlaku

Zkouška pevnosti v tlaku je prováděna na bentonitových prefabrikátech. Tento parametr vyjadřuje vlastnosti bentonitového výrobku, nikoli bentonitu samotného. Stanovení pevnosti v tlaku bentonitových prefabrikátů se věnovaly zejména projekty zaměřené na vliv saturačních medií (Pacovský et al. 2010), ve kterém byl zkoušen bentonit Rokle a projekt MPO TIP FR-TI/362, který byl zaměřen na testování bentonitu B75. Pevnost v tlaku bentonitových prefabrikátů je kromě mineralogického a chemického složení a fyzikálních vlastností (např. zrnitost) zdrojového bentonitu přímo závislá na objemové hmotnosti sušiny, vlhkosti vzorku, tvaru a rozměrech zkoušeného výrobku. Zkoušky byly prováděny také v závislosti na směru zatížení vzhledem ke směru lisování a rozdíl nabývá hodnot až 1,5 MPa, tento rozdíl však Vašíček et al. (2010) hodnotí vzhledem k rozptylu měření jako nevýznamný. Mírně vyšší pevnosti nabývají vzorky vyrobené z bentonitu B75 zatěžované kolmo na směr lisování než ve směru lisování. V případě bentonitu Rokle není zaznamenána žádná korelace mezi směrem zatížení a zvýšenou pevností v tlaku. Tab. 10-Tab. 11 uvádí shrnutí dostupných měření pevnosti v tlaku bentonitových prefabrikátů s uvedením objemové hmotnosti sušiny a vlhkosti tam, kde jsou data dostupná. Vertikální orientace zatěžování vyjadřuje zatěžování rovnoběžně ke směru lisování, horizontální orientace zatěžování vyjadřuje zatěžování kolmo ke směru lisování.

Tab. 10 Pevnost v tlaku neovlivněných bentonitových prefabrikátů vyrobených z B75 v závislosti na vlhkosti, objemové hmotnosti a směru zatížení.

průměr ρd (kg/m³)	w (%)	orientace	Průměr σc [MPa]	průměr ρd (kg/m³)	w (%)	orientace	Průměr σc [MPa]
1600	7,85	vertikálně	4,293	1650	11,22	vertikálně	5,99
1600	7,85	horizontálně	4,646	1650	11,22	horizontálně	7,04
1600	7,30	vertikálně	3,616	1700	11,16	vertikálně	6,74
1600	7,30	horizontálně	3,13	1700	11,16	horizontálně	8,26
1650	7,85	vertikálně	4,55	1600	17,32	vertikálně	3,76
1650	7,85	horizontálně	6,25	1600	17,32	horizontálně	5,26
1650	7,18	vertikálně	6,09	1600	17,38	vertikálně	3,80
1650	7,18	horizontálně	7,05	1600	17,38	horizontálně	4,79
1700	7,18	vertikálně	8,00	1650	17,38	vertikálně	5,08
1700	7,18	horizontálně	8,92	1650	17,38	horizontálně	6,30
1700	7,14	vertikálně	5,56	1650	17,85	vertikálně	5,40
1700	7,14	horizontálně	7,69	1650	17,85	horizontálně	5,44
1600	11,09	vertikálně	4,44	1700	17,36	vertikálně	6,81
1600	11,09	horizontálně	5,52	1700	17,36	horizontálně	7,15

Tab. 11 Pevnost v tlaku neovlivněných bentonitových prefabrikátů z bentonitu Rokle v závislosti na vlhkosti, objemové hmotnosti a směru zatížení.

ρd (kg/m³)	w (%)	orientace	Průměr σc [MPa]
1870	2,70	vertikálně	6,90
1871	2,60	horizontálně	7,70
1864	3,00	vertikálně	17,60
1862	3,10	horizontálně	11,90
1897	1,20	vertikálně	5,50
1899	1,10	horizontálně	7,00
1450	10,36	vertikálně	5,40
1575	8,60	horizontálně	2,33
1573	8,60	vertikálně	1,78

2.12 Tepelná vodivost

Součinitel tepelné vodivosti významně závisí na vlhkosti a objemové hmotnosti vzorku. Voda a pevná fáze jsou nosiči termofyzikálních vlastností. Součinitel tepelné vodivosti je charakteristika, jejíž výsledná Volně sypané, nebo mírně zhutněné vzorky byly měřeny jehlovou sondou. Lisované vzorky byly měřeny příložnou sondou. Jelikož se v případě bentonitu Rokle jedná o heterogenní třírozměrný datový soubor, jsou data, která reprezentují neovlivněný stav uvedena v tabulkovém formátu v Tab. 12.

Tab. 12 Tepelná vodivost neovlivněného bentonitu Rokle v závislosti na objemové hmotnosti a vlhkosti

ρ_d, kg/m³	w (%)	tepelná vodivost λ, W/m·K	ρ_d, kg/m³	w (%)	tepelná vodivost λ, W/m·K
483	0,46	0,11	812	0,00	0,11
501	0,44	0,12	814	0,00	0,10
515	0,46	0,12	945	0,00	0,12
627	0,37	0,15	947	0,00	0,12
657	0,46	0,19	952	0,00	0,12
673	0,46	0,26	1447	0,30	1,50
678	0,37	0,18	1460	0,32	1,12
711	0,37	0,20	1474	0,29	0,93
775	0,44	0,22	1481	0,28	0,98
789	0,00	0,11	1510	0,26	0,97

Na bentonitu BCV byla provedena série měření při vlhkosti bentonitu 11,4 %. Závislost tepelné vodivosti na objemové hmotnosti lze vyjádřit v oblasti objemových hmotností, které odpovídají lisovaným vzorkům lineární křivkou. Pro rozsah objemových hmotností 1250 kg/m³ – 1550 kg/m³ a při vlhkosti 11,4 % má pro bentonit BCV regresní křivka následující tvar $y = 0{,}0009x - 0{,}7797$ (5):

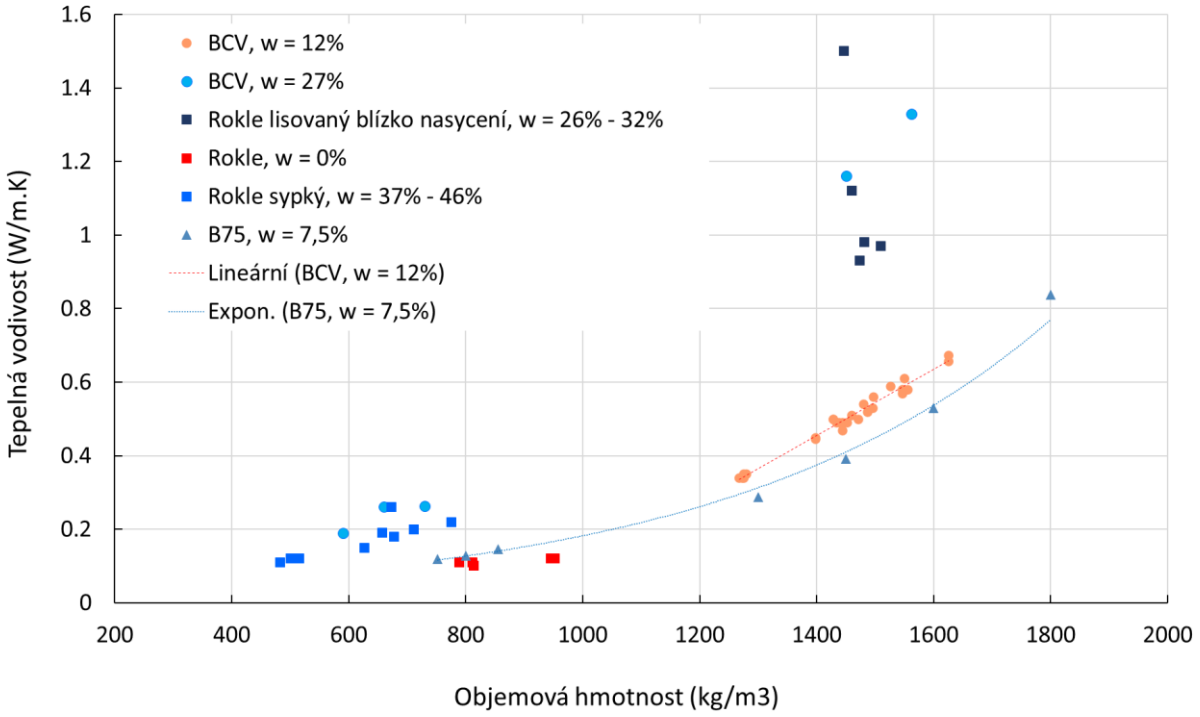
$$y = 0{,}0009x - 0{,}7797 \quad (5)$$

Pro bentonit B75 byla provedena série měření pro rozsah objemových hmotností od volně sypaných o objemové hmotnosti 750 kg/m³ po lisované o objemové hmotnosti 1800 kg/m³.

V tomto širokém definičním oboru lze vyjádřit závislost tepelné vodivosti na objemové hmotnosti při jednotné vlhkosti w = 7,5 % pro bentonit B75 exponenciální regresní rovnicí $y = 0{,}0301e^{0{,}0018x}$ (6):

$$y = 0{,}0301e^{0{,}0018x} \quad (6)$$

Dostupná data jsou vizualizována v grafu na Obr. 7.



Obr. 7 Závislost tepelné vodivosti neovlivněného bentonitu při různých vlhkostech na objemové hmotnosti.

2.13 Mikrobiologické charakterizace vstupních (neovlivněných) materiálů

Vyhodnocení mikrobiologických analýz vstupních materiálů v Podkladové zprávě TZ 624/2022 (Šachlová et al. 2022) ukázalo velikou nekonzistentnost v prováděných analýzách, a především neexistující postup mikrobiologických vstupních charakterizací. Získaná data jsou nedostatečná a navzájem neporovnatelná. V rámci aktuálních prací na projektu TAČR Bioben došlo k významnému vývoji poznání mikrobiologické problematiky v prostředí bentonitu a též metodického aparátu umožňujícího vývoj standardního postupu pro charakterizaci vstupního materiálu. Ten by měl být nezbytným předpokladem dalšího výzkumu na jiných typech bentonitů v budoucnu, aby výstupy mohly být následně vzájemně porovnatelné a využitelné jako kritérium například pro výběr vhodného materiálu pro HÚ RAO. Vývoj jednotného mikrobiologického charakterizačního postupu je proto jednou z navrhovaných prací pro následující etapy tohoto projektu (viz kap. 3.10).

Vyhodnocení mikrobiologických analýz vstupních materiálů ukázalo, že dosud prováděné analýzy jsou velice nekonzistentní. Dalším problémem je neexistující postup mikrobiologických vstupních

charakterizací. Získaná data jsou tedy nedostatečná a navzájem neporovnatelná. Vývoj jednotného postupu pro mikrobiologickou vstupní charakterizaci by měl být nezbytným předpokladem dalšího výzkumu na jiných typech bentonitů v budoucnu, aby byla zajištěna vzájemná porovnatelnost a výstupy mohly být následně využitelné jako jedno z kritérií pro výběr vhodného materiálu pro HÚ RAO.

3 Zhodnocení stability

Dlouhodobá stabilita bentonitu je obecně vnímána jako odolnost bentonitu vůči chemickým, mineralogickým a mechanickým změnám vyvolaným vnějšími vlivy (Laine a Karttunen, 2010). Jedním z faktorů ovlivňujících stabilitu bentonitu je salinita podzemní vody. Aktuální limit pro maximální salinitu podzemní vody je 70 g/l (Laine a Karttunen, 2010) z důvodu minimalizace vlivu podzemní vody na bobtnací tlak bentonitu. Vyšší salinita v kombinaci s Na/Ca charakterem vody může vést k transformaci montmorillonitu na kaolinit a pyrophyllit (Herbert et al. 2004). Interakce montmorillonitu se salinními vodami se makroskopicky projevuje snížením bobtnacího tlaku. Salinita podzemních vod v České republice je výrazně nižší (např. 0,288 g/l, PVP Bukov, Bukovská et al. 2017, 2,7 g/l, fosilní vody v Českém masívu, Rukavičková et al. 2009). Z dlouhodobého pohledu vede interakce bentonitu s podzemní vodou k nabohacení bentonitu Ca^{2+}. Z tohoto pohledu mohou být Ca-bentonity stabilnější v porovnání s Na-bentonity (Laine a Karttunen, 2010).

Po uložení UOS do HÚ bude obklopující bentonit vystaven záření generovaného z RAO a s ním spojenými tepelnými efekty. Ionizující záření (emitované zejména ^{137}Cs a ^{90}Sr) může negativně ovlivnit vlastnosti bentonitu (tzv. radiační stabilita); doprovodným jevem jsou tepelné efekty, které mají vliv na tepelnou stabilitu (např. Wersin et al. 2007) a tím i vlastnosti bentonitu (Villar et al. 2020).

Na počátku suché oxické podmínky v bentonitu po uzavření úložiště se budou měnit na částečně nasycené (oxické stavy) až plně nasycené. To již dojde ke spotřebě kyslíku, systém bude anoxický (Landolt et al. 2009, Pastina a Hellä 2006). Jedním z faktorů ovlivňujících stabilitu montmorillonitu je interakce s kovovým Fe uvolňujícím se z UOS. Řadou studií byl prokázán kritický poměr Fe:jíl ~1:5, při jehož překročení dochází při 80 °C k destabilizaci dioktaedrického smektitu (Lantenois et al. 2005; Bildstein et al. 2006; Wilson et al. 2006; Perronnet et al. 2008; Osacky et al. 2010; Savage et al. 2010; De Combarieu et al. 2011, Kale and Ravi 2022).

Nasycený bentonit je chápán jako gel, uvnitř kterého dochází ke korozi UOS na principu difuze (Kaufhold et al. 2021). Za teplot 50-100 °C a anaerobních podmínek dochází ke tvorbě nebobtnajících fylosilikátů obecně označovaných jako 7 Å Fe-bohatý 1:1 vrstevnatý silikát (d_{001} ~ 7Å) podobný berthierinu (Lantenois 2003; Perronnet 2004; Wilson et al. 2006; Perronnet et al. 2008; Osacky et al. 2010; Kaufhold et al. 2021). Formování těchto fylosilikátů potvrdily termodynamické modely (Bildstein et al. 2006; Wilson et al. 2006b; Savage et al. 2010). Autoři předpokládají, že formování nebobtnajících Fe-bohatých fylosilikátů negativně ovlivňuje porozitu a tím i propustnost bentonitové bariéry (Bildstein et al. 2006, Lanson et al. 2012). Za teplot vyšších než 150 °C dochází k formování di- a trioktaedrického Fe-bohatého smektitu a chloritu (Guillaume et al. 2003, 2004; Charpentier et al. 2006; Wilson et al. 2006; Mosser-Ruck et al. 2010).

Stoulil et al. (2013) poukázal na nízký obsah chloridů v bentonitu B75, které při dostatečném množství umožňují formování magnetitu působícího jako ochranná složka UOS. V souvislosti nárůstem teplot ze 40 na 90 °C dochází k formování korozních produktů s menší porozitou a ke zpomalení rychlosti koroze UOS. Kaufhold et al. (2020a, 2020b, 2021) poukázal na redukci strukturního Fe^{3+} vedoucí k destabilizaci smektitu a tím k jeho rozpouštění. Přítomnost reaktivního Si ovlivňuje, zda dochází k formování povlaku tvořeného Fe-silikáty, nebo k formování magnetitu (Kaufhold et al. 2020a, 2020b).

V důsledku teplotní degradace bentonitu je často zmiňovaná jeho transformace na illit (~ illitizace). Proces illitizace je vedle teploty podmíněn celou řadou dalších faktorů (propustnost, stav nasycení, koncentrace a složení saturačních roztoků, Inoue et al. 1988; Madsen et al. 1988, Pusch and Karnland 1988). Mosser-Ruck et al. (1999) dokumentoval obsah K^+ jako kritický faktor ovlivňující tvorbu transformaci smektitu na illit.

V České republice převažují Ca-Mg-bentonity obsahující výrazný podíl Fe^{x+}. Dle Ryndové a Tvrdého (2020) je nelze řadit k Ca-bentonitům typu Cheto (Clay Minerals Society 2022) právě z důvodu vysokého obsahu Fe^{x+}. Specifikem českých bentonitů je především vysoký obsah nejílových minerálů (karbonáty, Fe-oxihydroxidy, amorfní fáze). Nejílové minerály zhoršují vlastnosti bentonitu požadované pro jeho využití v HÚ (Posiva-SKB 2017). Zároveň mohou v důsledku svého rozpouštění a rekrystalizace ovlivnit vlastnosti bentonitu zatěžovaného teplotou za současného působení vody (Kašpar et al. 2021) a mohou též představovat zdroj živin pro rozvoj mikrobiální aktivity.

Posiva-SKB (2017) uvádí mezi hlavními požadavky na těsnící (buffer) a zásypovou bariéru (backfill) nepropustnost pro vodu i korozi-způsobující složky, hydraulickou vodivost < 10^{-12} m/s a bobtnací tlak > 1 MPa. Z geochemicko-mineralogických vlastností jsou hlavním kritériem sorpční a retardační vlastnosti, celkový obsah sulfidů (< 0,5 hm. %), celkový obsah síry včetně sulfidické síry (< 1 hm. %) a celkový obsah organického uhlíku (< 1 hm. %).

Vliv mikrobiální aktivity na stabilitu bentonitu je z mezinárodního pohledu jev obecně poměrně málo prozkoumaný a není dostatečně známo, jak veliký problém může potenciálně představovat. V českých podmínkách (obecně na železo bohatý bentonit) na toto téma výzkum nebyl dosud prakticky proveden. Z tohoto důvodu je ve většině podkapitol níže zhodnocen pouze rozvoj mikrobiální aktivity za studovaných podmínek, aby se ukázalo, jaké podmínky jsou pro rozvoj mikrobiální aktivity v prostředí HÚ RAO potenciálně vhodné a mohou tedy představovat riziko též z hlediska problematiky mikrobiální degradace bentonitu. Samotným vlivem mikroorganismů na stabilitu bentonitu se cíleně zabývá pouze kap. 3.9.

3.1 Stabilita za laboratorní teploty – chování bentonitové suspenze a kompaktovaného bentonitu v kontaktu s destilovanou vodou

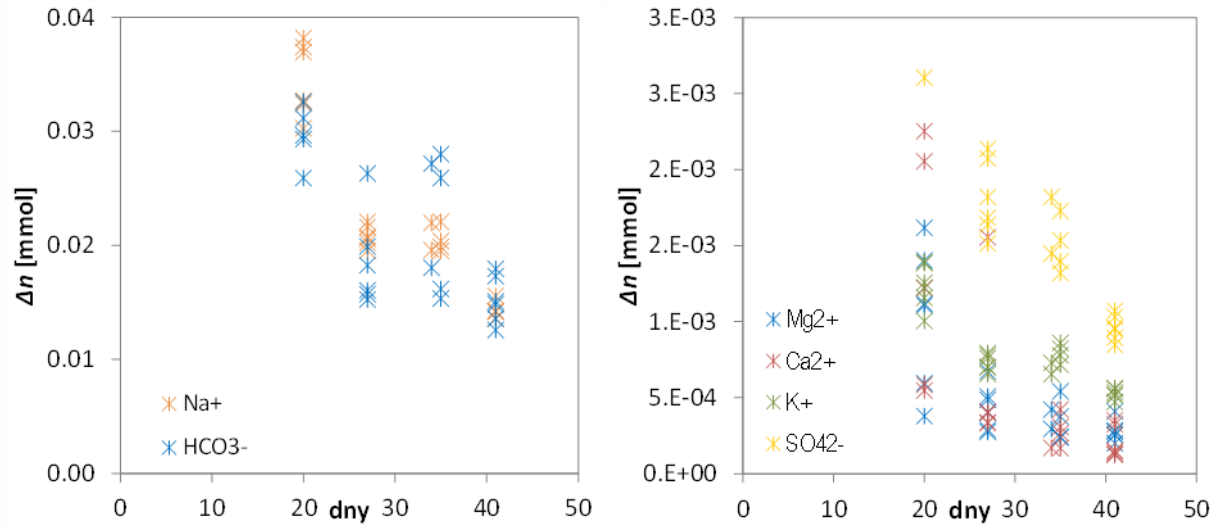
Hodnocení stability bentonitu v kontaktu s destilovanou (resp. miliQ) vodou za laboratorní teploty vychází z 5 experimentů:

- **Bentonit BCV** v suspenzi za anaerobních i aerobních podmínek, doba zátěže 0-12 měsíců (Černá et al. 2020; 2022).
- **Bentonit BCV** v kompaktovaném stavu (ρ_D = 1200 kg/m^3), doba zátěže 1-3 měsíce (Černá et al. 2022).
- **Bentonit BaM** v suspenzi za anaerobních podmínek, doba zátěže 7-30 dnů (Černík et al. 2018).
- **Bentonit BCV** kompaktovaný na objemovou hmotnost 1600 kg/m^3 a kontaktovaný s miliQ vodou, doba zátěže 6 týdnů (Černá et al. 2022).
- **Bentonit BaM** kompaktovaný na 1600 kg/m^3, doba zátěže 8 týdnů (Červinka et al. 2018).

Vliv jiných typů vod je řešen samostatně v Kap.3.4.

3.1.1 Geochemické, mineralogické a geotechnické parametry

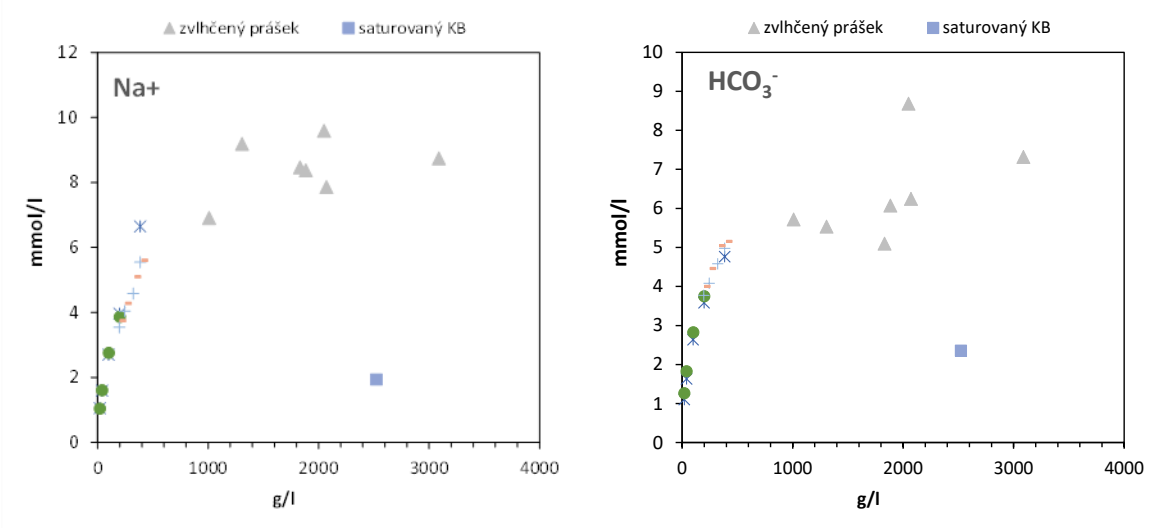
Voda je nedílnou součástí bentonitu. V literatuře se objevují termíny jako pórová voda, pórový roztok a výluh. Jejich variabilní použití je dáno nesouladem mezi konceptem uvažujícím několik typů vod (tzv. multiporozitní koncept), ve kterém je za pórovou vodu označována pouze voda volná (tzv. free water), a konceptem dokazujícím, že nasycený kompaktovaný bentonit má pouze jeden typ pórů (tj. mezivrstevných), který je vyplněný jedním typem vody, např. (Birgersson and Karnland, 2009; Birgersson, 2017). V následujícím textu je proto termín pórová voda používán pouze v případě, pokud se skutečně jedná o vodu vyplňující póry nasyceného bentonitu, a nikoliv jen jejich část. Vývoj chemismu při interakci BCV kompaktovaného na objemovou hmotnost 1600 kg/m^3 a kontaktovaného s miliQ vodou byl sledován po dobu 6 týdnů (Obr. 8, Černá et al. 2022). Hlavními vyluhovatelnými ionty jsou Na^+ a HCO_3^-. Mezi další vyluhovatelné ionty pak patří síran a draslík. Z povahy Ca/Mg bentonitu bentonit BCV vyplavuje v minimálním množství hořčík a vápník.



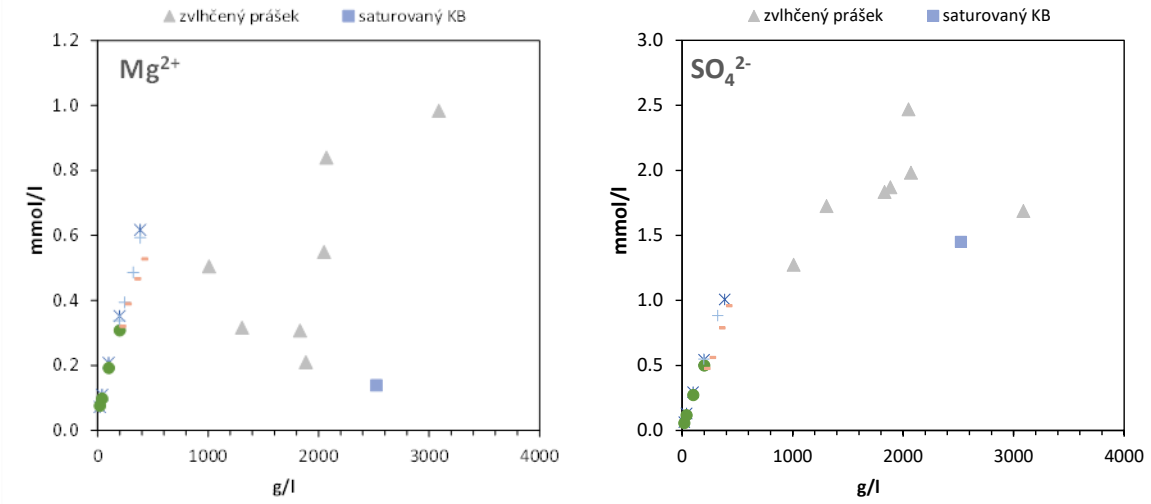
Obr. 8 Chemismus BCV kompaktovaného na 1600 kg/m^3 při interakci s MilliQ vyjádřený jako změna látkového množství v externích roztocích za časový interval.

V porovnání vyluhování kompaktovaného bentonitu a bentonitové suspenze je jasně patrná závislost koncentrace iontů na poměru bentonit / voda. Ve zředěném systému, v kterém se pohybují vodné výluhy, koncentrace specií lineárně rostou s koncentrací bentonitu. V koncentrovaném systému, tj, oblasti kompaktovaného bentonitu, lineární trend není viditelný, pomyslná křivka závislosti koncentrace specií na poměru bentonit/voda se zakřivuje (Obr. 9-Obr. 10).

Minimálně se vliv vody projevil na vlastnostech kompaktovaného bentonitu (Červinka et al. 2018). Hodnota CEC v experimentu s bentonitem BaM kompaktovaným na objemovou hmotnost 1600 kg/m^3 a syceným destilovanou vodou (DW) za laboratorní teploty po dobu 8 týdnů poklesla po 8 týdnech z průměrných 62,50 ± 4,18 mekv/100 g na 58,7 ± 2 mekv/100 g. Tento pokles je srovnatelný s vlastní odchylkou metody.

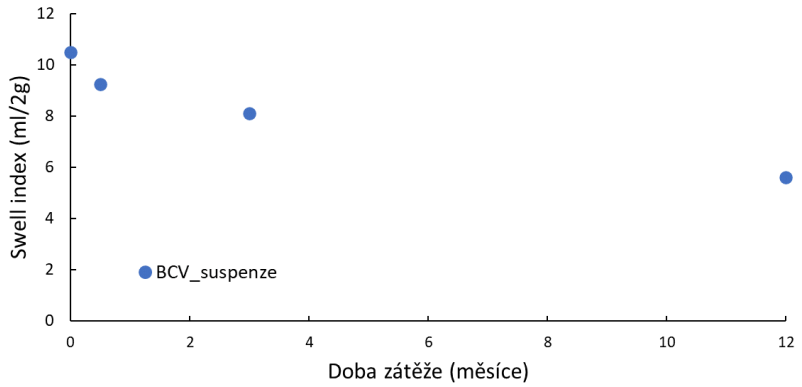


Obr. 9 Koncentrace Na^+ a HCO_3^- ze stanovení vodných výluhů (do 400 g/l) a squeezingu pro bentonit BCV.

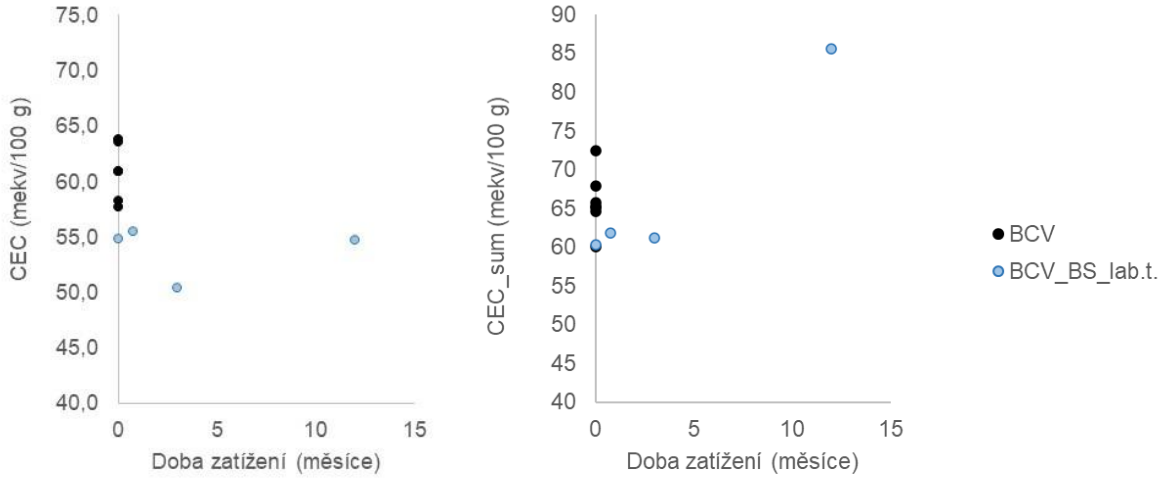


Obr. 10 Koncentrace Na^+ a HCO_3^- ze stanovení vodných výluhů (do 400 g/l) a squeezingu pro bentonit BCV.

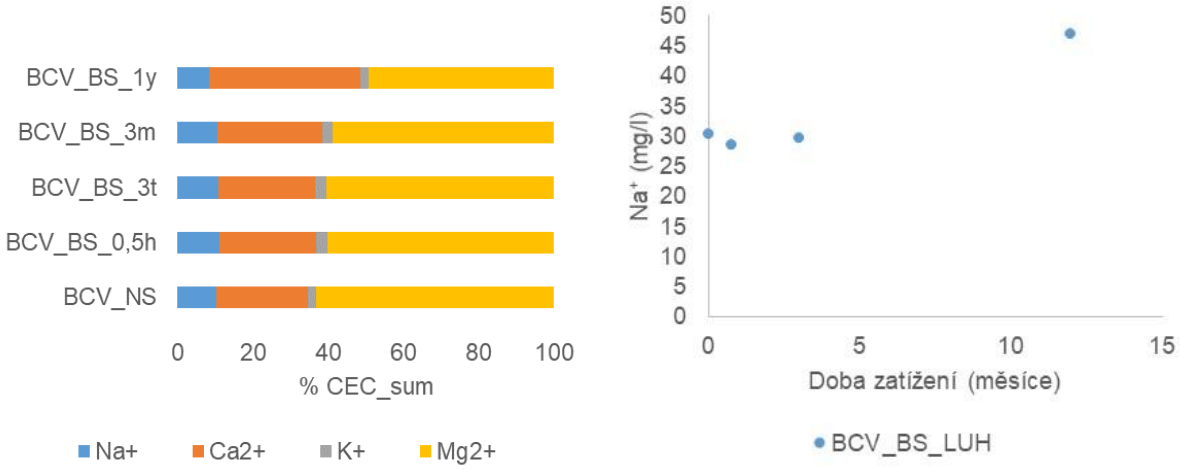
Součástí projektu BioBen (Černá et al. 2022) byla identifikace změn v bentonitu BCV v důsledku jeho kontaktování s vodou (sterilní deionizovaná voda) za anaerobních podmínek (poměr s:l = 1:5; podmínky uložení 94% Ar + 6% H_2). Kontaktování s vodou bez vlivu teploty indikuje pokles swell indexu SI o více jak polovinu po jednom roce (Obr. 11). Změny SI nekorelují se změnami v CEC ani CEC_sum (Obr. 12) ale slabě korelují s poklesem Na^+ v pozici vyměnitelného kationtu (Obr. 13). Změny v obsahu Na^+ jsou patrné i ve výluhu (Obr. 14). Rozdíly v obsahu jsou v řádu desítek mg Na^+/ l výluhu po 12 měsících. Hodnota SI za stejnou dobu poklesla o více jak 50 % původní hodnoty. Lze předpokládat, že pokles SI může být spojený s vlivem mikrobiální aktivity, která je podrobněji řešena v kapitole 3.8.



Obr. 11 Vývoj swell indexu BCV zatěžovaného při laboratorní teplotě v suspenzi (s:l = 1:5; 94% Ar + 6% H_2). Hodnoty přepočteny na normou doporučenou navážku 2 g.



Obr. 12 Vývoj CEC a CEC_sum BCV zatěžovaného při laboratorní teplotě v suspenzi (s:l = 1:5; 94% Ar + 6% H_2).



Obr. 13 (vlevo) Vývoj zastoupení vyměnitelných kationtů BCV zatěžovaného při laboratorní teplotě v suspenzi (s:l = 1:5; 94% Ar + 6% H_2). Obr. 14 (vpravo) Změny v obsahu Na^+ ve výluhu (LUH) BCV zatěžovaného při laboratorní teplotě v suspenzi (s:l = 1:5; 94% Ar + 6% H_2, Černá et al. 2022).

3.1.2 Mikrobiologické parametry

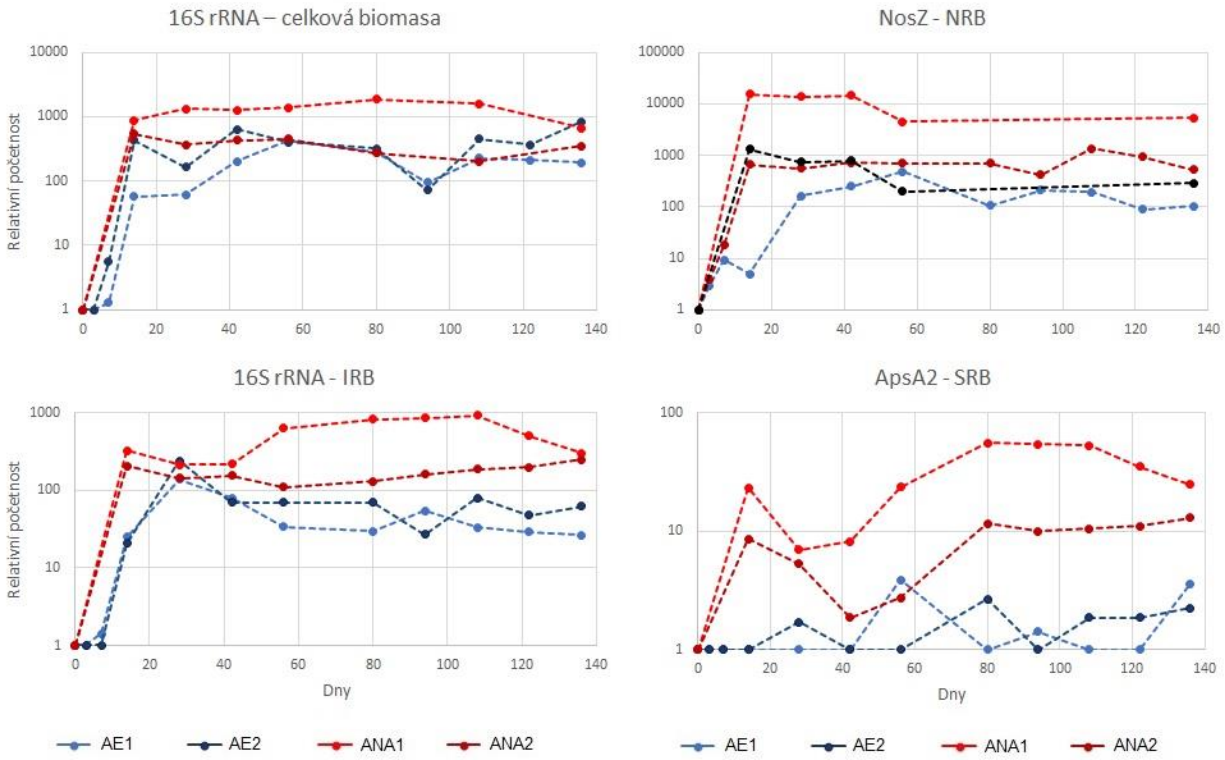
V rámci českých bentonitů byly s destilovanou vodou kontaktovány a dlouhodobě inkubovány pouze bentonity BCV a BaM. U bentonitu BaM se jednalo pouze o suspenzi, v případě bentonitu BCV o suspenzi i kompaktovaný bentonit (Tab. 13).

Tab. 13 Počet podvzorků a vyhodnocení analýz provedených na podvzorcích bentonitů inkubovaných v prostředí sterilní deionizované vody.

		Podmínky inkubace					MB1	MB2_EB	MB2_qPCR					MB3-NGS	Vyhodnocení					
	Počet podvzorků	Typ vzorku	Atmosféra	Teplota, °C	Doba inkubace, d	Přídavek živin	Typ izolace DNA	přítomnost živých buněk	16S rRNA RQ	Geobacteraceae(16S rRNA) RQ	NRB(NosZ) RQ	SRB(ApsA) RQ	Acetogeny(Acs) RQ	Nejčastější rody	Mikroorganismy detekovány	Mikrobiální aktivita	SRB aktivita/kultivovatelnost	NRB aktivita/kultivovatelnost	IRB aktivita/kultivovatelnost	AA aktivita/kultivovatelnost
BCV-suspenze Černá et al. (2020)	22	suspenze 1:5	aerobní	lab	0-133	ne	EKK	N.A.	nárůst	nárůst	nárůst	stagnace	N.D.	Lysobacter; Phenylobacterium; Oxalicibacterium; Noviherbaspirillum; Symbiobacteraceae	ano	ano	ne	ano	ano	ne
	26	suspenze 1:5	anaerobní	lab	0-140	ne	EKK	ano	nárůst	nárůst	nárůst	nárůst	stagnace	Noviherbaspirillum; Anaerobacillus;Peptococcaceae; Thermincola; Pseudomonas; Symbiobacteraceae, Bacillus	ano	ano	ano	ano	ano	ne
BaM-suspenze Černík et al. (2018)	3	suspenze 1:3,33	anaerobní	lab	7-30	ne	EFCH	N.A.	nárůst	nárůst	nárůst	N.D.	N.A.	Pseudomonas, Noviherbasipirillum, Thermincola	ano	ano	ne	ano	ano	N.A.
BCV-KB Černá et al. (2022)	2	KB 1200 kg/m3	anaerobní	lab	30-90	ne	EKK	N.A.	Cq = 20-25	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	Streptomyces, Micromonospora, Desulfosporosinus, KD4-92	ano	ano	ano?	N.A.	N.A.	N.A.

Ve všech případech byl u bentonitové suspenze i kompaktovaného bentonitu pozorován rozvoj mikrobiální aktivity. V případě suspenzí jsou data o početnosti mikroorganismů (MB2_qPCR) získaná pro tvorbu databáze vyjádřená pouze na relativní škále (vztaženo zpravidla k počátečnímu vzorku v době zahájení experimentu), což velmi omezuje porovnatelnost mezi daty z různých experimentů. Přesto lze z nashromážděných dat s jistou mírou opatrnosti usuzovat alespoň na základní trendy rozvoje mikrobiální aktivity.

U bentonitu BCV v aerobních podmínkách docházelo k mírně nižším relativním nárůstům celkové mikrobiální abundance než v případě podmínek anaerobních. To lze vysvětlit tím, že v anaerobních podmínkách dochází k rozvoji anaerobního typu respirace, při které mohou být v energetickém metabolismu využívány jako donory a akceptory elektronů další chemické látky, čímž může dojít k rozvoji různých skupin mikroorganismů. U anaerobních inkubací byl detekován vyšší nárůst relativní abundance fakultativně anaerobních NRB i obligátně anaerobních IRB. Relativní početnost SRB byla v aerobních vzorcích zanedbatelná (Obr. 15). Obdobně u suspenze BaM inkubované v anaerobních podmínkách došlo k růstu celkové mikrobiální abundance a též obligátně anaerobních skupin bakterií s výjimkou SRB, to však bylo pravděpodobně způsobeno příliš krátkým časem inkubace - 30 dnů (Tab. 13).



Obr. 15 Vývoj relativních početností mikroorganismů v bentonitu BCV inkubovaném v DW. Data upravena z Černá et al. (2020). AE - aerobní inkubace, ANA - anaerobní inkubace. Upraveno dle Černá et al. (2020).

Sekvenační analýza (MB3_NGS) ve shodě s výsledky popsanými výše zjistila v aerobních podmínkách především fakultativně anaerobní NRB rody jako je *Lysobacter, Phenylobacterium, Oxalicibacterium, Noviherbaspirillum* či zástupci čeledi *Symbiobacteraceae*. V aerobních podmínkách též nebyl pozorován nárůst obligátně anaerobních SRB. V případě anaerobních podmínek docházelo v bentonitu BCV k rozvoji různých druhů NRB jako je *Pseudomonas, Bacillus, Noviherbaspirillum, Massilia*, zástupců čeleď Symbiobacteraceae či IRB (*Thermincola*) či zástupců metabolicky versatilní čeledi *Peptococcaceae*, kam patří kromě rodu *Thermincola* též různí zástupci SRB (Stackebrandt 2014). Obdobně v suspenzích bentonitu BaM byl v anaerobních podmínkách detekován dominantní rozvoj NRB rodů *Pseudomonas* a *Noviherbaspirillum* a IRB rodu *Thermincola* (Tab. 13).

Také v případě inkubace kompaktovaných bentonitů o jednotné suché objemové hmotnosti 1200 kg/m^3 došlo ve všech případech k rozvoji mikrobiální aktivity v čase. V tomto případě nebyla provedena relativní kvantifikace, ale ve zdrojové zprávě byly uvedené přímo hodnoty kvantifikačních cyklů Cq, které se pohybují v rozmezí 20-25 (Černá et al. 2022). Tyto hodnoty ukazují na rozvoj mikrobiální aktivity. U těchto vzorků také nebyla provedena kvantitativní PCR pro jednotlivé metabolické skupiny bakterií a bylo by vhodné ji doplnit.

Z výsledků inkubací kompaktovaných bentonitů tedy plyne, že kompaktizace bentonitu na objemovou hmotnost 1200 kg/m^3 nelimituje rozvoj mikrobiální aktivity a může zde docházet k rozvoji celé řady přirozených mikroorganismů včetně SRB. V dalším kroku bude nezbytné ověřit vliv různých objemových hmotností na proliferaci přirozených mikroorganismů v bentonitu BCV. Experimenty zabývající se touto otázkou aktuálně probíhají jako součást projektu TAČR BioBen.

Výše popsané výsledky ukazují na odlišný vývoj mikrobiálního osídlení v kompaktovaných bentonitech a suspenzích, což pravděpodobně odráží fakt rozdílného chemického složení pórového roztoku a s tím spojený rozdíl v dostupnosti živin. Touto problematikou se mimo jiné zabývá probíhající projekt TAČR BioBen. Mezi dominantní detekované rody patřily *Streptomyces* (NRB), *Micromonospora* (NRB), *Desulfosporosinus* (SRB), či blíže nespecifikovaný taxon KD4-92.

3.2 Stabilita za teploty do 100 °C

Hodnocení stability bentonitu za teploty do 100 °C vychází ze 7 experimentů:

- **Bentonit Rokle** zatěžovaný při 80 °C. Bentonit Rokle v práškovém stavu byl vystavován krátkodobě (24 h) a střednědobě (3 a 6 měsíců) zvýšené teplotě (80 °C, Pacovský et al. 2003).
- **Bentonit Rokle** kombinovaně zatěžovaný teplotou a dvěma typy saturačního media (přirozená podzemní voda „Josef“ a syntetická voda „SGW-K“): část zahrnující laboratorní experimenty - vzorky bentonitu v práškovém stavu byly umístěny v tlakových nádobách a zality saturačním mediem (vodou „Josef“ či „SGW-K“). Procedura spočívala v zahřívání (zatěžování) tlakových nádob teplotou 95 °C. Odběry byly poté provedeny po 3, 6, 12 a 18 měsících (Pacovský et al. 2010).
- **Bentonit Rokle** ve formě prášku kultivovaného v různých kultivačních médiích po dobu 3-10 týdnů (Svensson et al. 2011).
- **Bentonit B75** zatěžovaný při 95 °C. Součástí projektu byl výzkum vlastností bentonitu ovlivněného tepelným zatížením, typem saturačního media a vlivem interakce s cementovými materiály. Bentonit byl zatěžován teplem a sytícím mediem (voda Josef). Zatěžování trvalo 3-28 měsíců. Bentonit byl zatěžován v suchém a vlhkém stavu. Zatěžován byl bentonit v práškové podobě a ve formě vylisovaných prefabrikátů (Vašíček et al. 2013).
- **Bentonit B75** v kompaktovaném stavu zatěžovaný 25, 50 a 65 °C (dle polohy od topidla) 4 roky v in-situ podmínkách (Ševců et al. 2018).
- **Bentonit BCV** ve formě suspenze zatěžované teplotou 60, 70, 80 a 90 °C pod dobu 1 měsíce (Černá et al. 2020).
- **Bentonit BaM** v kompaktovaném stavu (ρ_D = 1500 kg/m^3) zatěžovaný 70 °C 1-4 roky v in-situ podmínkách (Dobrev et al. 2020).

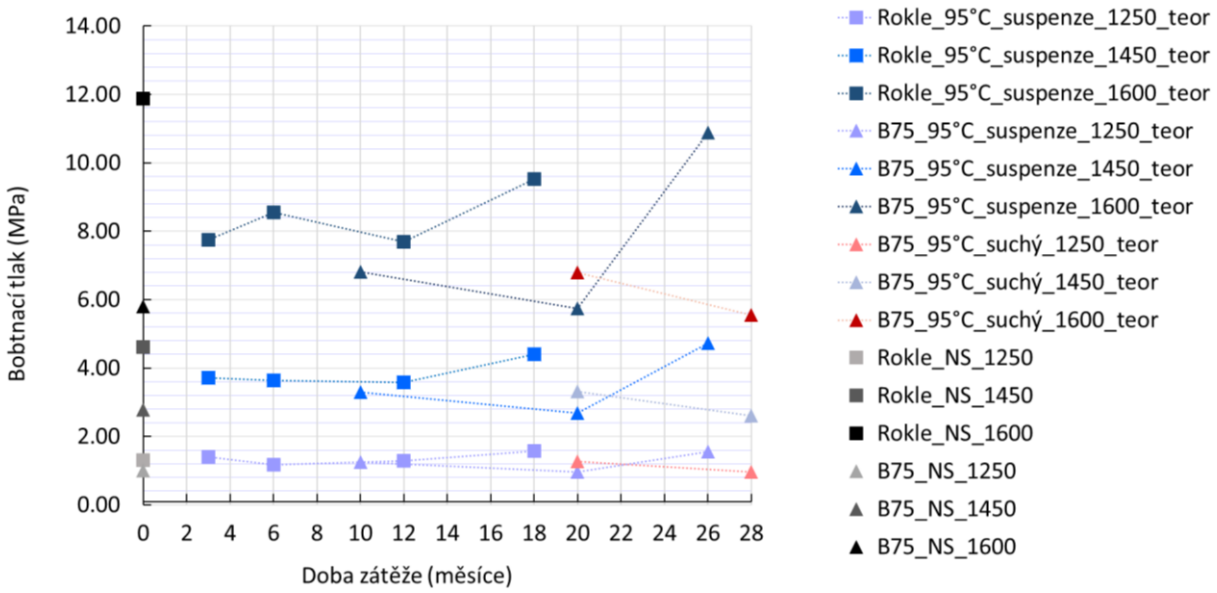
Vliv teplotního zatěžování v kombinaci s UOS/práškovým Fe (resp. nízkoalkalickým cementem – LPC) jsou řešeny samostatně v Kap. 3.5 (resp. Kap. 3.6).

3.2.1 Geochemické, mineralogické a geotechnické parametry

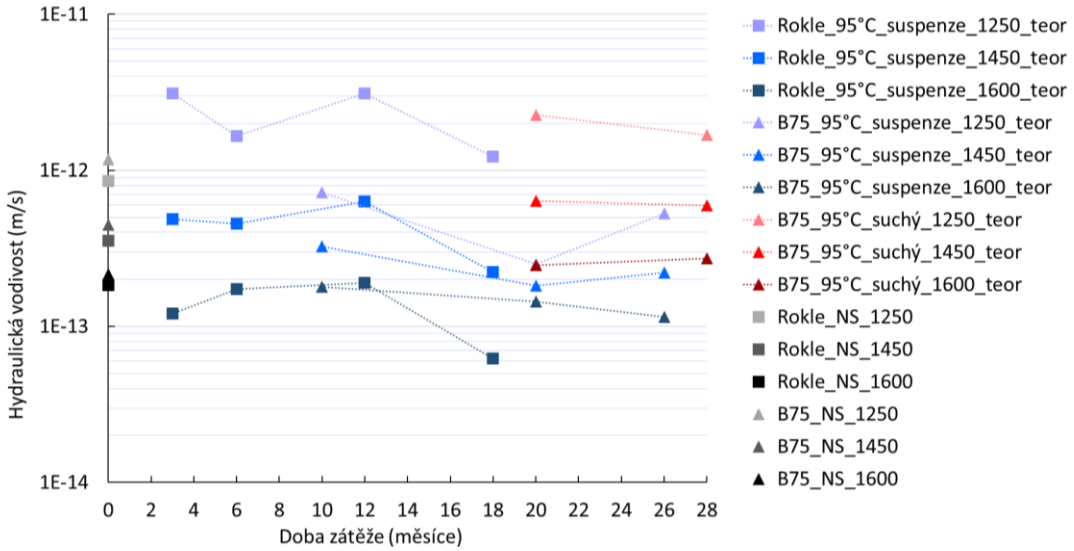
Časový vývoj bobtnacího tlaku (Obr. 16) ani hydraulické vodivosti (Obr. 17) pro bentonity B75 a Rokle zatěžované při 95 °C v suchém stavu nebo v suspenzi neukazuje závislost na délce zátěže. Swell index pro bentonit Rokle zatěžovaný při 80 °C vykazuje mírný pokles po 3 měsících zatížení a následný nárůst po 9 měsících zatížení (Obr. 18). Změny hodnot swell indexu jsou na hranici rozlišitelnosti metody (Pacovský 2003, Pacovský et al. 2010, Vašíček et al. 2013). Mírný pokles meze tekutosti byl zaznamenám pouze u bentonitu B75 zatěžovaného za sucha. Ostatní

bentonity vykazují srovnatelné hodnoty meze tekutosti bez ohledu na délku zátěže (Obr. 19, Vašíček et al. 2013).

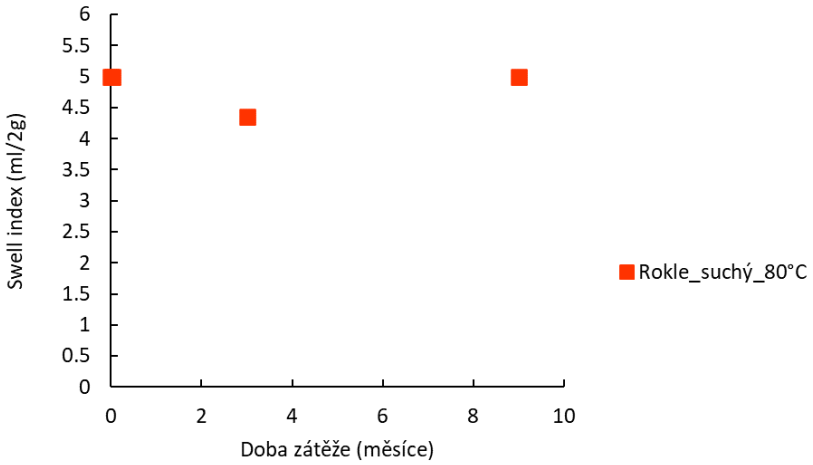
Z geochemicko-mineralogických parametrů jsou pro stejné bentonity k dispozici data pro CEC a data z difúzních a sorpčních experimentů (Vinšová et al. 2008a, 2008b, Pacovský 2010, Křížová et al. 2010, Švandová et al. 2013, Vašíček et al. 2013). Teplotní zatěžování bentonitu B75 za sucha nebo vodou Josef při 95 °C způsobilo nárůst CEC při zatěžování v kontaktu s vodou po 10 i 20 měsících (Obr. 20). Po 26 měsících došlo k mírnému poklesu CEC a „návratu“ k hodnotám CEC nezatíženého bentonitu. Teplotní zatěžování bentonitu B75 za sucha v práškovém i kompaktovaném stavu nezpůsobilo po 23 měsících změny v CEC.



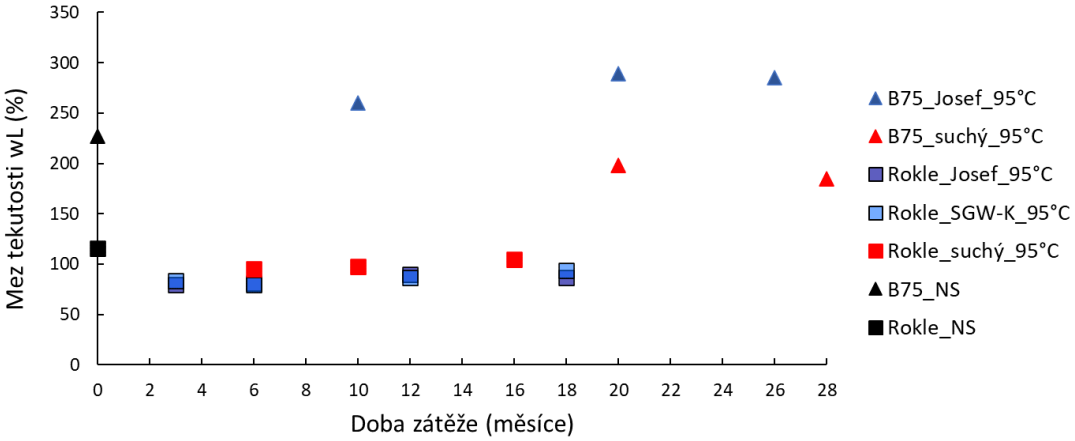
Obr. 16 Vývoj bobtnacího tlaku vybraných objemových hmotností sušiny bentonitů Rokle a B75 s dobou tepelného zatěžování teplotou > 100 °C v suchém a vlhkém stavu ve formě suspenze, ve které byla použita přirozená voda Josef, nebo syntetická voda SGW-K.



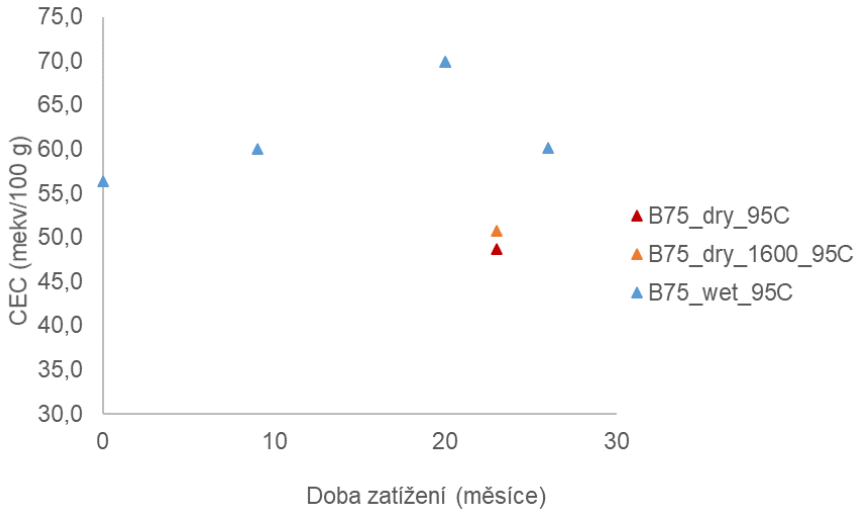
Obr. 17 Vývoj hydraulické vodivosti vybraných objemových hmotností sušiny bentonitu s dobou tepelného zatěžování teplotou < 100 °C v suchém (B75) a vlhkém stavu ve formě suspenze (Rokle a B75), ve které byla použita přirozená voda Josef, nebo syntetická voda SGW-K.



Obr. 18 Vývoj swell indexu bentonitu Rokle s dobou ovlivnění teplotou 80 °C v suchém stavu.



Obr. 19 Mez tekutosti bentonitu B75 a Rokle po zatížení teplotou 95 °C v suchém a vlhkém stavu ve formě suspenze za použití přirozené vody Josef, respektive umělé vody SGW-K.

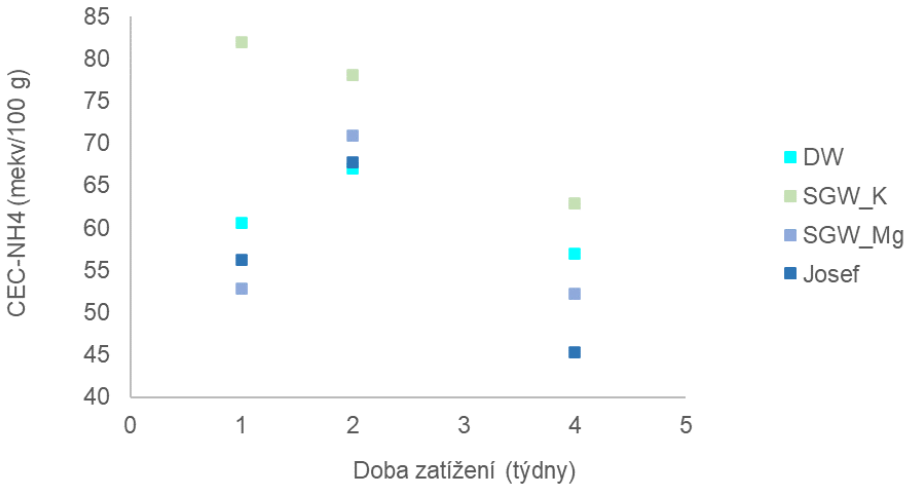


Obr. 20 CEC bentonitu B75 zatěžovaného za sucha (dry) nebo vodou Josef (wet) při 95 °C.

Bentonit Rokle zatěžovaný při 80 °C vodami Josef, SGW-K, SGW-K-10, SGW-Mg a SGW-Mg-10 neukazuje výrazné mineralogické změny ve struktuře montmorillonitu. Variace v parametrech bazálního píku montmorillonitu byly pozorovány napříč všemi vzorky bez ohledu na délku nebo

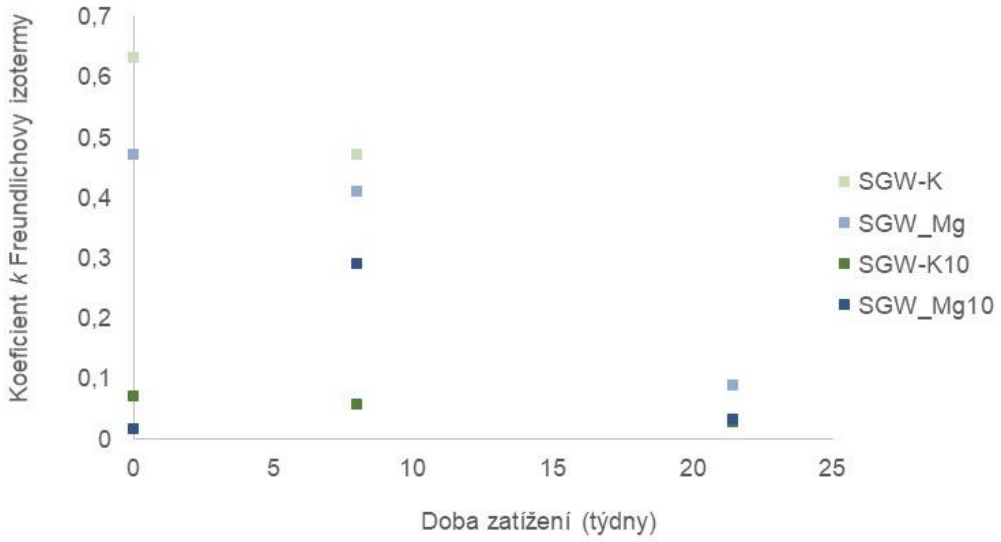
typ zatížení. Ojediněle byly detekovány vyrostlice sádrovce (10 měsíců, 20 °C, 80-90 °C) a sádrovce a basanitu (12 měsíců 80-90 °C) při interakci s SGW-K a SGW-K-10 vodami (Křížová 2010, Švandová et al. 2013). Hodnoty CEC bentonitu Rokle zatěžovaného při 80 °C po dobu 1-4 týdnů z počátku rostou a následně klesají (Obr. 21). U zátěže vodou SGW-K je pokles kontinuální po celou dobu zatěžování. Kolísání v souvislosti s délkou zátěže se pohybuje v rozmezí 10-15 mekv/100 g, což je nad hranicí rozlišitelnosti metody. Dle povahy experimentu nelze odlišit, zda se jedná přednostně o vliv teploty nebo typu saturačního media.

Přikryl et al. (2003) zatěžoval bentonit Rokle kontinuálně bez vlivu vody v teplotním rozsahu 50-100 °C s krokem 10 °C bez vlivu vody. Pokles hodnot CEC v daném teplotním rozpětí nebyl zaznamenán. S ohledem na výsledky Přikryla et al. (2003) lze předpokládat, že pokles hodnot CEC u bentonitu Rokle (Křížová 2010, Švandová et al. 2013) přednostně souvisí se sycením Mg^{2+} a K^{+} bohatými vodami, nikoliv s teplotou.



Obr. 21 CEC bentonitu Rokle zatěžovaného destilovanou vodou při 80 °C.

Sorpční vlastnosti byly zkoumány pomocí sorpce ^{134}Cs a průnikovou difúzní metodou (Křížová et al. 2010, Vinšová et al. 2010, Švandová et al. 2013). Pokles distribučního koeficientu (*Kd*) a sorpčních vlastností (koeficient *k* Freundlichovy izotermy, Obr. 22) je patrný nejen z v závislosti na délce zatěžování, ale i v závislosti na typu saturačního media. Koeficient *k* klesá směrem SGW-K → SGW-Mg → SGW-Mg-10 → SGW-K-10. Desetinásobné zvýšení koncentrace K^{+} (SGW-K-10) and Mg^{2+} (SGW-Mg-10) vedlo ke snížení koeficientu *k* i k poklesu *Kd* (Švandová et al. 2013, Křížová et al. 2010). Vinšová et al. (2010) vysvětluje změny v průběhu sorpčního chování bentonitu pouze jako důsledek koncentrace konkurujících kationtů, jež se spolu sorbují s cesným kationtem na bentonit pomocí iontové výměny. Prodlužující se doba interakce bentonitového materiálu se syntetickými saturačními médii tak nemá významný vliv na změnu chování bentonitu v kontaktu s cesiem.



Obr. 22 Koeficient k Freundlichovy izotermy pro bentonit Rokle zatěžovaný při 80-90 °C syntetickými vodami SGW-K, SGW-K10, SGW-Mg. SGW-Mg10.

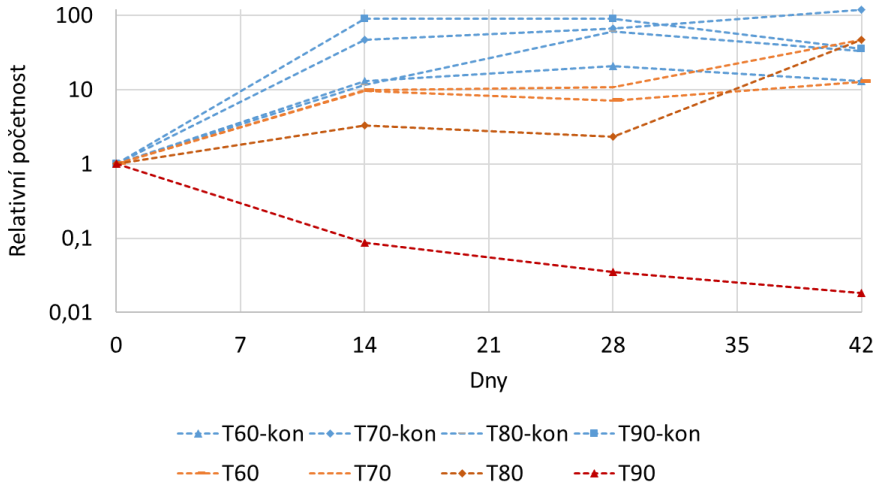
3.2.2 Mikrobiologické parametry

Mikrobiologické analýzy byly provedeny u zahřívaných vzorků suspenzí BCV, kultivačních médií u bentonitu Rokle, a dále na vzorcích kompaktovaných vzorků BaM a B75 (Tab. 14).

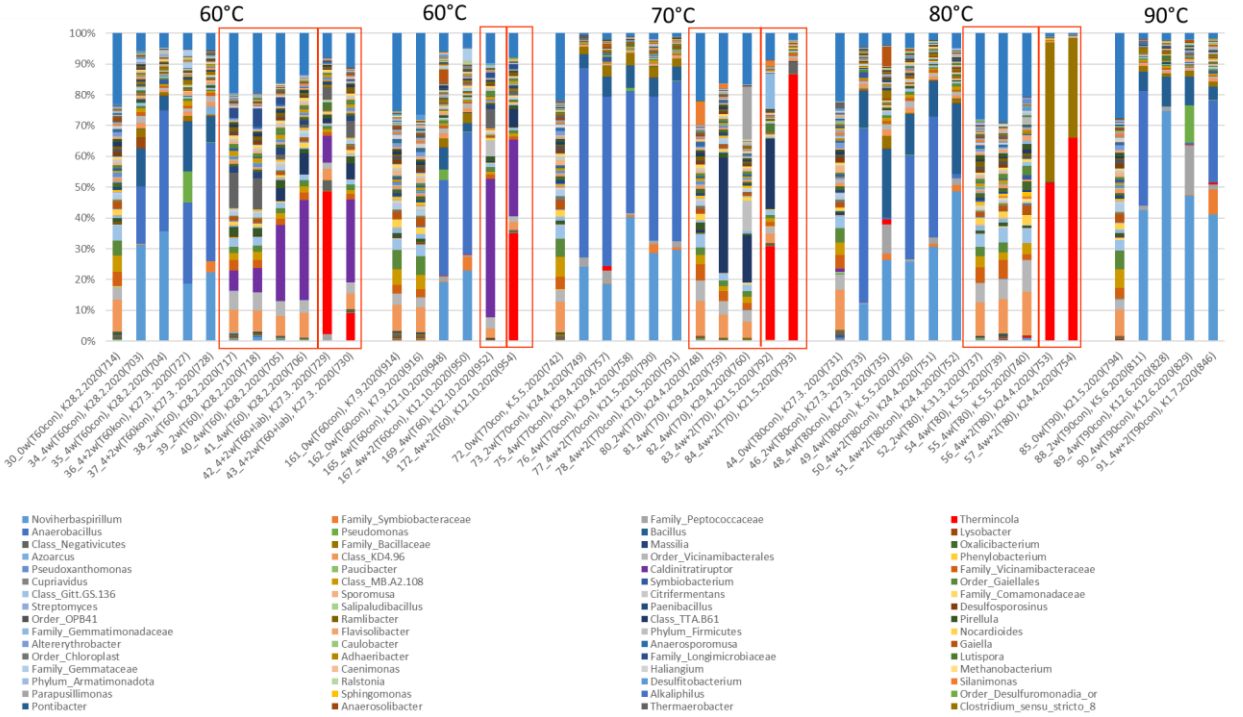
Suspenze BCV byly anaerobně vystavené teplotám 60-90 °C po dobu 4 týdnů a po skončení zahřívání byly vzorky ponechané další 2 týdny za laboratorní teploty pro možnost regenerace ze spor (Černá et al. 2020). Při porovnání relativních abundancí zahřívaných podvzorků s kontrolními nezahřívanými podvzorky (Obr. 23) je patrné, že zvýšení teploty jednoznačně vede ke snížení mikrobiální aktivity ve všech případech a že pokles mikrobiální aktivity je závislý na aplikované teplotě. Zatímco u vzorků zahřívaných na 60-70 °C byla detekovaná mikrobiální aktivita v zahřívaných vzorcích a byly zde nalezeny termofilní bakterie jako je *Caldinitratoruptor* (Fardeau et al. 2010) či *Thermolithobacter* (Sokolova et al. 2007), u vzorků zahřívaných na 80 °C již mikrobiální aktivita detekována nebyla. Po inkubaci vzorků zahřívaných na 60-80 °C však došlo v laboratorní teplotě k opětovnému nárůstu mikrobiální aktivity, a to především IRB rodem *Thermincola* spolu se zmíněnými termofilními bakteriemi, Obr. 24, Příloha 1). U vzorků vystavených 90 °C nebyla pozorována mikrobiální aktivita v zahřívaných vzorcích ani po regeneraci (Obr. 24). Z výše uvedených výsledků vyplývá, že v prostředí BCV suspenze představuje 80 °C limitní hodnotu pro mikrobiální aktivitu a 90 °C limitní hodnotu pro mikrobiální životaschopnost. Ověření těchto limitních hodnot aktuálně probíhá i v kompaktovaných bentonitech BCV v rámci projektu TAČR BioBen.

Tab. 14: Počet podvzorků a vyhodnocení analýz na vzorcích bentonitů zatěžovaných teplotou do 100 °C.

			Podmínky inkubace				MB2_EB	MB2_K	MB2_qPCR	MB3_NGS	MB4		Analýza						
	Počet podvzorků	Popis vzorku	atmosféra	doba inkubace, d	přídavek živin (vypsat)	teplota, °C	přítomnost živých buněk	použité médium(+pozitivní/-negativní)	16S rRNA RQ	max 5 nejčetnějších rodů	detekce produckce Cu35S	detekce producke acetátu (umol/gdw)	Mikroorganismy detekovány	Mikrobiální aktivita	SRB aktivitakultivovatelnost	NRB aktivitakultivovatelnost	IRB aktivitakultivovatelnost	AA aktivitakultivovatelnost	Limitní hodnota nutná pro potlačení MB aktivity
BCV Černá et al. (2020)	2	susp1:5_4w(T60)	ANA	28	ne	60	ano	N.A.	1-10	Caldinitratiruptor	N.A.	N.A.	ano	ano	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	teplota >80°C limituje MB aktivitu, teplota >90°C i životaschopnost
	2	susp1:5_4w(T70)	ANA	28	ne	70	ano	N.A.	1-10	Class TTA.B61, Thermolithobacter	N.A.	N.A.	ano	ano	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	
	2	susp1:5_4w(T80)	ANA	28	ne	80	N.A.	N.A.	1	pozadí	N.A.	N.A.	ano	ne?	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	
	2	susp1:5_4w(T90)	ANA	28	ne	90	ne?	N.A.	0,1-0,01	N.D.	N.A.	N.A.	ne	ne	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	
	2	susp1:5_4w(T90)-TUL	ANA	28	ne	90	ne	N.A.	0,1-0,01	N.D.	N.A.	N.A.	ne	ne	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	
	2	susp1:5_4+2w(T60 +lab)	ANA	42	ne	60	ano	N.A.	10-100	Thermincola; Caldinitratiruptor	N.A.	N.A.	ano	ano	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	
	2	susp1:5_4+2w(T70 +lab)	ANA	42	ne	70	N.A.	N.A.	10-100	Thermincola; Class TTA.B61, Desulfofundulus	N.A.	N.A.	ano	ano	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	
	2	susp1:5_4+2w(T80 +lab)	ANA	42	ne	80	N.A.	N.A.	10-100	Thermincola; Bacillaceae	N.A.	N.A.	ano	ano	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	
	2	susp1:5_4+2w(T90 +lab)	ANA	42	ne	90	ano(kon)	N.A.	0,1-0,01	N.D.	N.A.	N.A.	ne	ne	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	
	2	susp1:5_4+3w(T90 +lab)-TUL	ANA	49	H2	90	ano(kon)	N.A.	0,1-0,01	N.D.	N.A.	N.A.	ne	ne	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	
BaM Dobrev et al. (2020)	8	KB 1500 kg/m3 in-situ, 70°C	in-situ Grimsel	1-4r	ne	70	N.A.	N.A.	N.A.	vývoj mikrobiálního osídlení v čase (dominance NRB) , 3r a 4r stejný signál (Pseudomonas, Thermus)	N.A.	N.A.	ano	ano	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	ρD 1500 kg/m3 při teplotě 70°C nelimituje MB aktivitu (bez znalosti RQ či jiné metody kvantifikace)
B75 Ševců et al. (2018)	1	KB N.S.	in-situ Josef	cca 4 r	ne	25	N.A.	N.A.	N.A.	Nocardia; Pseudonocardia (další Acinetobacter; Brevibacterium; Janibacter; Pseudarthrobacter; Rhodococcus; Streptomyces)	N.A.	N.A.	ano	ano ?	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	nebyl zjištěn pokles MB aktivity
	1	KB N.S.	in-situ Josef	cca 4 r	ne	50	N.A.	N.A.	N.A.	Nocardia; Pseudonocardia (další Acinetobacter; Brevibacterium; Janibacter; Pseudarthrobacter; Rhodococcus; Streptomyces)	N.A.	N.A.	ano	ano ?	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	
	1	KB N.S.	in-situ Josef	cca 4 r	ne	65	N.A.	N.A.	N.A.	Saccharopolyspora (další Acinetobacter; Brevibacterium; Janibacter; Pseudarthrobacter; Rhodococcus; Streptomyces)	N.A.	N.A.	ano	ano ?	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	
Rokle kultivace prášek Svensson et al. (2011)	1	prášek	ANA	3-10 t	síran-redukující médium s laktátem	lab	ne	SRB+	N.A.	N.A.	N.D.	N.D.	ano	ne?	ne/ano	N.A.	N.A.	N.A.	kultovovatelnost bakterií závislá na teplotě, vyšší růst při vyšší teplotě
		prášek	ANA	3-10 t	síran-redukující médium s H2	lab	ano+	AA+	N.A.	N.A.	N.D.	<10-30x enriche	ano	ano	ne	N.A.	N.A.	ano/ano	
		prášek	ANA	3-10 t	médium bez přídavku	lab	ano+	IRB+	N.A.	N.A.	N.D.	5x enriched	ano	ano	ne	N.A.	ano	ano ?/ano	
		prášek	ANA	3t	síran-redukující médium s laktátem	50	ano+	SRB+	N.A.	N.A.	5-10x enriched	N.D.	ano	ano	ano/ano	N.A.	N.A.	N.A.	
		prášek	ANA	3t	síran-redukující médium s H2	50	ano+	AA+	N.A.	N.A.	5x enriched	50-120x enriche	ano	ano	ano/ano	N.A.	N.A.	ano/ano	



Obr. 23 Vývoj relativní početnosti mikroorganismů v zahřívaných vzorcích suspenzí BCV a nezahřívaných kontrolách. Upraveno dle Černá et al. (2020).

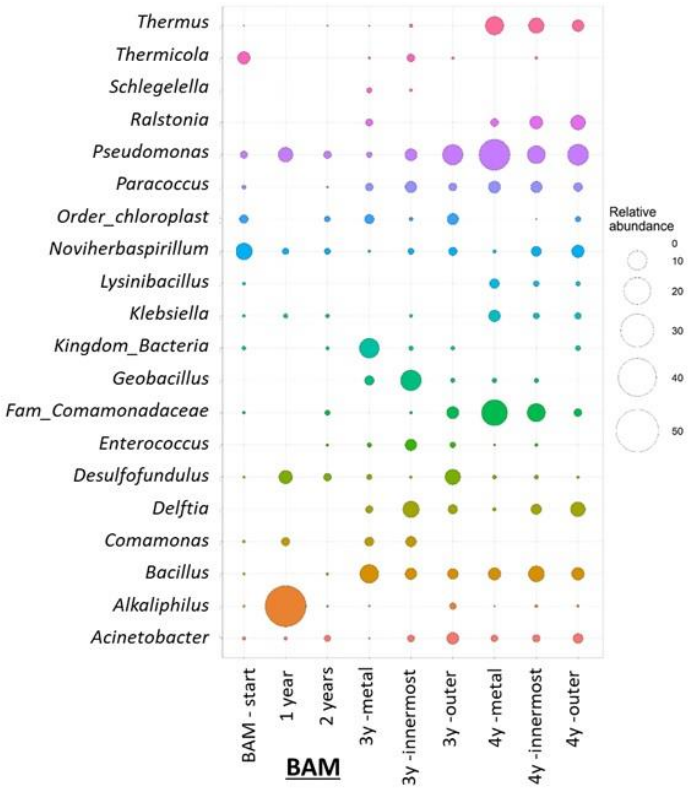


Obr. 24 Sekvenační analýza zahřívaných vzorků suspenzí BCV a nezahřívaných kontrol. Červené obdélníky vyznačují zahřívané vzorky s vyznačením regenerační fáze. Vzorky bez obdélníků představují nezahřívané kontroly. Upraveno dle Černá et al. (2020).

Kultivační postupy u bentonitu Rokle ukázaly, že zvýšená teplota může být pro rozvoj MB aktivity za určitých podmínek přínosná. SRB a AA vykazovaly větší kultivovatelnost a míru metabolické aktivity v 50 °C, než za laboratorní teploty (Svensson et al. 2011). Výsledky obou výše uvedených studií potvrzuje, že v bentonitu existuje mnoho termofilních druhů bakterií a zvýšené teploty až do výše 80-90 °C tak nebudou limitovat MB aktivitu.

V případě bentonitu BaM byly analyzovány vzorky zahřívaného kompaktovaného bentonitu v rámci dlouhodobého in-situ korozního projektu MaCoTe (suchá objemová hmotnost 1500 kg/m^3 a teplota 70 °C) (Dobrev et al. 2020). Bylo zde provedeno pouze sekvenování, jehož výsledky

ukázaly postupný vývoj mikrobiálního osídlení v čase, kdy v posledních dvou vzorcích po 3 a 4 letech zátěže dominovaly NRB rody *Pseudomonas*, *Thermus* (thermofilní), *Bacillus* či čeleď Comamonadaceae (Obr. 25). Tato data tedy naznačují, že v zahřívaných kompaktovaných bentonitech dochází k rozvoji mikrobiální aktivity, ale pro určení její míry a také případných rozdílů v mikrobiální aktivitě v čase by bylo nezbytné provést také relativní kvantifikaci, popř. prováděné analýzy doplnit o analýzy typu MB4, které detekují produkty mikrobiálního metabolismu (podrobněji viz Vašíček et al. 2022).



Obr. 25 Výsledky sekvenační analýzy kompaktovaných bentonitů z projektu MaCoTe po 1-4 letech experimentu. Upraveno dle Dobrev et al. (2020).

U bentonitu B75 byly mikrobiologicky analyzovány podvzorky z vyhřívaného in-situ experimentu (Josef URC), které mohou být využité pro studium vlivu kompaktizace a teploty. Celkem byly analyzovány vzorky ze třech různých míst lišících se teplotou (25-65 °C) pouze pomocí sekvenování (MB3-NGS) (Ševců et al. 2018). Detekované mikrobiologické složení u vzorků z 25 a 50 °C bylo shodné a vzorkům dominovali fakultativně anaerobní NRB rody *Nocardia* a *Pseudonocardia*, u vzorku zahřívaného na 65 °C byl ve vzorku dominantní rod *Saccharopolyspora*. Mikrobiologické analýzy těchto vzorků však proběhly se značným zpožděním od odběru vzorků (několik měsíců) a detekované mikrobiální profily tak mohou odrážet spíše vliv následného dlouhodobé skladování vzorků v aerobních podmínkách pracoviště Josef URC, než skutečný stav mikrobiální aktivity v průběhu experimentu (Ševců et al. 2018).

I přes výše uvedené nejistoty v interpretaci výsledků výsledky analýz bentonitů z obou typů vyhřívaných in-situ experimentů naznačují, že k rozvoji mikrobiální aktivity za daných podmínek docházet může, což potvrzuje závěry zjištěné studiem suspenzí a kultivací za zvýšených teplot. V následujících experimentech by tak tomuto jevu měla být věnována zvýšená pozornost a

v prováděných analýzách by měl být též kladen důraz na detekci mikrobiální metabolické aktivity. Pouze sekvenační výsledky nejsou z tohoto hlediska dostatečné.

3.3 Stabilita za teploty vyšší než 100 °C

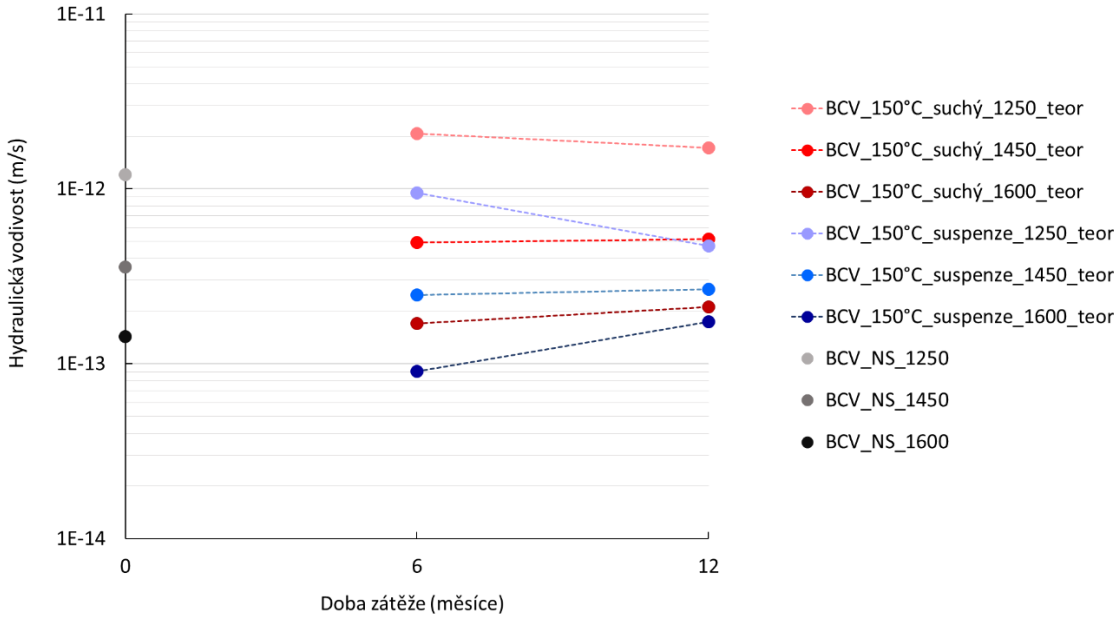
Hodnocení stability bentonitu za teploty vyšší než 100 °C vychází z 5 experimentů:

- **Bentonit BCV** teplotně zatěžovaný při 150 °C v práškovém stavu i v suspenzi po dobu 6, 12 a 24 měsíců (poměr s:l v suspenzi ~ 1:2, Kašpar et al. 2021).
- **Bentonit BCV** sterilizovaný opakovanými krátkými cykly zahřívání na 120 °C v práškovém stavu a suspenzi (Černá et al. 2022).
- **Bentonit BCV** teplotně zatěžovaný při 200 °C v suchém stavu po dobu 12, 15 a 27 měsíců (Laufek et al. 2021).
- **Bentonit Rokle** kompaktovaný na 1750-1800 kg/m^3 umístěný v experimentu ABM1 sycený přírodní Na-Ca-Cl vodou (~2,5 g/l Na^+, 2,5 g/l Ca^{2+}, 8,5 g/l Cl^-, 0,5 g/l SO_4^{2-}, TDS ~ 14,5 g/l) (Svensson et al. 2017, Dohrmann a Kaufhold 2017).
- **Bentonit Rokle** kontinuálně teplotně zatěžovaný v rozsahu 100-500 °C s krokem 50 °C v suchém stavu (Přikryl et al. 2003, 2004). Délka teplotní zátěže pro každý krok činila 1 hodinu.

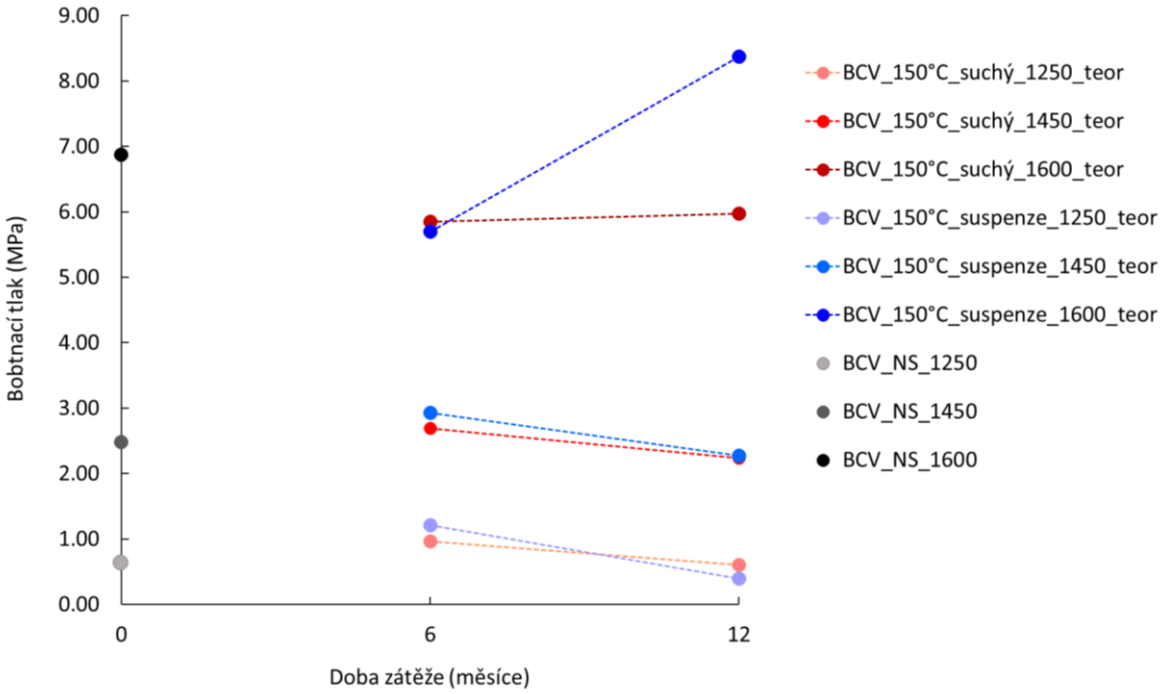
3.3.1 Geochemické, mineralogické a geotechnické parametry

BCV zatěžovaný za sucha při 150 °C ukazuje mírné zvýšení hydraulické vodivosti u objemových hmotností 1250 a 1450 kg/m^3 (Obr. *26*). U objemové hmotnosti 1600 kg/m^3 se hydraulická vodivost po 12 měsících zatěžování nemění. S vývojem hydraulické vodivosti dobře koreluje vývoj bobtnacího tlaku (Obr. 27), kdy u nižších objemových hmotností mírně klesá. U objemové hmotnosti 1600 kg/m^3 je odchylka bobtnacího tlaku srovnatelná s odchylkou měření.

BCV zatěžovaný za mokra ukazuje mírné snížení hydraulické vodivosti ale i mírné snížení bobtnacího tlaku u objemové hmotnosti 1250 kg/m^3 po 12 měsících zatěžování (Obr. *26*-Obr. 27). Naopak u objemové hmotnosti 1600 kg/m^3 je zaznamenáno zvýšení hydraulické vodivosti i bobtnacího tlaku po 12 měsících tepelného zatěžování.

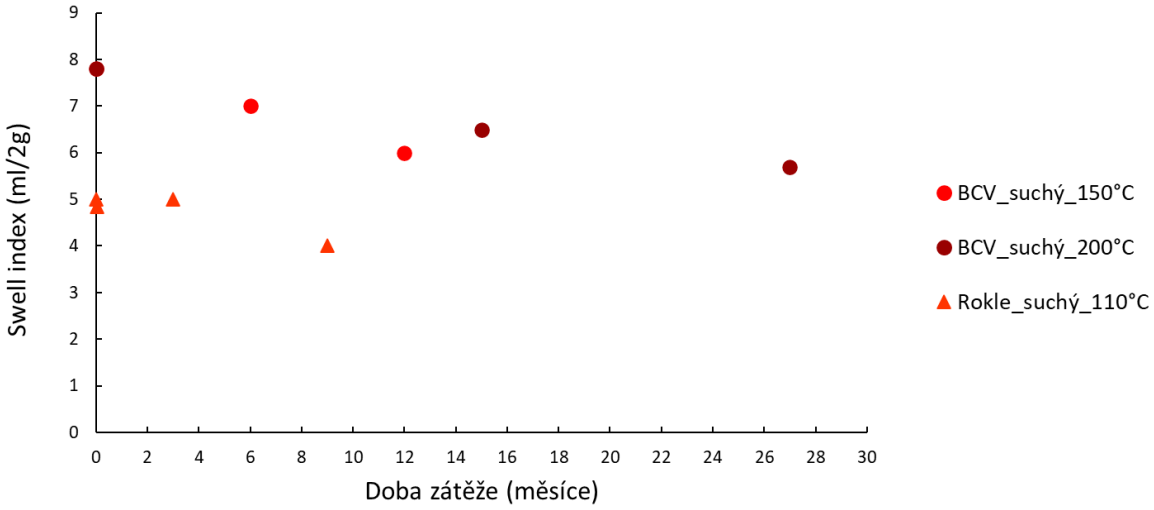


Obr. 26 Vývoj hydraulické vodivosti vybraných objemových hmotností sušiny bentonitu BCV s dobou tepelného zatěžování teplotou > 100 °C v suchém a vlhkém stavu ve formě suspenze, ve které byla použita destilovaná voda. Černými body je označen neovlivněný stav.

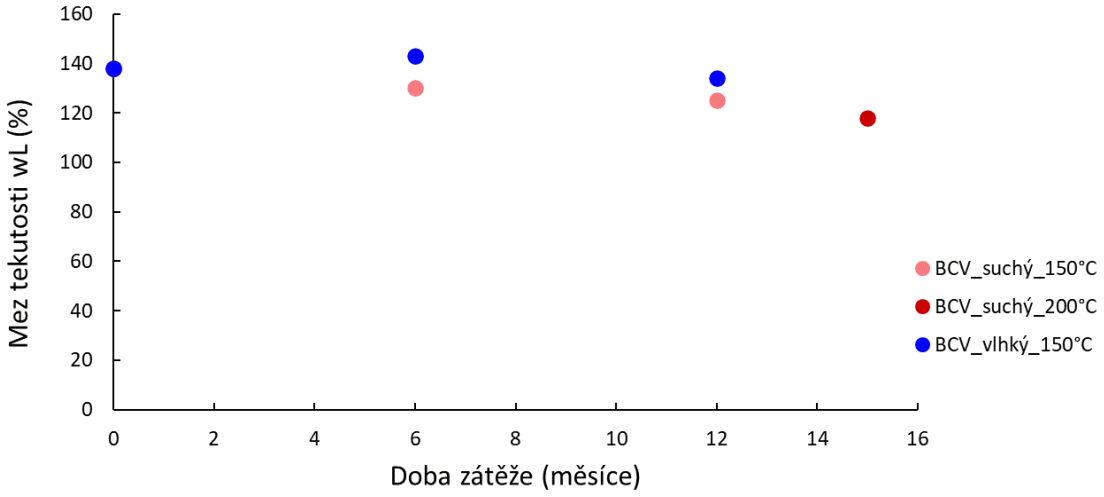


Obr. 27 Vývoj bobtnacího tlaku vybraných objemových hmotností sušiny bentonitu BCV s dobou tepelného zatěžování teplotou > 100 °C v suchém a vlhkém stavu ve formě suspenze, ve které byla použita destilovaná voda. Černými body je označen neovlivněný stav.

Hodnoty SI jsou na teplotní zatěžování za 150 a 200 °C citlivější (Obr. *28*). U BCV zatěžovaného při 200 °C je pokles SI o přibližně 25 % původní hodnoty po 27 měsících. BCV zatěžovaný při 150 °C dosáhl stejného poklesu už po 12 měsících. Pokles hodnot v důsledku teplotního zatěžování za sucha je patrný i u WL (Obr. 29). U bentonitu zatěžovaného za mokra je změna WL srovnatelná se odchylkou metody.



Obr. 28 Vývoj swell indexu s dobou zatížení teplotou > 100°C.

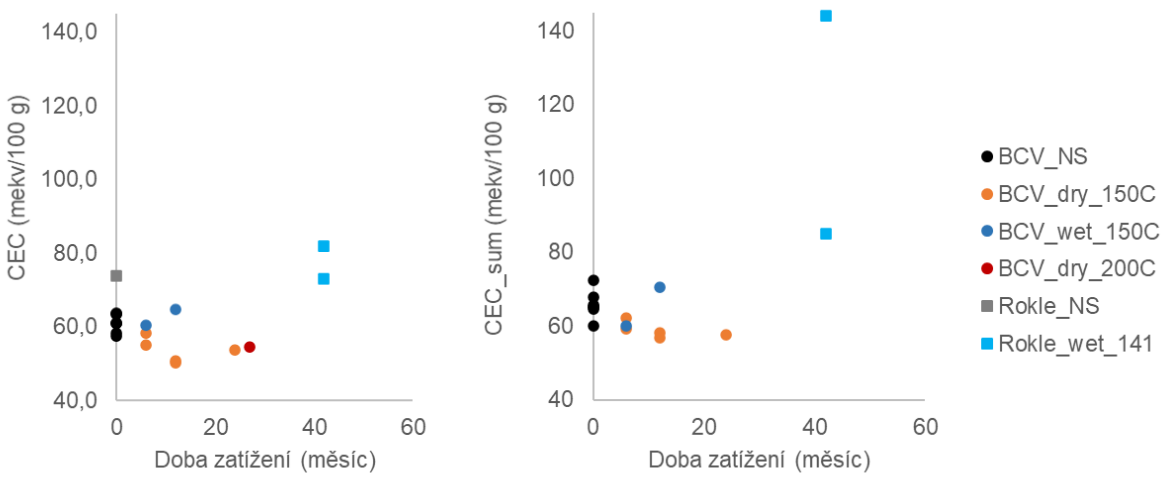


Obr. 29 Vývoj meze tekutosti s dobou zatížení teplotou > 100 °C

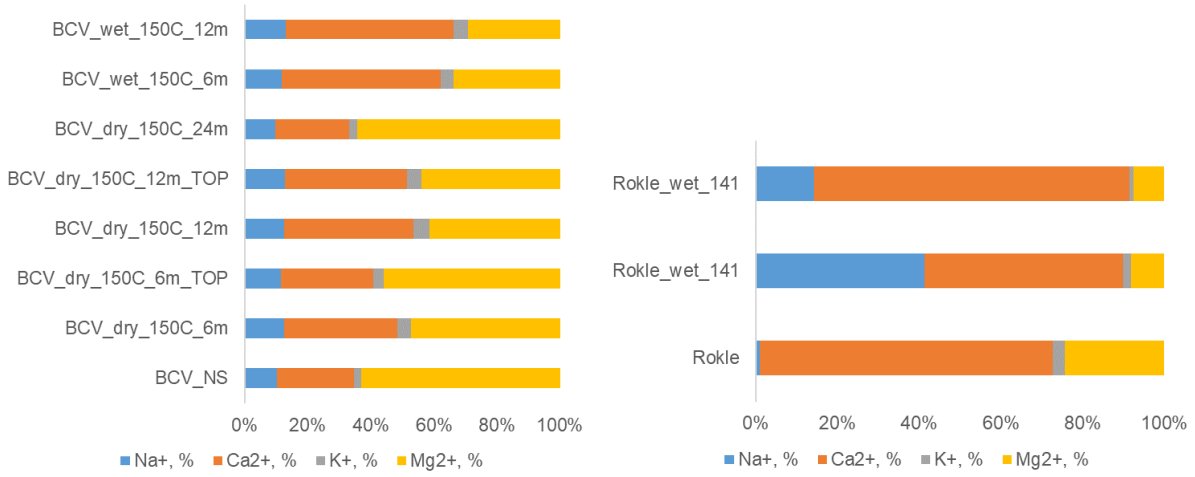
Z geochemicko-mineralogických parametrů byl vliv teploty vyšší než 100 °C pozorován na bentonitu Rokle a BCV. Hodnoty CEC BCV zatěžovaného za sucha při 150 a 200 °C klesají po dobu prvních 12 měsíců a následně po 24 měsících mírně rostou a „vrací“ se na původní hodnotu (Obr. 30). U BCV zatěžovaného za mokra hodnoty CEC i CEC_sum rostou. Z poměru vyměnitelných kationtů je patrný nárůst podílu Ca^{2+} na úkor Mg^{2+}. Mimo tento trend stojí složení vyměnitelných kationtů BCV zatěžovaného za sucha po dobu 24 měsíců (Obr. 31), kdy se poměr kationtů „vrací“ do výchozího stavu. Vývoji CEC odpovídá i vývoj SSA_EGME. U BCV zatěžovaného za sucha hodnoty klesají, u BCV zatěžovaného za mokra rostou (Obr. 32).

Dlouhodobý vývoj CEC a CEC_sum ukazují hodnoty bentonitu Rokle z ABM experimentu (Obr. 30). Po více jak 3 letech sycení Na-Ca-Cl vodou a zatěžování při 141 °C došlo k nárůstu CEC i CEC_sum. U bentonitu Rokle došlo k poklesu Mg^{2+} a nárůstu Na^{+} (Obr. 31). Na změně vlastností bentonitu Rokle se výraznou měrou podílela kromě teploty salinita sytícího media (Dohrmann a Kaufhold 2017).

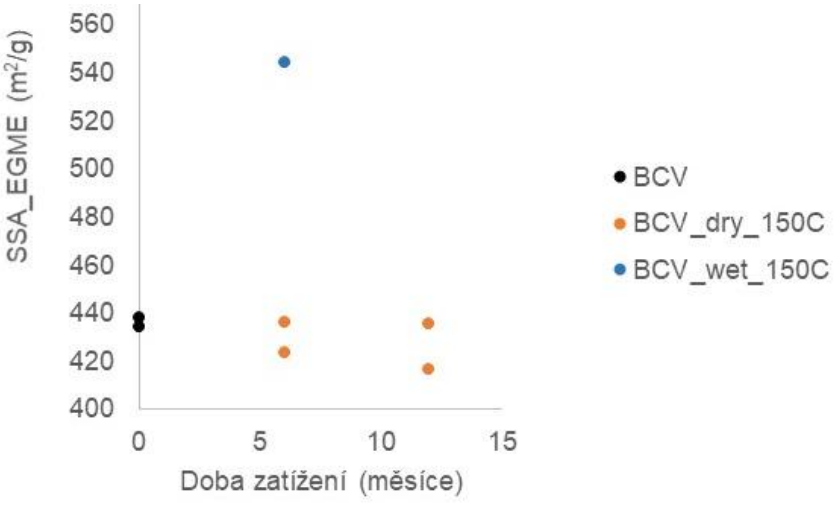
Při kontinuálním zatěžování bentonitu Rokle bez vlivu vody v teplotním rozsahu o 100-500 °C s krokem 50 °C došlo k poklesu hodnot CEC z 35-40 mekv/100 g na 25-30 mekv/100 g. Tento pokles lze přisuzovat změnám ve smektitu v důsledku teplotního zatěžování (Přikryl 2003, 2004).



Obr. 30 Vývoj CEC (vlevo) a CEC_sum (vpravo) BCV zatěžovaného při 150 a 200 °C za sucha (dry) i za současného působení vody (wet).



Obr. 31 Vývoj zastoupení vyměnitelných kationtů: (vlevo) BCV zatěžovaného při 150 (150C) a 200 °C (200C) za sucha (dry) i za současného působení vody (wet) a (vpravo) bentonitu Rokle syceného Na-Ca-Cl vodou a zatěžovaného při 141 °C . m – měsíce, TOP – několik mm silná horní vrstva.



Obr. 32 Vývoj SSA_EGME BCV zatěžovaného při 150 °C za sucha (dry) i za působení vody (wet).

3.3.2 Mikrobiologické parametry

U bentonitu BCV byla dále testována sterilizace pomocí tepla (opakované) cykly zahřívání na 120 °C a dále dlouhodobé vystavení vysokým teplotám (150 °C). Teplotní sterilizace byla testována na prášku i suspenzi, dlouhodobé zahřívání jen na bentonitovém prášku (Tab. 15). Ve všech případech byly vzorky po vystavení zátěži v suspendované podobě inkubovány v anaerobních podmínkách za účelem detekce možné regenerace z dormantních stádií, podrobný popis metodiky (Černá et al. 2020; Černá et al. 2022).

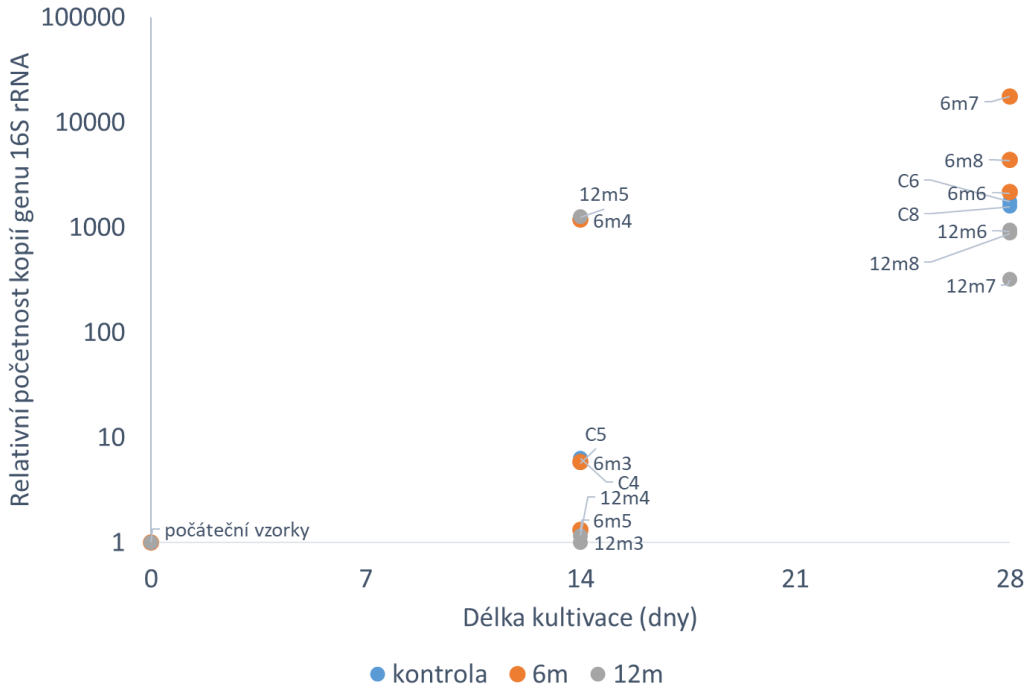
Bentonitový prášek BCV vystavený teplotě 150 °C 6 měsíců a 12 měsíců v rámci projektu EURAD HITEC byl inkubován 14 a 28 dnů v anaerobních podmínkách za účelem detekce schopnosti mikroorganismů přežívat extrémní podmínky časné fáze ukládání RAO studované v projektu TAČR BioBen. Podrobný popis experimentu je uveden v Kašpar et al. (2021). Vzorky byly analyzovány pouze geneticky. V obou případech byl obdobně jako v inkubovaném kontrolním vzorku zjištěn nárůst mikrobiální abundance v průběhu inkubace a žádný ze vzorků tedy nebyl pokládán za zcela sterilní. Nicméně relativní početnosti mikroorganismů s délkou teplotního zatěžování prášku významně poklesly. U teplotně zatěžovaných vzorků byl v případě 6 měsíční zátěže zjištěn nárůst rodů *Bacillus, Thermincola* a zástupců čeledi *Symbiobacteraceae*, v případě 12-měsíční zátěže pak rod *Thermincola*.

Tab. 15 Počet podvzorků a vyhodnocení analýz provedených na vzorcích bentonitu BCV zatěžovaného teplotou > 100 °C.

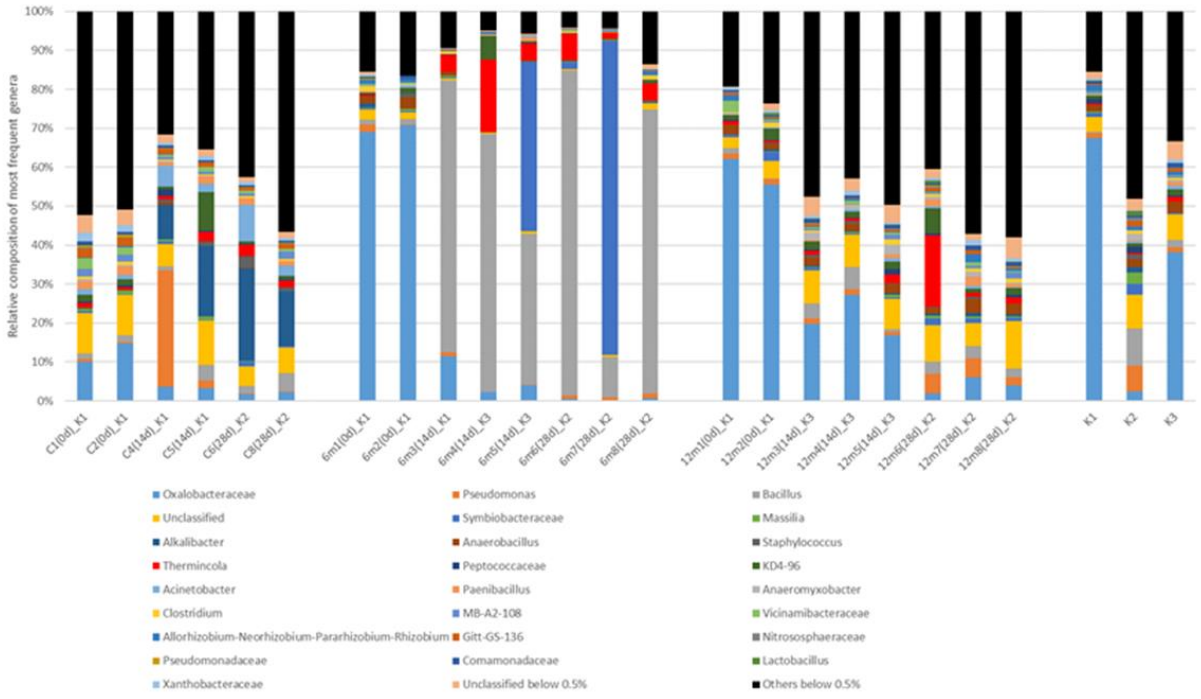
			Podmínky inkubace				MB2_EB	MB2_K	MB2_qPCR		MB3_NGS	Analýza					
Typ zátěže	Počet podvzorků	Popis vzorku	atmosféra	doba inkubace, d	přídavek živin (vypsat)	teplota, °C	přítomnost živých buněk	SRB,NRB,IRB	16S rRNA RQ	16S rRNA Cq	max 5 nejčetnějších rodů	mikroorganismy detekovány	mikrobiální aktivita	SRB aktivita/kultivovatelnost	NRB aktivita/kultivovatelnost	IRB aktivita/kultivovatelnost	limitní hodnota nutná pro potlačení MB aktivity
BCV prášek 150°C Kašpar et al. (2021)	8	susp 1:5_0.5_y	anaerobní	0-28	H2	lab	N.A.	N.A.	nárůst s délkou inkubace	N.A.	Bacillus; Thermincola; Symbiobacteraceae	ano	ano	N.A.	N.A.	N.A.	>1,5y 150°C
	8	susp 1:5_1.0_y	anaerobní	0-28	H2	lab	N.A.	N.A.	nárůst s délkou inkubace	N.A.	Thermincola	ne	ne	N.A.	N.A.	N.A.	
	4	susp 1:5_IN	anaerobní	0-28	H2	lab	N.A.	N.A.	nárůst s délkou inkubace	N.A.	Alkalibacter; Acinetobacter; Pseudomonas, Symbiobacteraceae; Thermincola	ano	ano	N.A.	N.A.	N.A.	
BCV prášek sterilizace 120°C Černá et al. (2022)	9	prášek_1-9xsteril	anaerobní	N.S.	H2	lab	ne	pozitivní do 9x	N.A.	neg	pozadí(1-9x)	ano	ne	do 6x	do 9x	do 2x	>9 x 120°C
	9	prášek_1-9xsteril_30d	anaerobní	30	H2	lab	ano do 6x	N.A.	N.A.	pozitivní do 6x	Paenibacillus; Brevibacillus, Thermincola (1-9x)	ano	ano	N.A.	N.A.	N.A.	
BCV suspenze sterilizace 120°C Černá et al. (2022)	11	susp 1:5_1-9xsteril	anaerobní	N.S.	H2	lab	ano do 2x	pozitivní do 2x	N.A.	pozitivní do 2x	Paenibacillus, Braevibacillus, Bacillus(1x)/pozadí(9x)	do 2x	do 2x	do 2x	do 2x	do 2x	>2 x 120°C
	11	susp 1:5_1xsteril_30d	anaerobní	30	H2	lab	ano do 2x	N.A.	N.A.	pozitivní do 2x	Paenibacillus, Braevibacillus, Bacillus, Aneurinibacillus(1x)/ pozadí(6x)	do 2x	do 2x	N.A.	N.A.	N.A.	

Dále byla u bentonitu BCV studována sterilizace opakovaným vystavením suspenze a prášku teplotě 120 °C po dobu několika hodin (podrobná metodika viz Černá et al. 2022). Genetickými metodami byl studován nárůst mikrobiální aktivity u inkubovaných vzorků sterilizovaných 1 - 9×, u všech sterilizovaných vzorků byly provedeny též kultivace a extrakce buněk za účelem stanovit

kultivovatelnost a detekovat přítomné živé buňky v suspenzích (Obr. 33-Obr. 34, Příloha 2-Příloha 3).



Obr. 33 BCV zatěžovaný 150 °C - qPCR analýza 16S rDNA genu ukazující změny v relativní početnosti a zastoupení mikrobiálních rodů detekovaných pomocí NGS v anaerobně inkubovaných suspenzích z teplotně zatěžovaného prášku. C - kontrolní teplotně nezatěžovaný BCV prášek. Upraveno dle Kašpar et al (2021).



Obr. 34 BCV zatěžovaný 150 °C - zastoupení mikrobiálních rodů detekovaných pomocí NGS v anaerobně inkubovaných suspenzích z teplotně zatěžovaného prášku. C - kontrolní teplotně nezatěžovaný BCV prášek, K - izolační kontroly. Upraveno dle Kašpar et al (2021).

V případě bentonitového prášku byla zjištěna přítomnost kultivovatelných buněk i po 9 cyklech sterilizace. V suspendovaném a 30 dnů anaerobně inkubovaném prášku byl genetickými metodami detekován nárůst mikrobiální aktivity i v 6× sterilizovaných vzorcích (9× sterilizované vzorky nebyly dosud analyzovány), viz Tab. 15. Sterilizace bentonitového prášku opakovanými teplotně-sterilizačními cykly se tedy ukázala jako nefungující.

V případě bentonitové suspenze se teplotní sterilizace ukázala jako mnohem funkčnější metoda. Kombinací všech výše uvedených metod bylo dokázáno, že k rozvoji mikrobiální aktivity ani ke kultivaci a regeneraci přirozených mikroorganismů nedochází již po druhém cyklu sterilizace (Tab. 15). Rozdíl v obsahu vody mezi suspenzí a práškem tedy vyznaným způsobem ovlivňuje teplotní odolnost přirozených bentonitových mikroorganismů.

3.4 Složení vody (Josef, SGW2, SGW3) bez vlivu teploty

Hodnocení stability bentonitu v kontaktu se sytícími médii o různém chemickém složení (vody Josef, SGW2, SGW3) bez vlivu teploty vychází z 6 experimentů:

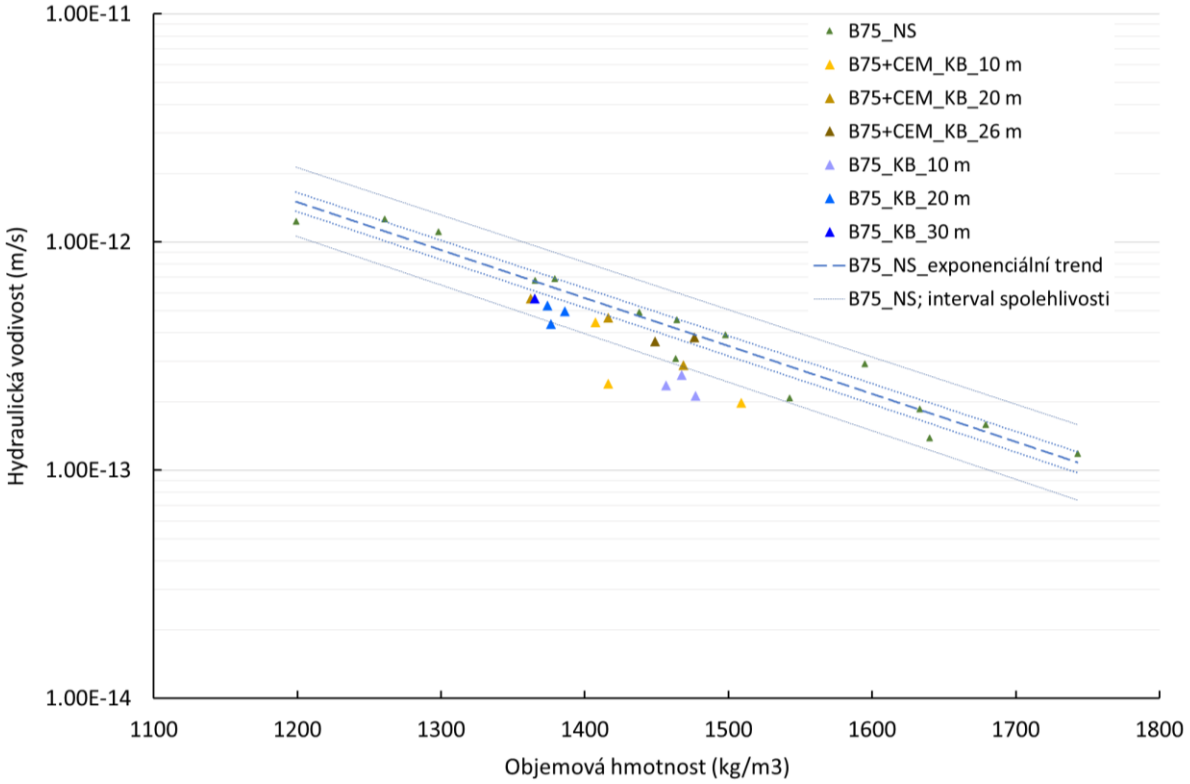
- **Bentonit Rokle** kompaktovaný na objemovou hmotnost 1400 kg/m^3 a následně zatěžovaný podzemní vodou „Josef“ za in-situ podmínek. Odběry byly poté provedeny po 3, 6, 12 a 18 měsících. (Pacovský et al. 2010, Křížová et al. 2010).
- **Bentonit Rokle** kultivovaný v různých kultivačních médiích po dobu 3-10 týdnů (Svensson et al. 2011).
- **Bentonit BaM** ve formě suspenze inkubovaný za anaerobních podmínek za přítomnosti podzemní vody VITA, SBPOW či dalších nutrientů (Černík et al. 2018, Černá et al. 2019, Shrestha et al. 2022).
- **Bentonit BaM** kompaktovaný na 1600 kg/m^3 sycený vodami DW, SGW-UOS, SGW2 a SGW3 při laboratorní teplotě po dobu 8 týdnů (Červinka et al. 2019).
- **Bentonit BCV** v podobě suspenze inkubovaný 0-140 dnů za dostupnosti různých druhů živin v anaerobních podmínkách (Černá et al. 2020).
- **Bentonit BCV** v kompaktované podobě (ρ_D = 1200 kg/m^3) inkubovaný 1-3 měsíce za dostupnosti různých druhů živin v anaerobních podmínkách (Černá et al. 2022).

3.4.1 Geochemické, mineralogické a geotechnické parametry

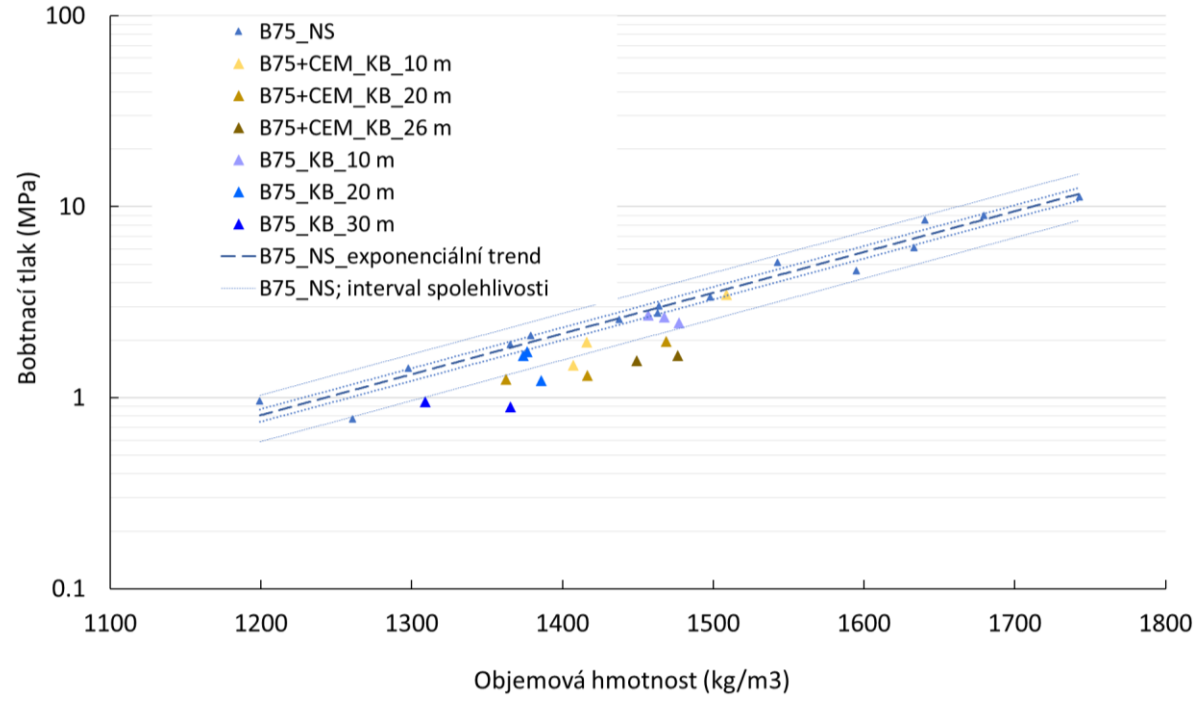
Vystavení in-situ podmínkám se na mechanických a hydraulických parametrech významně neprojevilo. Z důvodu nedostatku dat a malého rozpětí zkoušených objemových hmotností nebylo možné provést vyhodnocení trendů těchto parametrů v závislosti na době zatěžování. V grafech na Obr. 37-Obr. *40* je možné pozorovat data v kontextu nezatíženého bentonitu Rokle a v grafech na Obr. *35*-Obr. *36* jsou vizualizována data měřená na bentonitu B75. Na bentonitu Rokle není pozorována žádná změna bobtnacího tlaku, ani hydraulické vodivosti vlivem vystavení in-situ podmínkám. V případě meze tekutosti byl po prvních třech měsících expozice in-situ podmínkám zaznamenán pokles meze tekutosti, která se však s dobou vystavení podzemním podmínkám již dále významně neměnila. Průběh vývoje meze tekutosti je možné pozorovat na Obr. 39.

U bentonitu B75 je zaznamenán pokles hydraulické vodivosti po 10 měsících ve vrtu, a to v případě samotného bentonitu i bentonitu v kombinaci s cementem. Hodnoty se však po delší době expozice in-situ podmínkám vrací do oblasti hodnot odpovídajícím intervalu spolehlivosti neovlivněného bentonitu. V případě bobtnacího tlaku je také zaznamenán pokles hodnot po

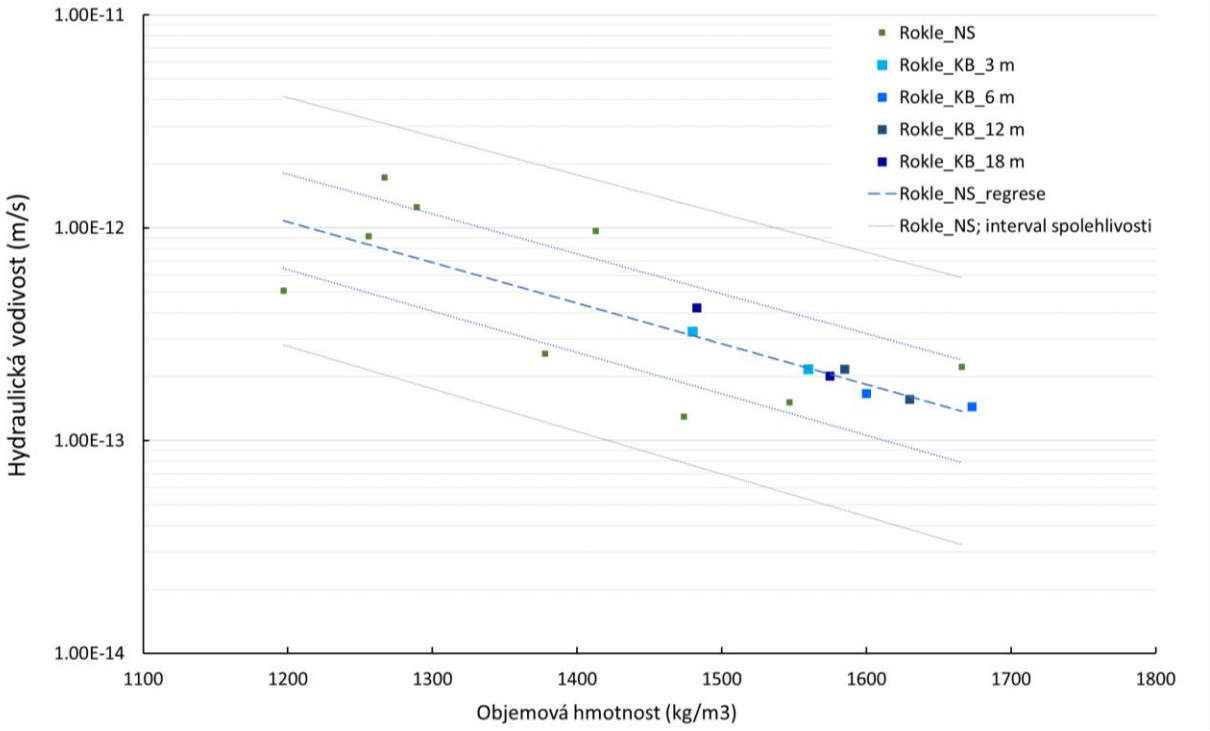
zatížení, který se však týká všech časových intervalů zatížení. Vliv in situ podmínek se tudíž projeví zejména na bobtnacím tlaku, a to zejména na vzorcích odebraných z patron s cementem.



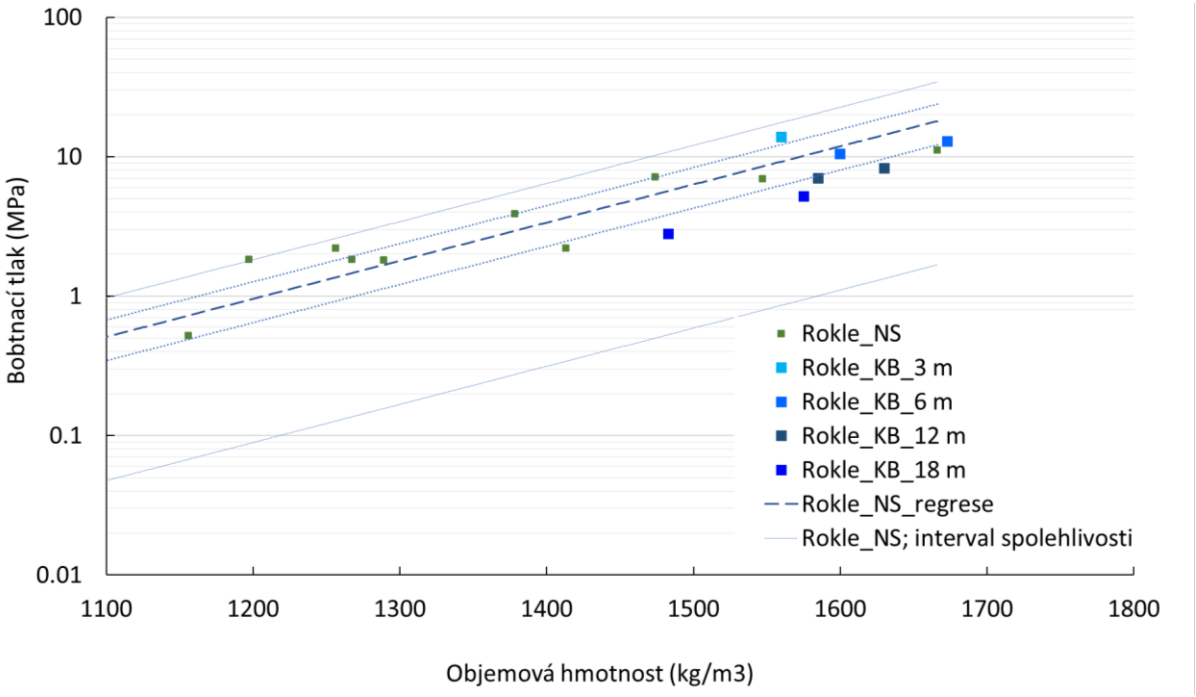
Obr. 35 *Porovnání hydraulické vodivosti bentonitu B75_NS a bentonitu B75 umístěného v perforovaných patronách a vystaveného in situ podmínkám v podzemí a vodě Josef. Jeden typ experimentu byl proveden jen s kompaktovaným bentonitem, druhý typ experimentu zahrnoval cementové válečky, které se ve vrtu střídaly s bentonitovými válečky.*



Obr. 36 Porovnání bobtnacího tlaku bentonitu B75_NS a bentonitu B75 umístěného v perforovaných patronách a vystaveného in situ podmínkám v podzemí a vodě Josef. Jeden typ experimentu byl proveden jen s kompaktovaným bentonitem, druhý typ experimentu zahrnoval cementové válečky, které se ve vrtu střídaly s bentonitovými válečky.



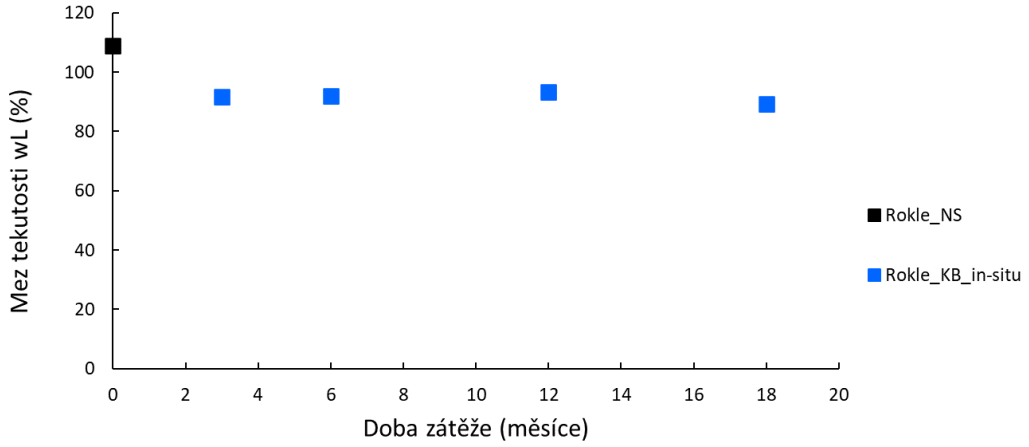
Obr. 37 Porovnání hydraulické vodivosti bentonitu Rokle_NS a bentonitu Rokle umístěného v perforovaných patronách a vystaveného in situ podmínkám v podzemí a vodě Josef po různě dlouhou dobu.



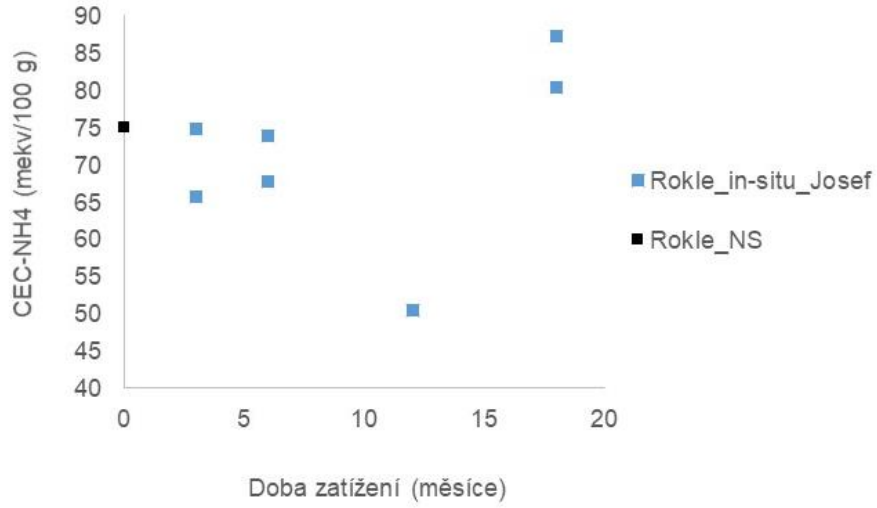
Obr. 38 Porovnání bobtnacího tlaku bentonitu Rokle_NS a bentonitu Rokle umístěného v perforovaných patronách a vystaveného in situ podmínkám v podzemí a vodě Josef po různě dlouhou dobu.

In-situ zatěžování bentonitu Rokle vodou Josef se projevilo výrazným kolísáním hodnot CEC po celou dobu zatěžování (Obr. *40*). Hodnoty CEC nelze porovnat s jinými experimenty, protože byly stanoveny metodou CEC_NH_4. PXRD analýza zatěžovaných vzorků neukázala žádné systematické změny ve složení bentonitu ani ve struktuře smektitu (Křížová et al. 2010).

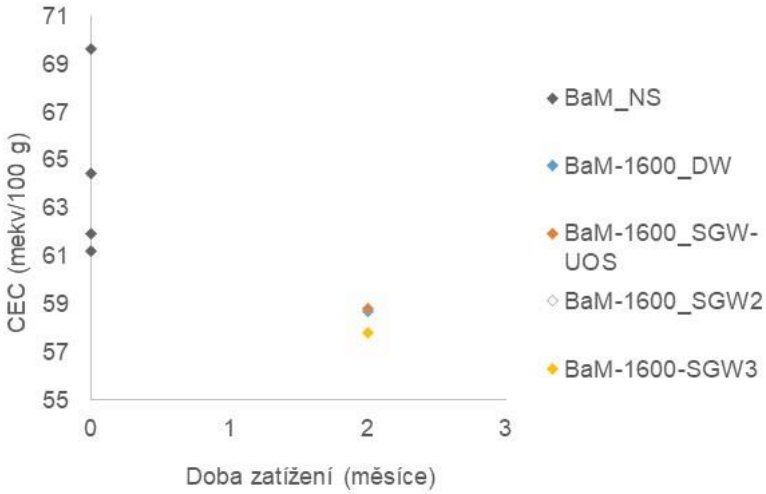
U bentonitu BaM kompaktovaného na 1600 kg/m^3 a zatěžovaného vodami SGW, SGW2 a SGW3 se vliv chemismu vod na CEC neprokázal (Obr. 41). CEC bentonitu BaM zatěžovaného SGW vodami poklesla stejně jako CEC BaM zatěžovaného destilovanou vodou. Pokles CEC oproti BaM_NS je srovnatelný s odchylkou měření.



Obr. 39 Vývoj meze tekutosti bentonitu Rokle kompaktovaného na 1200 kg/m^3 a syceného vodou Josef za in-situ podmínek.



Obr. 40 *Vývoj CEC-NH_4 bentonitu Rokle kompaktovaného na 1200 kg/m^3 a syceného vodou Josef za in-situ podmínek.*



Obr. 41 Porovnání CEC BaM_NS a BaM kompaktovaný na 1600 kg/m^3 sycený vodami DW, SGW-UOS, SGW2 a SGW3 při laboratorní teplotě po dobu 2 měsíců.

3.4.2 Mikrobiologické parametry

Z mikrobiologického hlediska v této kapitole shrnujeme poznatky ohledně rozvoje mikrobiální aktivity v závislosti na dostupnosti různých živin v médiu, které bylo v kontaktu s bentonitem. Zaměřujeme se na vývoj mikrobiálního osídlení v anaerobních podmínkách. Rozdíl mezi aerobním a anaerobním prostředím je diskutován v kap. 3.1.2. Pro úplnost jsou zde na ukázku též zahrnuty vlivy dostupnosti takových živin, jako je vodík či např. práškové železo, jež je podrobněji rozebírán též v kap. 3.5.2. Celkově byly analyzovány suspenze BCV a BaM, bentonit Rokle ve formě prášku kultivovaný v různých médiích a dále bentonit BCV v kompaktovaném stavu (Tab. 16).

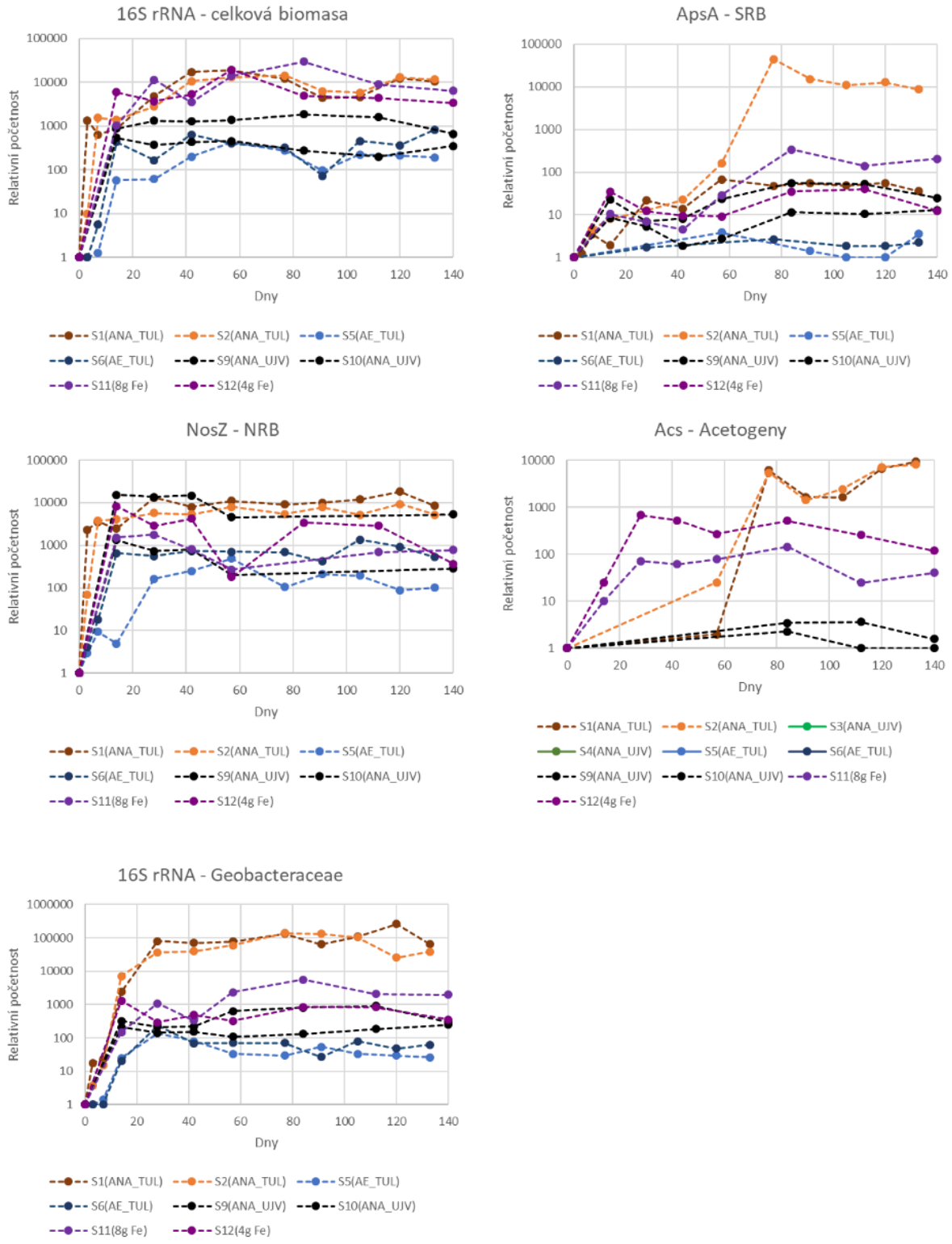
U suspenzí BCV docházelo v anaerobních podmínkách k rozvoji aktivity anaerobních skupin mikroorganismů a jejich aktivita závisela na přítomnosti přidaných živin. K nejvyšším nárůstům relativní abundance docházelo za přídavku H_2 či práškového železa (Obr. 42), jež oba slouží

mikroorganismům jako donory elektronů pro energetický metabolismus. Dominovaly zde různé druhy NRB jako je *Pseudomonas, Bacillus, Noviherbaspirillum, Massilia*, čeleď *Symbiobacteraceae* či IRB (*Thermincola*) či zástupci metabolicky versatilní čeledi *Peptococcaceae*, kam patří kromě rod *Thermincola* též různí zástupci SRB (Stackebrandt 2014). U všech typů anaerobních inkubací byl v čase detekován nárůst relativní abundance obligátně anaerobních IRB či SRB (Obr. 42).

K podobnému postupnému rozvoji anaerobních skupin mikroorganismů v čase docházelo také v anaerobně inkubovaných suspenzích bentonitu BaM (Obr. 43). U vzorků s přídavkem živin, podobně jako u bentonitu BCV, docházelo k rozvoji významně vyššího množství mikroorganismů (Obr. 43) a byl též pozorován mírný posun ve složení mezi oběma typy vzorků. Mezi nejhojnější detekované rody napříč podvzorky patřily NRB rody *Pseudomonas, Noviherbaspirillum, Massilia* nebo *Methyloversatilis* či IRB rody *Thermincola* a *Citrifermentans*. (Tab. 16).

Tab. 16 Počet podvzorků a vyhodnocení analýz provedených na vzorcích bentonitů inkubovaných v prostředí s různou dostupností živin.

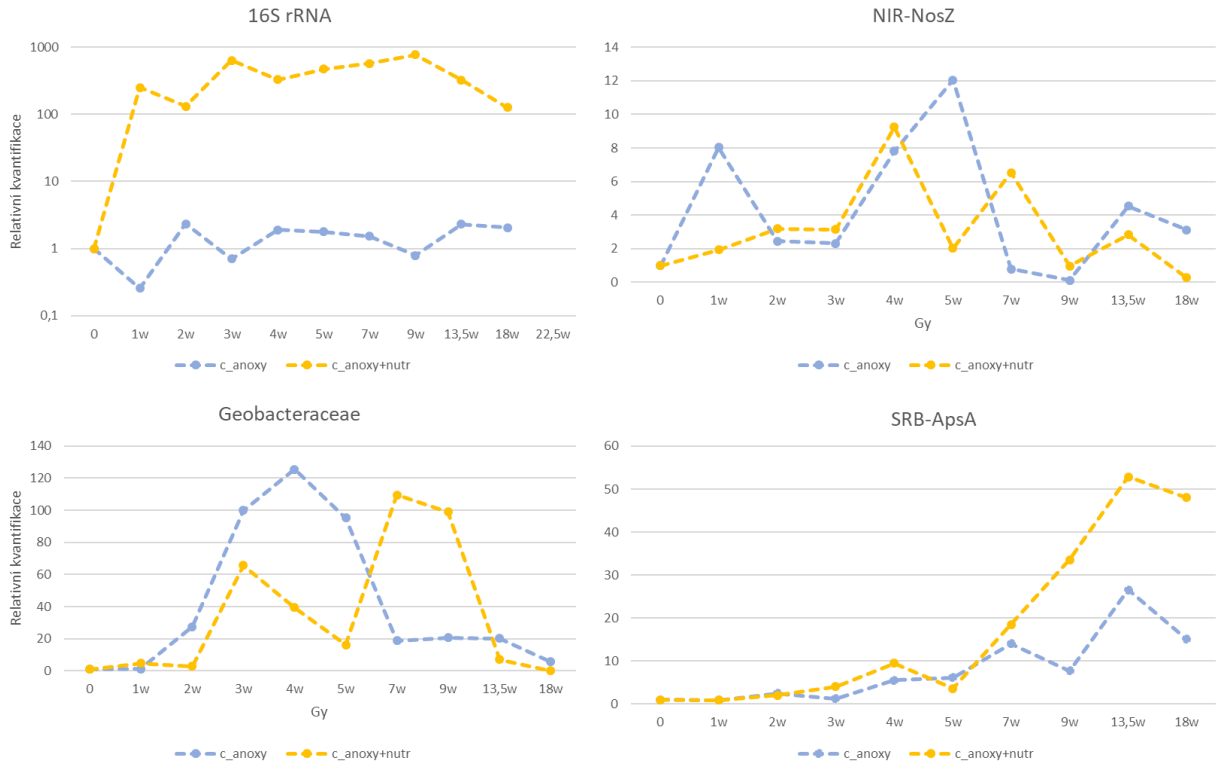
		Podmínky inkubace					MB1	MB2_EB	MB2K	MB2_qPCR						MB3-NGS	MB4		Vyhodnocení					
	Počet podvzorků	Typ vzorku	Atmosféra	Teplota, °C	Doba inkubace, d	Přídavek živin	Typ izolace DNA	přítomnost živých buněk	použité médium(+pozitivní/-negativní)	16S rRNA RQ	Geobacteraceae(16S rRNA) RQ	NRB(NirK) RQ	NRB(NosZ) RQ	SRB(ApsA) RQ	Acetogeny(Acs) RQ	Nejčastější rody	detekce produkce Cu35S	detekce produkce acetátu (umol/gdw)	Mikroorganismy detekovány	Mikrobiální aktivita	SRB aktivita/kultivovatelnost	NRB aktivita/kultivovatelnost	IRB aktivita/kultivovatelnost	AA aktivita/kultivovatelnost
BCV suspenze Černá et al. (2020)	40	suspenze 1:5	ANA	lab	0-133	H2	EKK	ano	SBM + PGM +	nárůst	nárůst	N.A.	nárůst	nárůst	N.A.	Noviherbaspirillum; Peptococcaceae, Bacillus, Thermincola; Paenibacillus, Pseudomonas	N.A.	N.A.	ano	ano	ano/ano	ano/ano	ano	ano
	26	suspenze 1:5	ANA	lab	0-140	ne	EKK	ano	N.A.	nárůst	nárůst	N.A.	nárůst	nárůst	stagnace	Noviherbaspirillum; Anaerobacillus;Peptococcaceae; Thermincola; Pseudomonas; Symbiobacteraceae, Bacillus	N.A.	N.A.	ano	ano	ano	ano	ano	ne
	16	suspenze 1:5	ANA	lab	0-140	práškové Fe	EKK	N.A.	N.A.	nárůst	nárůst	N.A.	nárůst	nárůst	nárůst	Peptococcaceae, Thermincola; Noviherbaspirillum; Anaerobacillus, Symbiobacteraceae	N.A.	N.A.	ano	ano	ano	ano	ano	ano
	10	suspenze 1:5	ANA	lab	39-49	ne+H2	EKK	ano	N.A.	nárůst	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	Pseudomonas, Bacillus, Oxalobacteraceae, Anaerobacillus, Massilia	N.A.	N.A.	ano	ano	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
BCV KB Černá et al. (2022)	2	KB 1200 kg/m3	ANA	lab	30-90	ne	EKK	N.A.	N.A.	Cq = 20-25	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	Streptomyces, Micromonospora, Desulfosporosinus, Staphylococus, KD4-92	N.A.	N.A.	ano	ano	ano?	N.A.	N.A.	N.A.
	2	KB 1200 kg/m3	ANA	lab	30-90	práškové Fe	EKK	N.A.	N.A.	Cq = 20-25	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	Desulfosporosinus, KD4-92, MB-A2-108	N.A.	N.A.	ano	ano	ano	N.A.	N.A.	N.A.
	2	KB 1200 kg/m3	ANA	lab	30-90	ex - MgSO4	EKK	N.A.	N.A.	Cq = 20-25	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	Streptomyces, Micromonospora, Desulfosporosinus, Paenibacillus; KD4-92	N.A.	N.A.	ano	ano	ano?	N.A.	N.A.	N.A.
	2	KB 1200 kg/m3	ANA	lab	30-90	ex - Mg-acetát	EKK	N.A.	N.A.	Cq = 20-25	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	Streptomyces, Micromonospora, Paenibacillus; Desulfosporosinus, KD4-92, Bacillus	N.A.	N.A.	ano	ano	ano?	N.A.	N.A.	N.A.
	2	KB 1200 kg/m3	ANA	lab	30-90	ex - Mg-acetát+MgSO4	EKK	N.A.	N.A.	Cq = 20-25	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	Streptomyces, Micromonospora,KD4-92; Desulfosporosinus	N.A.	N.A.	ano	ano	ano?	N.A.	N.A.	N.A.
	2	KB 1200 kg/m3	ANA	lab	30-90	ex - PGM	EKK	N.A.	N.A.	Cq = 20-25	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	Desulfosporosinus, Sedimentibacter, Clostridium, Sporacetogenium, Micromonospora	N.A.	N.A.	ano	ano	ano	N.A.	N.A.	N.A.
	2	KB 1200 kg/m3	ANA	lab	30-90	in - MgSO4+Mg-acetát	EKK	N.A.	N.A.	Cq = 20-25	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	Micromonospora; KD4-92, Streptomyces	N.A.	N.A.	ano	ano	ne	N.A.	N.A.	N.A.
	2	KB 1200 kg/m3	ANA	lab	30-90	H2	EKK	N.A.	N.A.	Cq = 20-25	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	Streptomyces, Alkalibacter, Desulfosporosinus, Micromonospora; KD4-92; Ralstonia	N.A.	N.A.	ano	ano	ano?	N.A.	N.A.	N.A.
Rokle prášek Svensson et al. (2011)	1	prášek	ANA	lab	1t	CHAB médium	N.S.	ne	CHAB+	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	ano	N.A.	N.A.	ano	N.A.	N.A.
		prášek	ANA	lab	3-10 t	SRB(síran-redukující médium s laktátem)	N.S.	ne	SRB+	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.D.	N.D.	ano	ne?	ne/ano	N.A.	N.A.	N.A.
		prášek	ANA	lab	3-10 t	AA(síran-redukující médium s H2)	N.S.	ano+	AA+	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.D.	<10-30x enriched	ano	ano	ne	N.A.	N.A.	ano/ano
		prášek	AE	lab	3-10 t	IRB(médium bez přídavku)	N.S.	ano+	IRB+	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.D.	5x enriched	ano	ano	ne	N.A.	ano	ano?/ano
		prášek	ANA	50°C	3t	SRB(síran-redukující médium s laktátem)	N.S.	ano+	SRB+	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	5-10x enriched	N.D.	ano	ano	ano/ano	N.A.	N.A.	N.A.
		prášek	ANA	50°C	3t	AA(síran-redukující médium s H2)	N.S.	ano+	AA+	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	5x enriched	50-120x enriched	ano	ano	ano/ano	N.A.	N.A.	ano/ano
BaM suspenze Černík et al. (2018); Černá et al. (2019); Shrestha et al. (2022)	3	suspenze 1:3,33	ANA	lab	7-30	ne	EFCH	N.A.	N.A.	nárůst	nárůst	N.A.	nárůst	N.D.	N.A.	Pseudomonas, Noviherbaspirillum, Thermincola	N.A.	N.A.	ano	ano	ne	ano	ano	N.A.
	21	suspenze 1:3,3(1:6, 67)	ANA	lab	0-126	VITA	EFCH	N.A.	N.A.	nárůst	nárůst	nárůst	nárůst	nárůst	N.A.	Noviherbaspirillum; Pseudomonas; Thermincola; Lacunisphaera; Massilia; Citrifermentans	N.A.	N.A.	ano	ano	ano	ano	ano	N.A.
	8	suspenze 1:3,33	ANA	lab	0-126	VITA + acetát, síran, dusičnan	EKK	N.A.	N.A.	nárůst	nárůst	N.A.	nárůst	nárůst	N.A.	Azospira, Methyloversatilis, Noviherbaspirillum, Caenimonas, Hydrogenophaga, Sphingobium/ Thermincola; Lacunisphaera; Noviherbaspirillum	N.A.	N.A.	ano	ano	ano	ano	ano	N.A.



Obr. 42 Vývoj relativních početností mikroorganismů v bentonitu BCV inkubovaném za různých přídavků živin. TUL - vzorky inkubované za přídavku H_2, UJV - vzorky inkubované bez přidaných donorů elektronů. 4/8g Fe - vzorky s přídavkem práškového železa. AE - aerobní inkubace, ANA - anaerobní inkubace. Upraveno dle Černá et al. (2020).

V případě bentonitu Rokle existují publikovaná data o inkubacích vstupního prášku v různých kultivačních médiích specifických pro SRB, IRB či AA ze dvou různých teplot (Svensson *et al.* 2011). I zde je patrné, že složení média ovlivňuje rozvoj konkrétních skupin mikroorganismů a významnou roli dále hraje i teplota. Nárůst metabolické aktivity SRB byl zjištěn pouze v případě zahřívaných vzorků, a to v médiu s přídavkem laktátu či H_2. Metabolická aktivita acetogenů byla detekována v médiu s přídavkem H_2 v obou teplotách a v menší míře také v médiu bez přídavku dalších donorů elektronů (Tab. 16). Genetická data ukazující přesné taxonomické složení kultivovaných vzorků nejsou známa.

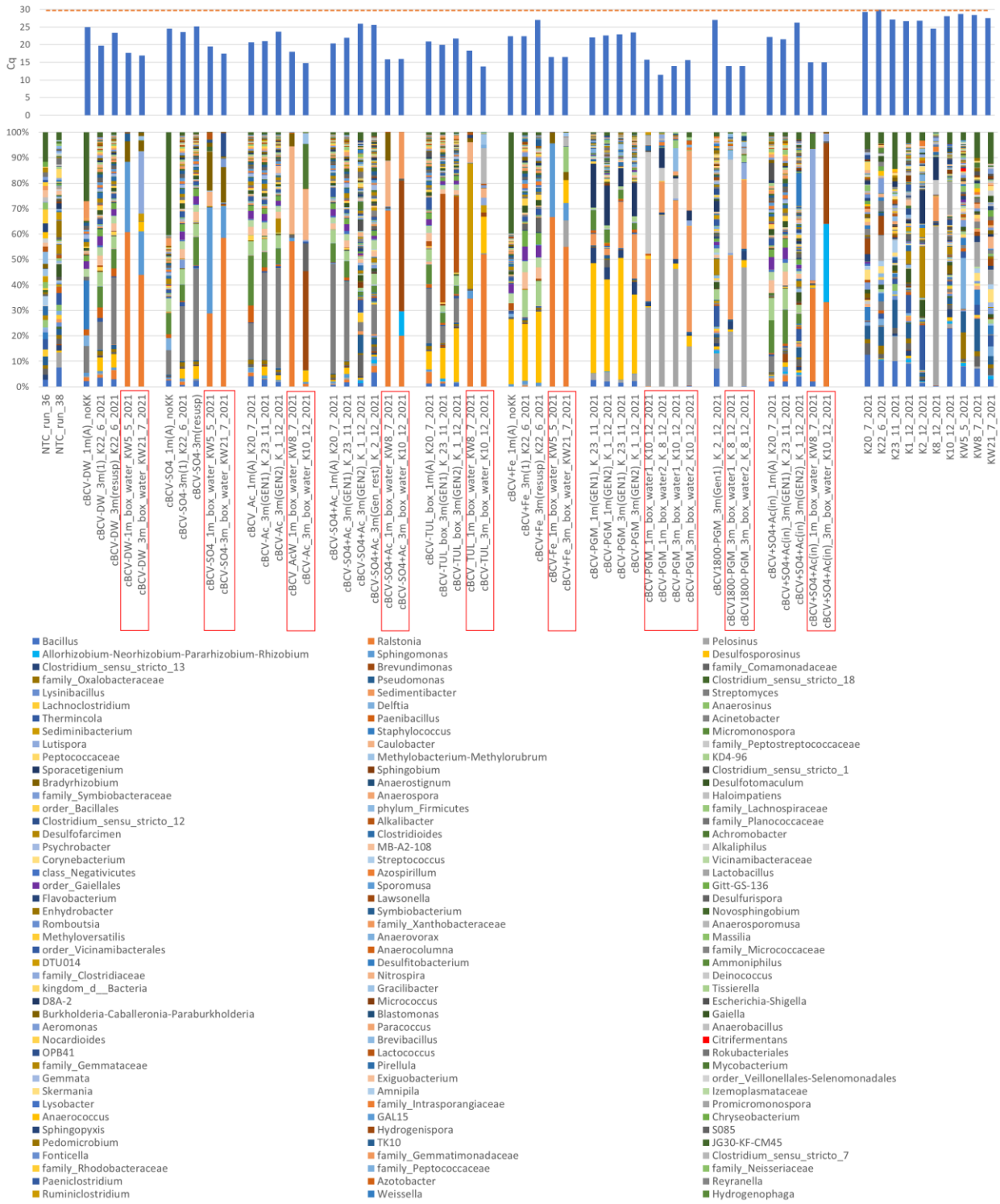
V případě inkubace kompaktovaných bentonitů o jednotné suché objemové hmotnosti 1200 kg/m^3 došlo ve všech případech k rozvoji mikrobiální aktivity v čase (Tab. 16). Nebyla zde provedena relativní kvantifikace, ale ve zdrojové zprávě byly uvedené přímo hodnoty kvantifikačních cyklů Cq, které se u všech podvzorků pohybují v rozmezí 20-25 (Obr. 44) a ukazují na přítomnost mikrobiální aktivity (Černá et al. 2022). Přesnější informace o rozdílech v relativní početnosti mezi podvzorky však nejsou známy.



Obr. 43 Vývoj relativních početností mikroorganismů v bentonitu BaM inkubovaném anaerobně s/bez přídavků nutrientů (c_anoxy+nutr/c_anoxy). Upraveno dle Černá et al. (2019).

Stejně jako v případě suspenzí, detekované mikrobiální složení v kompaktovaných bentonitech odráželo inkubační podmínky (Obr. 43). U podvzorků obsahujících práškové železo či inkubovaných v PGM médiu a v trochu menší míře i za přítomnosti H_2 došlo k dominantnímu rozvoji SRB rodu *Desulfosporosinus.* Tento rod byl detekovaný mezi nejhojnějšími rody také ve většině ostatních podvzorků kompaktovaných bentonitů, ale s nižším zastoupením. Mezi hojné další druhy detekované ve většině podvzorků kompaktovaných bentonitů patří dále běžné bentonitové NRB rody *Streptomyces, Micromonospora, Paenibacillus* či blíže nespecifikovaný taxon KD4-92 (Obr. 44, Příloha 3). Přídavek síranů, acetátu či jejich kombinace neměl významný

efekt na složení mikrobiálního osídlení ve srovnání se vzorkem saturovaným deionizovanou vodou, ale použité koncentrace těchto živin byly poměrně nízké (Černá et al. 2022).



Obr. 44 Výsledky sekvenace u kompaktovaných vzorků BCV s přídavkem živin. Horní graf znázorňuje Cq hodnoty detekované pomocí qPCR, dolní graf pak detekované bakteriální rody a jejich relativní zastoupení. Červenými rámečky jsou vyznačené vzorky sytících roztoků, ve kterých byly kompaktované vzorky umístěné. Označení vzorků odpovídá značení v Tabulka 4. resusp - vzorek KB resuspendovaný v miliQ

vodě přes noc. 1m/3m- délka inkubace vzorku (1 či 3 měsíce). Na konci názvu každého vzorku je uvedena koizolovaná izolační kontrola, jejichž složení je v grafu napravo. Převzato z Černá et al. 2022.

Saturační roztok však nemusí rozvoj mikrobiální aktivity ovlivňovat pouze chemicky, ale může též představovat zdroj bakterií, jako je tomu například u sycení podzemní vodou. Výsledky experimentů se suspenzí BaM ukázaly, že přídavek VITA vody (podzemní voda bohatá na SRB ze štoly Josef) v detekovaném mikrobiálním složení nehrál významnou roli a vzorkům dominovaly typicky bentonitové druhy mikroorganismů podobné bentonitu BCV bez přídavku VITA. Podobně Shrestha et al. (2022) popisuje pouze minimální rozdíl v mikrobiálním složení BaM suspenzí inkubovaných za přítomnosti sterilní a nesterilní VITA vody. K podobným závěrům vedou i výsledky experimentů s kompaktovaným BCV bentonitem popisované výše. Porovnání mikrobiálního složení kompaktovaných bentonitů a odpovídajících saturačních médií jasně ukazuje, že mikrobiální složení saturačního média má zanedbatelný vliv na složení bakterií detekovaných v kompaktovaném bentonitu a obě prostředí spolu tedy komunikují jen velmi omezeně (Obr. 44), což je opakovaně pozorováno též u zahraničních studií.

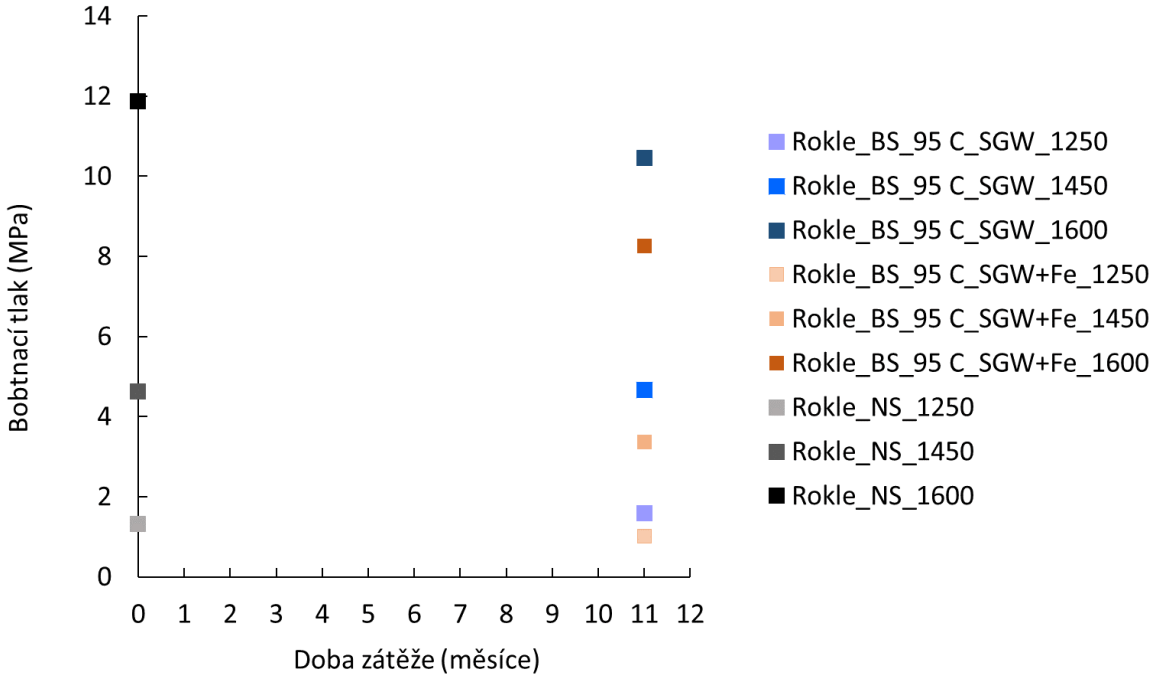
3.5 Stabilita v kontaktu s UOS/práškové Fe za různé teploty

Hodnocení stability bentonitu v kontaktu s UOS nebo s práškovým Fe vychází z 5 experimentů:

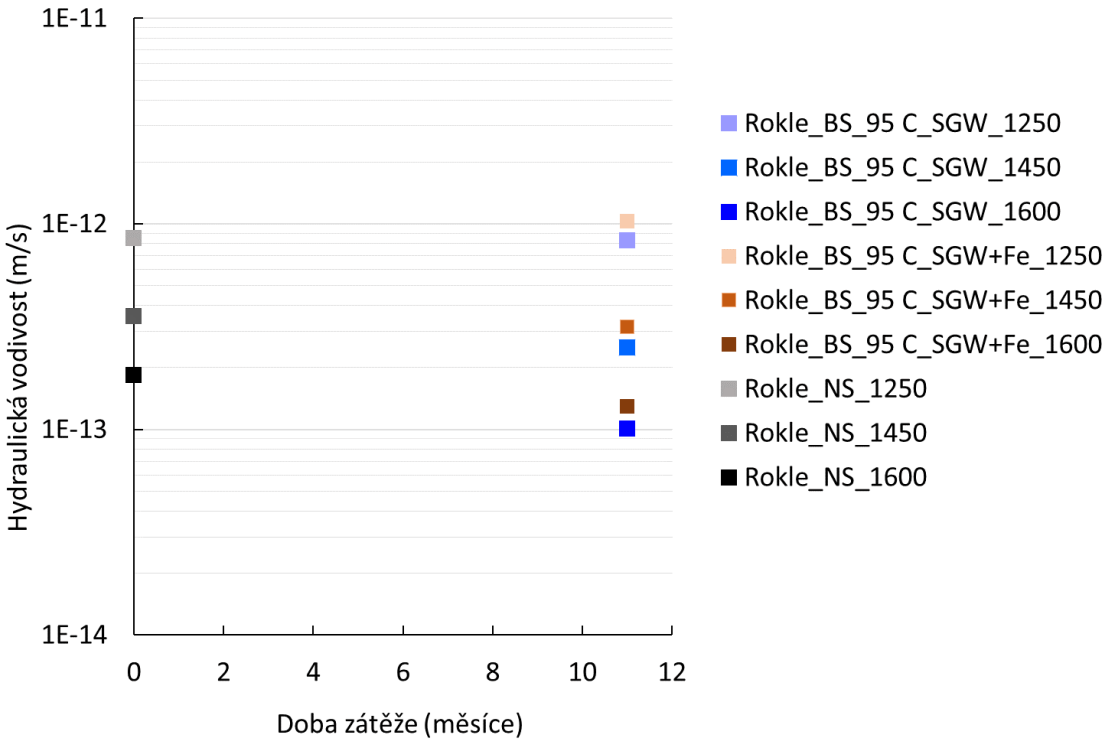
- **Bentonit Rokle** v suspenzi v kontaktu s SGW vodou zatěžovaný při 95 °C s přídavkem práškového Fe po dobu doba zátěže 11 měsíců (Vokál et al. 2008).
- **Bentonit BaM** kompaktovaný na objemovou hmotnost 1600 kg/m^3 sycený SGW-UOS vodou při 70 °C) a kontaktovaný s ocelí 422707.9 po dobu 0,25 – 1,25 roku (Dobrev et al. 2017).
- **Bentonit BaM** kompaktovaný na objemovou hmotnost 1600 kg/m^3 sycený SGW-UOS vodou při laboratorní teplotě, 40 °C a 70 °C) a kontaktovaný s ocelí a práškovým Fe po dobu 0,25 – 1,25 roku (Gondolli et al. 2018a, 2018b).
- **Bentonit BaM** v kompaktovaném stavu (ρ_D = 1500 kg/m^3) zatěžovaný 70 °C 1-4 roky v in-situ podmínkách (Dobrev et al. 2020).
- **Bentonit BCV** ve formě suspenze kontaktovaný s práškovým železem po dobu 0-140 dnů (Černá et al. 2022).
- **Bentonit BCV** v kompaktovaném stavu kontaktovaný s práškovým železem po dobu 1 a 3 měsíců (Černá et al. 2022).

3.5.1 Geochemické, mineralogické a geotechnické parametry

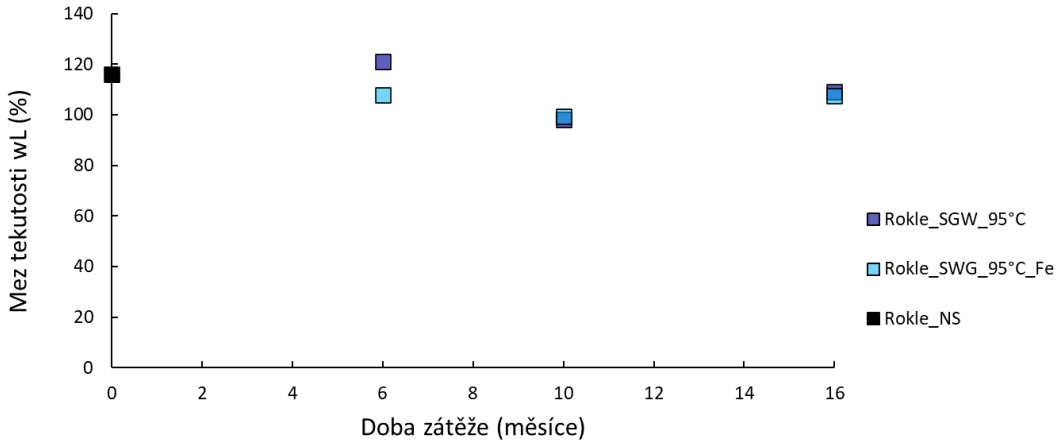
Zatěžování bentonitu Rokle v suspenzi s SGW vodou při 95 °C způsobilo po 11 měsících pokles bobtnacího tlaku a nárust hydraulické vodivosti v důsledku kontaktování s práškovým Fe (Obr. *45*-Obr. 46) oproti bentonitové suspenzi zatěžované bez přítomnosti Fe. Vůči neovlivněnému stavu však došlo k poklesu hydraulické vodivosti bentonitu zatěžovaného ve stavu suspenze bez Fe a přidáním tohoto prvku došlo k nárůstu a v podstatě k navrácení na původní hodnoty odpovídající neovlivněnému bentonitu. Mez tekutosti ukazuje minimální odchylky, které mohou souviset s chybou měření (Obr. 47).



Obr. 45 Vývoj bobtnacího tlaku s dobou zatížení teplotou 95 °C suspenze Rokle vytvořené za použití syntetické granitické vody a též bentonitové suspenze s přídavkem práškového Fe.



Obr. 46 Vývoj hydraulické vodivosti s dobou zatížení teplotou 95 °C suspenze Rokle vytvořené za použití syntetické granitické vody (SGW) a též bentonitové suspenze s přídavkem práškového Fe.

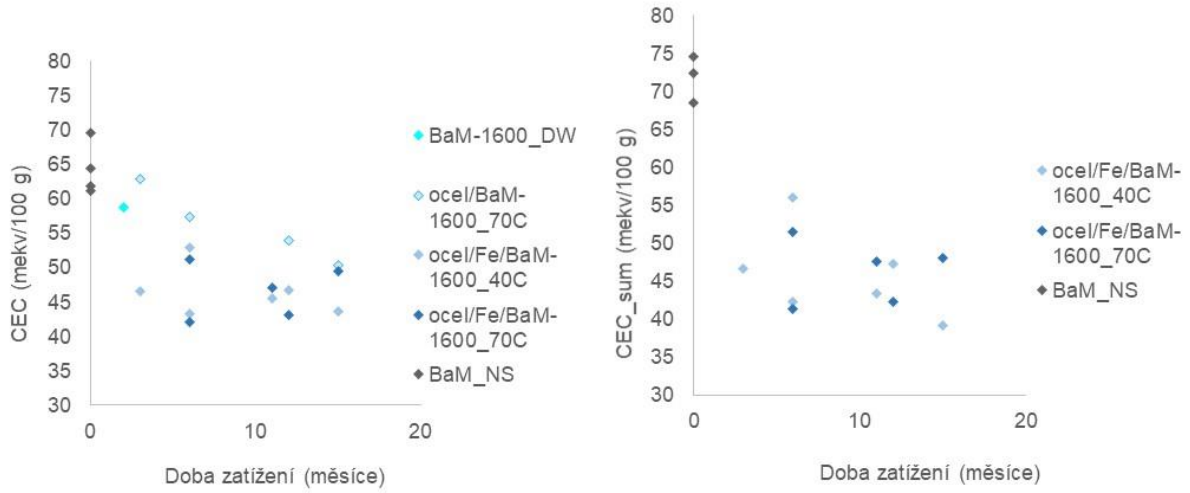


Obr. 47 Vývoj meze tekutosti s dobou tepelného zatěžování bentonitové suspenze vytvořené za použití syntetické granitické vody (SGW1) a bentonitu Rokle a též bentonitové suspenze s přídavkem práškového Fe.

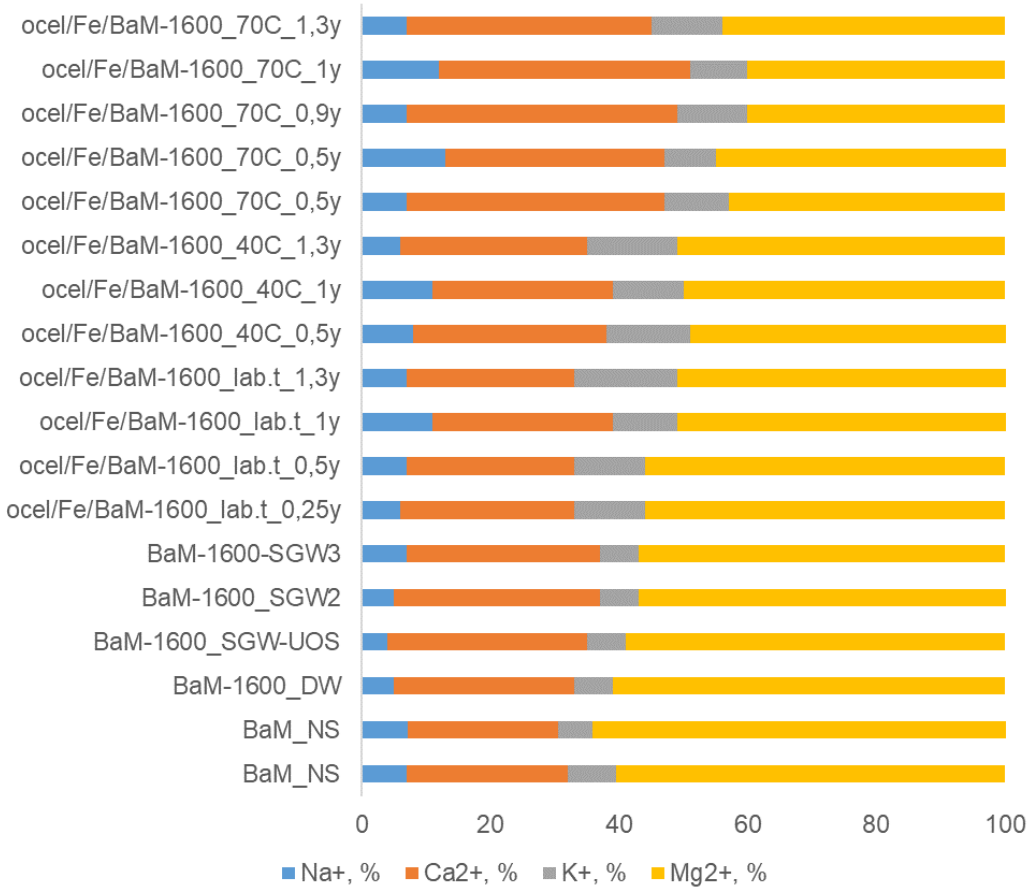
Pro bentonit BaM jsou k dispozici dvě sady dat CEC: (1) BaM kontaktovaný s ocelí a práškovým Fe zatěžovaný při laboratorní teplotě, při 40 °C a při 70 °C (Gondolli et al. 2018a, 2018b) a (2) BaM kontaktovaný s ocelí č. 422707.9 bez přídavku práškového Fe (Dobrev et al. 2017). V obou typech experimentu byl BaM kompaktován na 1600 kg/m^3 a sycen SGW vodou. Jako nosič pro práškové Fe byly v experimentu použity disky z uhlíkové oceli 12050. U všech vzorků bentonitu byla během přípravy pozorována kontaminace nezreagovanými/částečně zreagovanými částicemi železa. U všech analyzovaných vzorků byly identifikovány zejména směsné karbonáty obsahující ve struktuře Fe (siderit), případně jiné karbonáty (kalcit, dolomit). Ve BaM_NS jsou karbonáty přítomné také. Není možné jednoznačně určit, zda došlo v důsledku experimentu ke změně v jejich obsahu. Původ vyrostlic illitu identifikovaných v jednom experimentu s přídavkem práškového Fe (70 °C, 6 měsíců) nebylo možné jednoznačně určit, může jít o výsledek reakce nebo o nehomogenitu přírodního materiálu (Gondolli et al. 2013).

Z vývoje CEC i CEC_sum je patrný výrazný pokles po 6, 12 i 15 měsících experimentu (Obr. 48). U CEC činí pokles až 15 mekv/100 g v případě BaM s ocelí a až 25 mekv/100 g v případě kombinace oceli a práškového Fe. U CEC_sum je odchylka způsobená kontaktováním s práškovým Fe až 35 mekv/100 g. Z podílu vyměnitelných kationtů je patrné kolísání obsahu Na^+ a kontinuální pokles Mg^{2+} a nárůst Ca^{2+} (Obr. 49). Gondolli et al. (2018a, 2018b) vysvětluje pokles CEC a CEC_sum možnou kontaminací bentonitu práškovým Fe, které se nepodařilo z bentonitu po experimentu zcela odstranit a které může hodnoty CEC snížit. Na druhou stranu u bentonitu je patrná změna podílu kationtů, kdy dochází ke snížení obsahu Mg^{2+} a zvýšení podílu Ca^{2+}. Dle vizuálně patrných změn v bentonitu lze předpokládat i vznik novotvořených minerálů, které se nepodařilo dostupnými technikami identifikovat (malá krystalinita novotvořených fází).

U bentonitu zatěžovaného bez přídavku práškového Fe (Dobrev et al. 2017) připouští možné podhodnocení hodnot CEC v důsledku nestability roztoku Cu(II)trienu, který se ke stanovení CEC používá. Stejně tak, jako v případě experimentů s přídavkem práškového Fe může být CEC bentonitu zatěžovaného kontaktem s ocelí ovlivněna přítomností korozních produktů. I přes uvážení výše uvedených faktorů jsou pokles CEC, CEC_sum i změna ve složení vyměnitelných kationtů natolik výrazné, že lze předpokládat ovlivnění bentonitu v důsledku zatěžování.



Obr. 48 Porovnání CEC (vlevo) a CEC_sum (vpravo) bentonitu BaM_NS a BaM kompaktovaného na 1600 kg/m³ (1600) a zatěžovaného destilovanou vodou (DW) a SGW vodou. Fe – přídavek práškového Fe.



Obr. 49 Porovnání podílu vyměnitelných kationtů bentonitu BaM_NS a BaM kompaktovaného na 1600 kg/m³ (1600) a zatěžovaného destilovanou vodou (DW), SGW vodami (SGW-UOS, SGW2, SGW3) nebo přídavkem práškového železa (Fe) za laboratorní teploty (lab.t.) a za 40 (40C) a 70 °C (70C). y – délka zátěže v rocích.

3.5.2 Mikrobiologické parametry

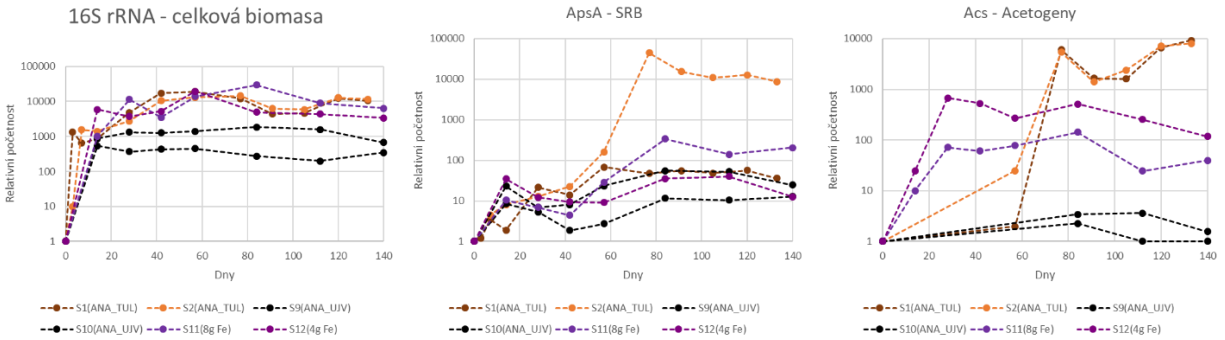
Mikrobiální aktivita v bentonitu ovlivněném kontaktem se železem (v podobě práškového železa) byla studována u bentonitu BCV, a to jak v suspenzích, tak v kompaktovaném bentonitu, a dále u kompaktovaného bentonitu BaM v in-situ podmínkách, Tab. 17.

U vzorků BCV suspenzí inkubovaných v anaerobních podmínkách docházelo za přítomnosti práškového Fe k velmi vysokým nárůstům relativní abundance mikroorganismů i jednotlivých metabolických skupin mikroorganismů (Obr. 50). Efekt byl podobný, jako u přídavku H_2 diskutovaného v kap. 3.4, neboť obě tyto látky slouží mikroorganismům jako donory elektronů pro energetický metabolismus. V bentonitových suspenzích bez přídavku donorů naopak docházelo k významně nižším změnám relativní početnosti bakterií v čase.

V anaerobních podmínkách dominovaly blíže nespecifikovaní zástupci metabolicky versatilní čeledi *Peptococcaceae*, kam patří kromě IRB rodu *Thermincola* též různí zástupci SRB (Stackebrandt 2014). Dále zde byly detekovány různé druhy NRB jako je *Noviherbaspirillum, Anaerobacillus* či čeleď Symbiobacteraceae, dále IRB (*Thermincola*). V inkubovaných vzorcích byl detekován nárůst relativní abundance obligátně anaerobních skupin mikroorganismů (IRB, SRB či acetogeny), Tab. 17.

Tab. 17 Počet podvzorků a vyhodnocení analýz provedených na podvzorcích bentonitu BCV v kontaktu s práškovým železem a v kontrolních suspenzích bez železa.

		Podmínky inkubace					MB1	MB2_EB	MB2_qPCR					MB3-NGS	Vyhodnocení					
	Počet podvzorků	Typ vzorku	Atmosféra	Teplota, °C	Doba inkubace, d	Přídavek živin	Typ izolace DNA	přítomnost živých buněk	16S rRNA RQ	Geobacteraceae(16S rRNA) RQ	NRB(NosZ) RQ	SRB(ApsA) RQ	Acetogeny(Acs) RQ	Nejčastější rody	Mikroorganismy detekovány	Mikrobiální aktivita	SRB aktivita/kultivovatelnost	NRB aktivita/kultivovatelnost	IRB aktivita/kultivovatelnost	AA aktivita/kultivovatelnost
BCV (Černá et al. 2020)	16	suspenze 1:5	anaerobní	lab	0-140	práškové Fe	EKK	N.A.	nárůst	nárůst	nárůst	nárůst	nárůst	Peptococcaceae, Thermincola; Noviherbaspirillum; Anaerobacillus, Symbiobacteraceae	ano	ano	ano	ano	ano	ano
	26	suspenze 1:5	anaerobní	lab	0-140	ne	EKK	ano	nárůst	nárůst	nárůst	nárůst	stagnace	Noviherbaspirillum; Anaerobacillus;Peptococcaceae; Thermincola; Pseudomonas; Symbiobacteraceae, Bacillus	ano	ano	ano	ano	ano	ne
BCV (Černá et al. 2022)	2	KB 1200 kg/m3	anaerobní	lab	30-90	práškové Fe	EKK	N.A.	Cq = 20-25	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	Desulfosporosinus, KD4-92, MB-A2-108	ano	ano	ano	N.A.	N.A.	N.A.
	2	KB 1200 kg/m3	anaerobní	lab	30-90	ne	EKK	N.A.	Cq = 20-25	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	Streptomyces, Micromonospora, Desulfosporosinus, Staphylococus, KD4-92	ano	ano	ano?	N.A.	N.A.	N.A.
BaM Dobrev et al. (2020)	8	KB 1500 kg/m3	in-situ Grimsel	70	1-4r	ne	EKK	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	vývoj mikrobiálního osídlení v čase, 3r a 4r stejný signál (Pseudomonas, Thermus), bez rozdílů ve složení v blízkosti kovu	ano	ano	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.

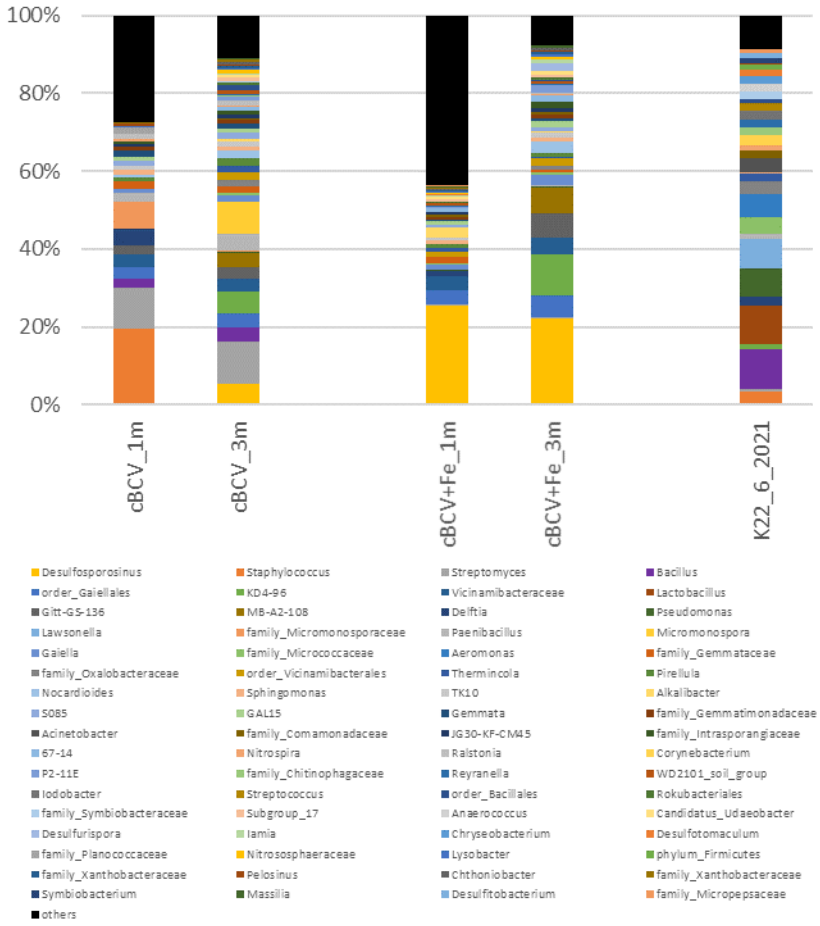


Obr. 50 Relativní kvantifikace bakterií ve vzorcích BCV suspenzí. 4/8g Fe - vzorky s přídavkem práškového železa, TUL - vzorky inkubované za přídavku H2, UJV - vzorky inkubované bez přidaných donorů elektronů. Upraveno dle Černá et al. (2020).

Také v případě inkubace kompaktovaných bentonitů s přídavkem práškového Fe o jednotné suché objemové hmotnosti bentonitu 1200 kg/m^3 došlo k rozvoji mikrobiální aktivity v čase (Tab. 17). V tomto případě nebyla provedena relativní kvantifikace, ale ve zdrojové zprávě byly uvedené přímo hodnoty kvantifikačních cyklů Cq, které se u všech podvzorků pohybují v rozmezí 20-25 (Černá et al. 2022) a indikuje rozvoj mikrobiální aktivity. U podvzorků obsahujících práškové železo došlo k dominantnímu rozvoji SRB rodu *Desulfosporosinus.* Tento rod bývá běžně přítomen i v kompaktovaném bentonitu bez přídavku železa, ale ve výrazně nižším relativním zastoupení (viz Tab. 17 a Obr. 51). Přídavek železa tedy podobně jako u suspenzí podporuje nárůst SRB.

Stejně, jako v kap. 3.1.2 i zde byl rozvoj mikrobiálního složení v kompaktovaném bentonitu BCV je odlišný od složení detekovaného v suspenzích, což pravděpodobně odráží fakt rozdílného chemického složení pórového roztoku a s tím spojený rozdíl v dostupnosti živin mezi suspenzí a kompaktovaným bentonitem. Vyřešení této otázky je jedním z cílů probíhajícího projektu TAČR BioBen. Z výsledků dále plyne, že kompaktizace bentonitu na objemovou hmotnost 1200 kg/m^3 nelimituje rozvoj mikrobiální aktivitu a přítomnost práškového železa potencuje rozvoj aktivity SRB.

V případě bentonitu BaM byly analyzovány vzorky zahřívaného kompaktovaného bentonitu v rámci dlouhodobého in-situ korozního projektu MaCoTe (suchá objemová hmotnost 1500 kg/m^3 a teplota 70 °C) (Dobrev et al. 2020). Bylo zde provedeno pouze sekvenování, jehož výsledky ukázaly postupný vývoj mikrobiálního osídlení v čase, kdy v posledních dvou vzorcích po 3 a 4 letech zátěže dominovaly NRB rody *Pseudomonas*, *Thermus* (thermofilní), *Bacillus* či čeleď Comamonadaceae. Nebyl zde detekován konzistentní rozdíl v mikrobiální složení u vzorků ve vnějších částech bentonitové bariéry a v těsném okolí kovového vzorku (Obr. 25). Tato data tedy naznačují, že v zahřívaných kompaktovaných bentonitech dochází k rozvoji mikrobiální aktivity, ale pro určení její míry a také případných rozdílů v mikrobiální aktivitě v čase by bylo nezbytné provést také relativní kvantifikaci, popř. prováděné analýzy doplnit o analýzy typu MB4, které detekují produkty mikrobiálního metabolismu (podrobněji viz Vašíček et al. 2022).



Obr. 51 Mikrobiální taxony detekované v kompaktovaných vzorcích s práškovým železem a kontrolních vzorcích bez práškového železa. Upraveno dle Černá et al. (2022).

3.6 Stabilita v kontaktu s YCW/LPC/C za různé teploty

Hodnocení stability bentonitu v kontaktu nízkoalkalickým cementem (LPC) nebo mladou cementovou vodou (YCW) vychází ze 4 experimentů:

- **Bentonit B75** zatěžovaný v suspenzi s vodou Josef při 95 °C v kontaktu s cementovou kostkou (portlandský struskovitý cement 42,5 R, Vašíček et al. 2013).
- **Bentonit B75** kompaktovaný na 1400 kg/m^3 a zatěžovaný s low-pH cementem a SGW vodou při laboratorní teplotě po dobu více jak 1 rok (Vašíček et al. 2016).
- **Bentonit BaM** za zatěžovaný v suspenzi s vodou YCW za laboratorní teploty (Červinka et al. 2019).
- **Bentonit BaM** ve formě suspenze kontaktovaný s LPC ve formě prášku po dobu 60 dnů v anaerobních podmínkách (Shrestha et al. 2022).

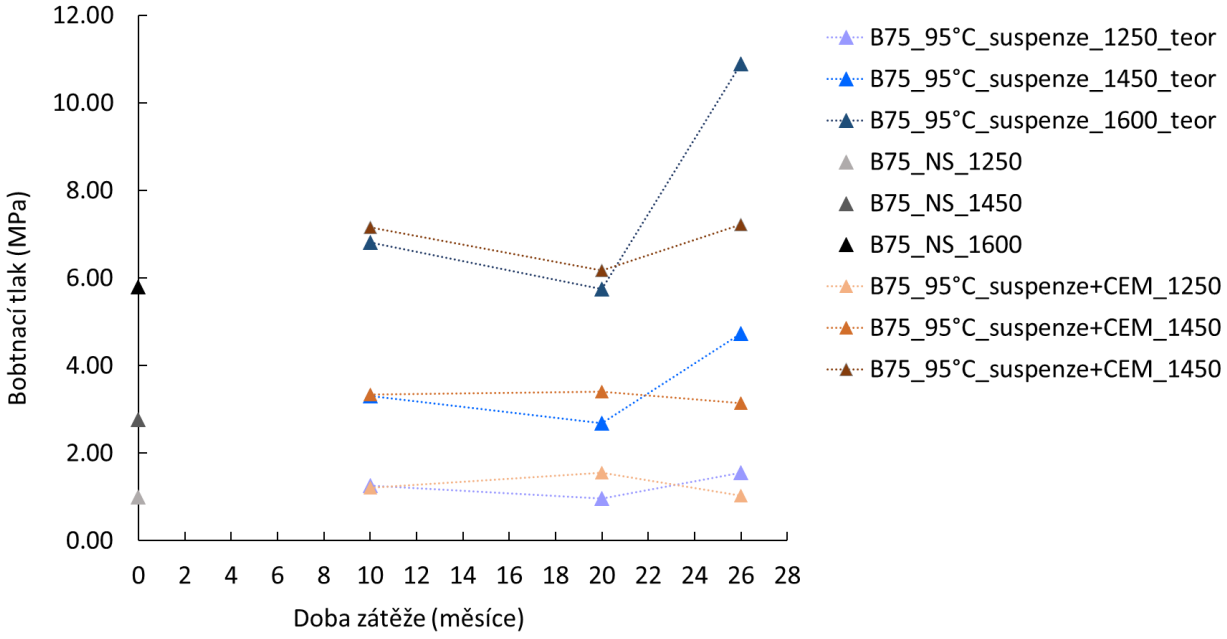
3.6.1 Geochemické, mineralogické a geotechnické parametry

Bentonit B75 zatěžovaný v suspenzi s vodou Josef při 95 °C ukázal zvýšení bobtnacího tlaku v důsledku kontaktu s cementovou kostkou po 20 měsících (Obr. 52). Po 26 měsících zůstal bobtnací tlak bentonitu kontaktovaného s cementovou kostkou vyšší oproti B75_NS u objemové hmotnosti 1600 kg/m^3. U nižších objemových hmotností se vrátil na původní hodnotu. Hodnoty

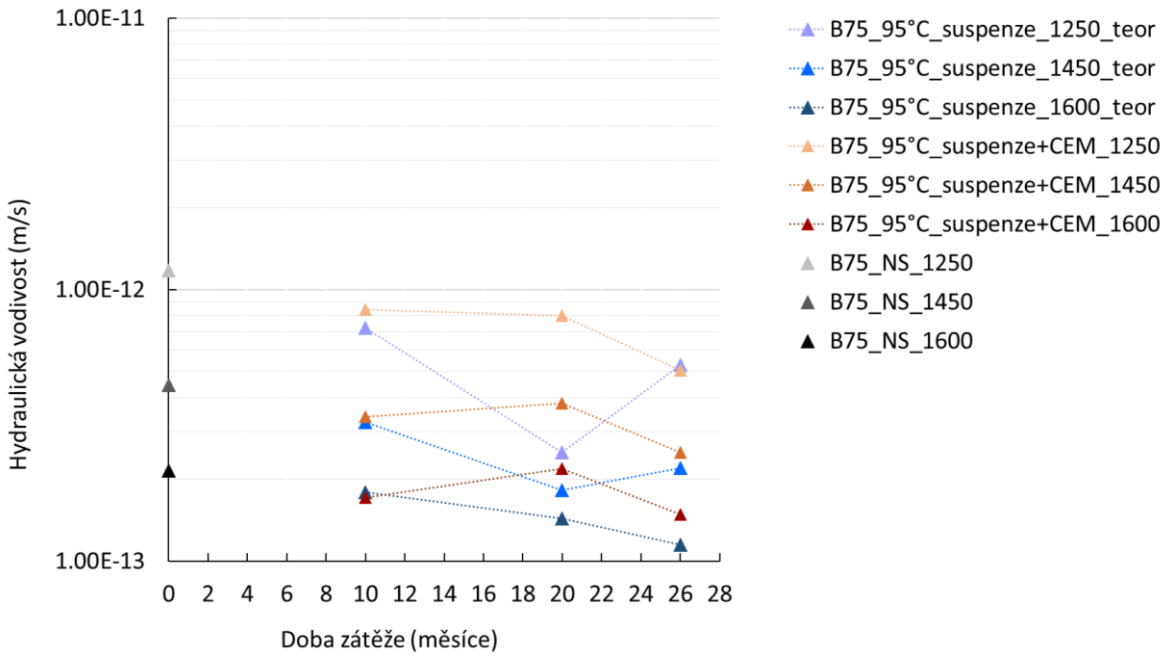
hydraulické vodivosti se po 26 měsících mírně snižují oproti výchozímu stavu (Obr. 53, Vašíček et al. 2013). Kontaktování s cementovou kostkou způsobilo pokles meze tekutosti při zatěžování po dobu 9 a 26 měsíců (Obr. 54).

Po 20 a 26 měsících zatěžování bentonitové suspenze B75 teplotou 95 °C došlo k nahrazení hořčíku v mezivrství za vápník. Vápník pocházel pravděpodobně z podzemní vody Josef, kterou byl bentonit sycen. Vašíček et al. (2013) ukázal na možnou souvislost mezi zvýšením WL a SWEP a zlepšením (snížením) hydraulické vodivosti a CEC. Vápník má oproti hořčíku větší iontový poloměr a v mezivrství jsou u obou kationtů vázány tři monovrstvy vody. Je tedy možné, že vápník může oproti hořčíku způsobit větší bobtnací schopnosti bentonitu, a tím pádem také snížení hydraulické vodivosti. Změna meze tekutosti bude pravděpodobně souviset s množstvím sodíku v mezivrství, který umožňuje neomezený vstup vody do mezivrství, což může v konečné fázi vést i k delaminaci jednotlivých vrstviček bentonitu. Přestože se obsah sodíku výrazně nemění, jeho zastoupení v poměru k ostatním kationtům je pouze cca 50%, a proto může mít změna ostatních kationtů v mezivrství vliv na změnu meze tekutosti (Vašíček et al. 2013).

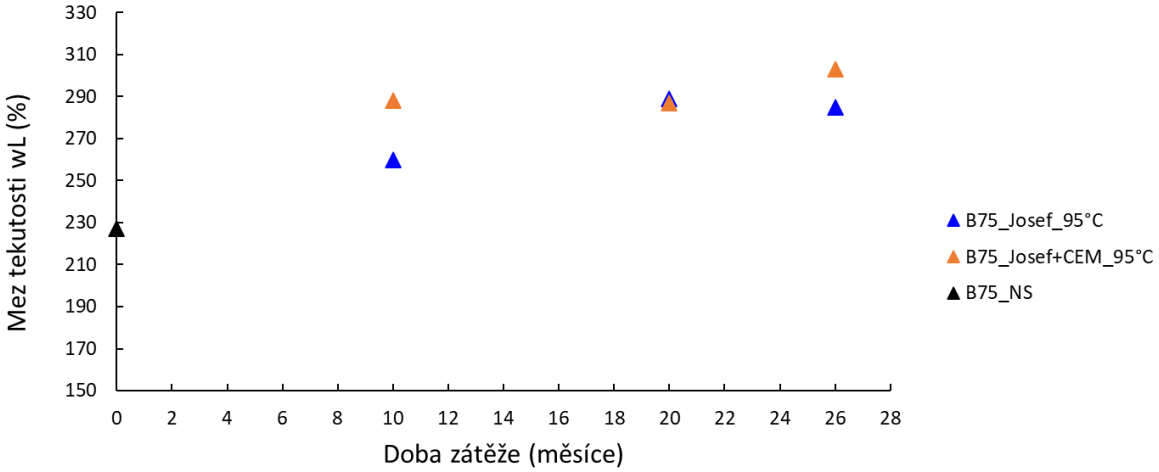
Naopak v případě zatěžování suspenze B75 v kontaktu s cementovou krychlí došlo k nahrazení části hořčíku za draslík a vápník. Vápník pravděpodobně pocházet jak z vody Josef) tak z rozpouštění cementové krychle. U draslíku vzhledem k jeho nízkým obsahům v podzemní vodě jde o dotaci pouze z rozpouštění cementové krychle. Pakliže je v mezivrství přítomen draslík, jsou vázány v mezivrství pouze dvě monovrstvy vody, ale bobtnací schopnost je vyšší než u hořčíku díky většímu zápornému náboji jednotlivých vrstev. Změna geotechnických parametrů zde byla shodná jako pro čistou suspenzi B75 bez cementu (Vašíček et al. 2013).



Obr. 52 Vývoj bobtnacího tlaku suspenze bentonitu B75 s vloženou cementovou kostkou (portlandský struskový cement 42,5 R) s dobou tepelného zatěžování teplotou 95 °C.

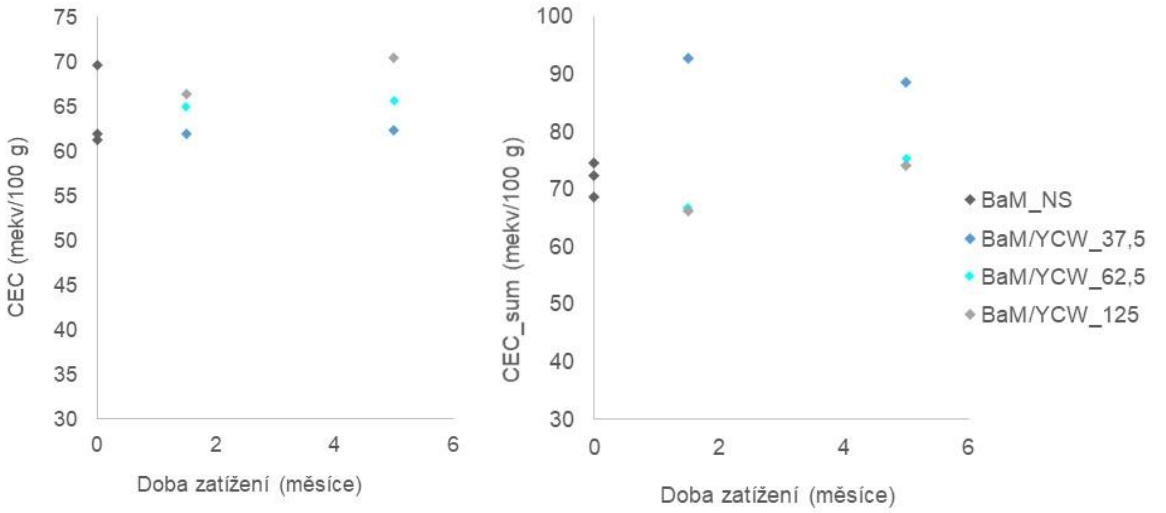


Obr. 53 Vývoj hydraulické vodivosti suspenze bentonitu B75 s vloženou cementovou kostkou (portlandský struskový cement 42,5 R) s dobou tepelného zatěžování teplotou 95 °C.

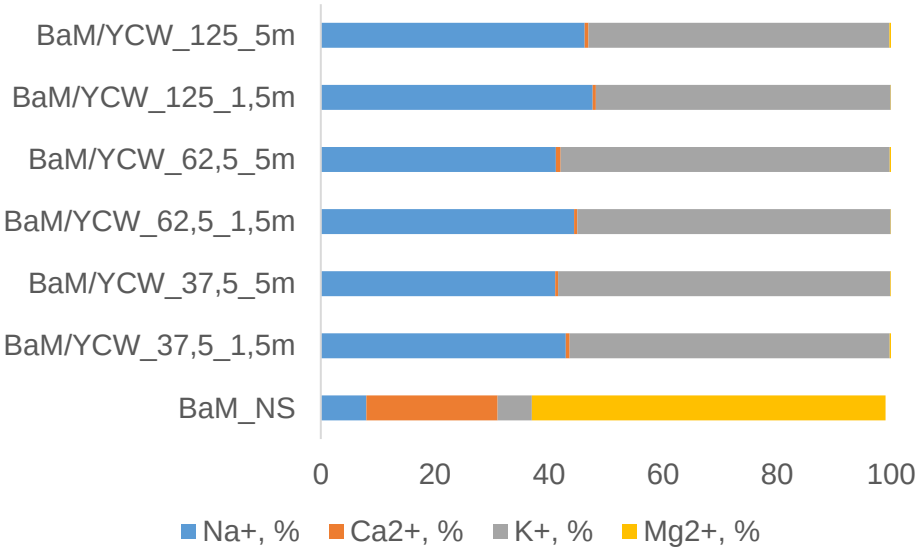


Obr. 54 Vývoj meze tekutosti bentonitu B75 v závislosti na době zatěžování teplotou 95 °C ve formě suspenze s vloženou cementovou kostkou (portlandský struskovitý cement 42,5 R). K výrobě obou suspenzí byla použita přirozená granitická voda Josef.

Výrazný nárust CEC se projevil u bentonitu BaM syceného YCW vodou v poměru 62,5 a 125 g/L po 1,5 a 5 měsících (Obr. 55). U poměru 125 g/L tento nárůst překročil interval spolehlivosti BaM_NS. Výrazně se změnil poměr vyměnitelných kationtů (Obr. 56): poklesl obsah Ca^{2+} a Mg^{2+} a stoupl obsah Na^{+} a K^{+}, z čehož vyplývá téměř úplné převedení bentonitu do Na/K formy. U koncentrací Na^{+} a K^{+} Červinka et al. (2019) připouští možné nadhodnocení díky neúplnému oddělení kapalné fáze při loužicím experimentu.

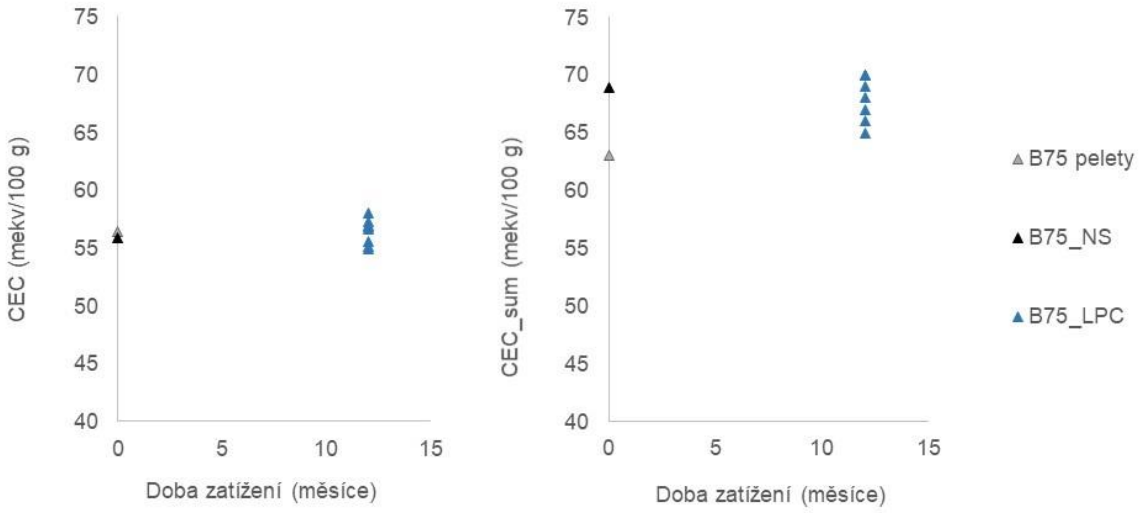


Obr. 55 Vývoj CEC BaM kontaktovaného s YCW při laboratorní teplotě v poměru s:l 37,5, 62,5 a 125 g/l.

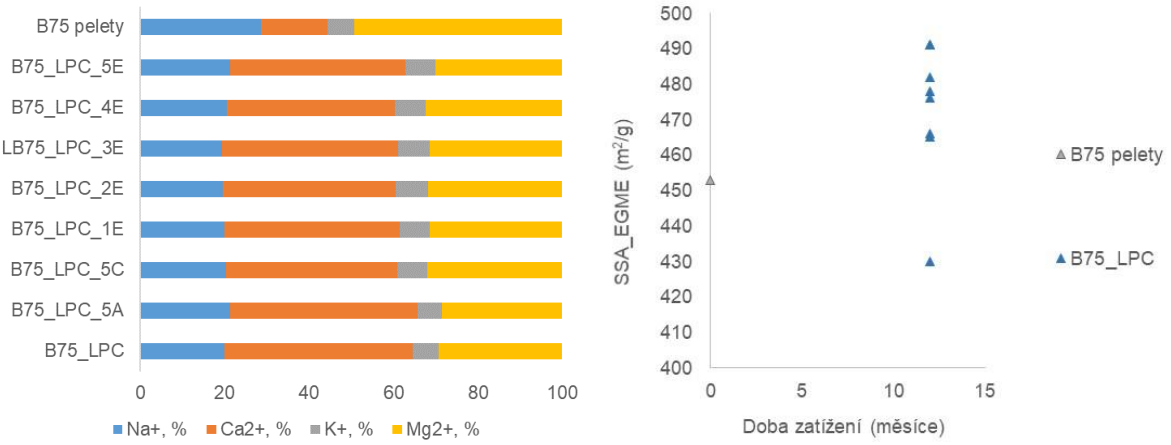


Obr. 56 Vývoj podílu vyměnitelných kationtů BaM kontaktovaného v suspenzi s YCW při laboratorní teplotě v poměru s:l 37,5, 62,5 a 125 g/l. m – měsíce.

Odlišné chování bentonitu B75 bylo pozorováno při jeho zatěžování v kompaktovaném stavu (fyzikálně-interakční model). Hodnoty CEC, CEC_sum i SSA_EGME ukázaly minimální odchylku oproti B75_NS i B75_peletám (výchozímu materiálu pro zatěžovací experiment, Obr. 57-Obr. 58). Výrazný posun je patrný v zastoupení vyměnitelných kationtů, kdy v důsledku zatěžování došlo k poklesu podílu Na^{+} a Mg^{2+} a nárůstu Ca^{2+} (Obr. 58).



Obr. 57 Porovnání CEC (vlevo) a CEC_sum (vpravo) bentonitu B75 kompaktovaného na 1400 kg/m³ a syceného vodou Josef za in-situ podmínek.



Obr. 58 Porovnání vyměnitelných kationtů (vlevo) a SSA_EGME (vpravo) bentonitu B75 kompaktovaného na 1400 kg/m³ a syceného SGW vodou za laboratorní teploty.

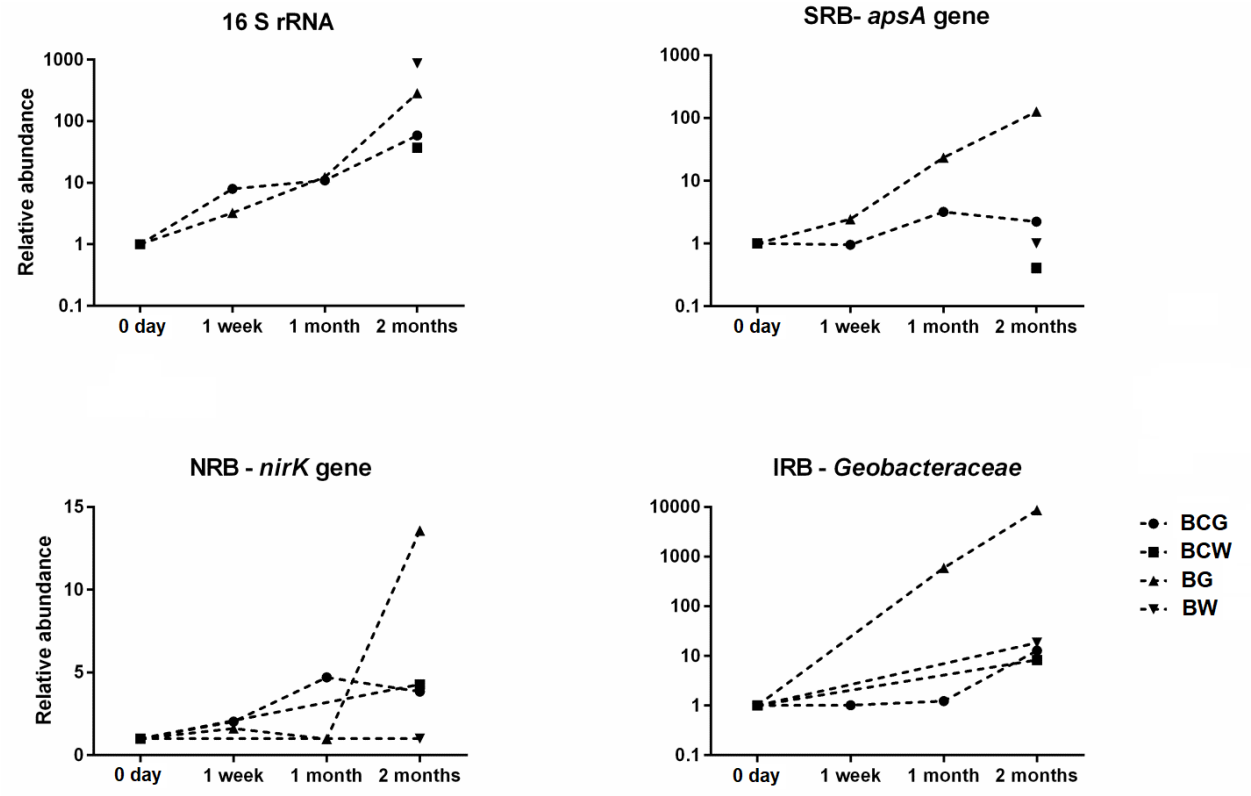
3.6.2 Mikrobiologické parametry

Na suspenzích bentonitu BaM a LPC prášku byl studován efekt přítomnosti LPC na vývoj mikrobiálního osídlení, Tab. 18.

Vzorky byly analyzovány pouze geneticky (Shrestha et al. 2022). Vzorky suspenzí s LPC vykazovaly nárůst relativní mikrobiální abundance v čase, ale ve srovnání s kontrolami bez LPC byl tento nárůst výrazně nižší. V případě SRB přídavek LPC způsobil pouze mírný nárůst či dokonce stagnaci v relativní početnosti této skupiny ve srovnání s kontrolními vzorky (Tab. 18, Obr. 59).

Tab. 18: Počet vzorků a vyhodnocení analýz provedených na podvzorcích bentonitu BaM kontaktovaných s práškovým LPC.

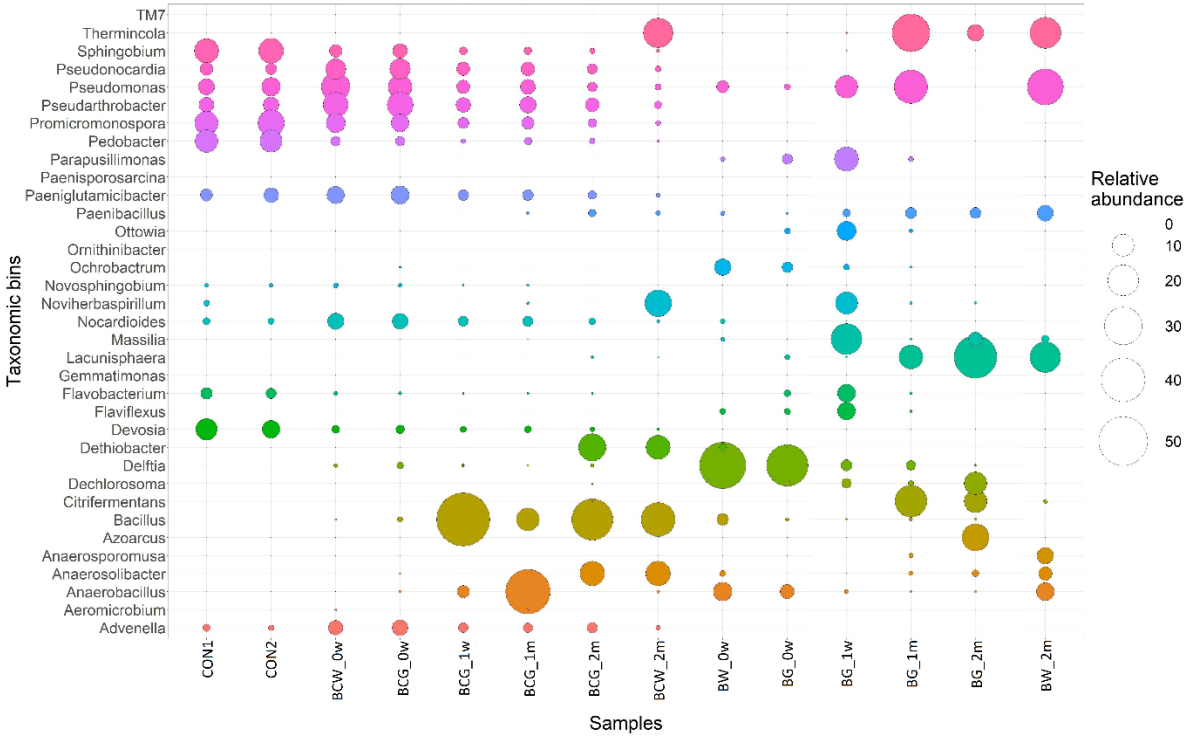
			Podmínky inkubace			MB2 qPCR						MB3 NGS	Analýza					
	Počet podvzorků	Popis vzorku	Atmosféra	doba inkubace, d, m, r	teplota, °C	16S rRNA RQ	Geobacteraceae(16S rRNA) RQ	NRB(NosZ) RQ	NRB(NirK) RQ	SRB(ApsA) RQ	SRB(DsrA) RQ	Max 5 nejčetnějších rodů	Mikroorganismy detekovány	Mikrobiální aktivita	SRB aktivita/kultivovatelnost	NRB aktivita/kultivovatelnost	IRB aktivita/kultivovatelnost	Limitní hodnota nutná pro potlačení MB aktivity
BaM +LPC (Shrestha et al. 2022)	4	suspenze 1:6,67 s VITA + LPC	anaerobní	0-60d	lab	nárůst	nárůst	N.A.	mírný nárůst	mírný nárůst	N.A.	rozvoj NRB rodů - vývoj v čase	ano	ano	omezená	ano	ano	v přítomnosti LPC dochází k rozvoji MB aktivity, ale nižší ve srovnání s kontrolami bez LPC - LPC limituje MB aktivitu a rozvoj SRB
	4	suspenze 1:6,67 s VITA (NC)	anaerobní	0-60d	lab	výrazný nárůst	výrazný nárůst	N.A.	nárůst	výrazný nárůst	N.A.	rozvoj NRB a IRB rodů - vývoj v čase	ano	ano	ano	ano	ano	
	2	suspenze 1:6,67 se sterilní VITA + LPC	anaerobní	0-60d	lab	nárůst	nárůst	N.A.	stagnace	stagnace	N.A.	rozvoj NRB a IRB rodů - vývoj v čase	ano	ano	ne	ano	ano	
	2	suspenze 1:6,67 se sterilní VITA	anaerobní	0-60d	lab	nárůst	nárůst	N.A.	stagnace	stagnace	N.A.	rozvoj NRB a IRB rodů - vývoj v čase	ano	ano	ne	ano	ano	



Obr. 59 Výsledky relativní kvantifikace bakterií ve vzorcích BaM suspenzí v kontaktu s LPC a kontrolách. BCG - BaM + LPC + VITA voda, BCW - BaM + LPC + sterilní VITA voda, BG - BaM + VITA voda, BW - BaM + sterilní VITA voda. Dle Shrestha et al. (2022).

Mikrobiální složení vzorků se u všech vzorků vyvíjelo v čase a také se lišilo mezi jednotlivými typy vzorků. Ve vzorcích s LPC převažovali zástupci NRB a IRB, jejich složení se však lišilo v závislosti na přítomnosti LPC (Obr. 60).

Přítomnost LPC tedy zásadním způsobem ovlivňuje vývoj mikrobiálního osídlení bentonitového vzorku a způsobuje pokles relativní abundance bakterií ve srovnání s čistě bentonitovými kontrolami.



Obr. 60 Mikrobiální rody detekované ve vzorcích BaM suspenzí v kontaktu s LPC a kontrolách. BCG - BaM + LPC + VITA voda, BCW - BaM + LPC + sterilní VITA voda, BG - BaM + VITA voda, BW - BaM + sterilní VITA voda. Dle Shrestha et al. (2022).

3.7 Radiační stabilita

Hodnocení vlivu ionizujícího záření na stabilitu českých bentonitů vychází ze 3 experimentů:

- **Bentonit BCV** ve formě prášku ozařovaného celkovou dávkou 0-140 kGy (Černá et al. 2020).
- **Bentonit BCV** ve formě suspenze ozařované celkovou dávkou 0-140 kGy (Černá et al. 2022).
- **Bentonit BaM** ve formě suspenze ozařované dávkou 0-20 kGy (Černá et al. 2020).

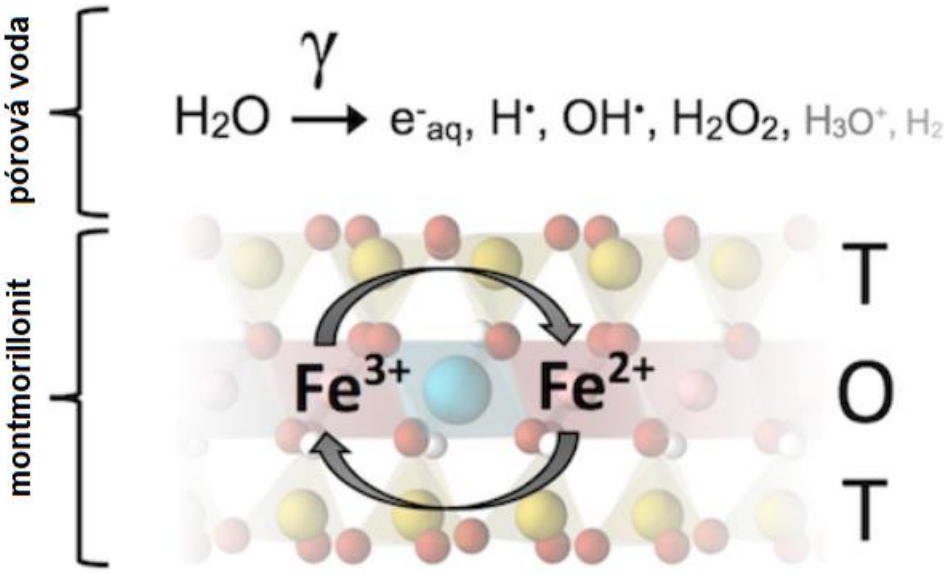
Z charakteru experimentů plyne, že žádný vzorek bentonitu nebyl cíleně ozařován a následně podrobován stanovení jeho vlastností, které by vedly ke zhodnocení vhodnosti použití českých bentonitů jako výplní v HÚ. Výše uvedené experimenty zahrnovaly pouze analýzu MB aktivity.

3.7.1 Vliv ozařování na fyzikálně-chemické parametry bentonitu

Vliv ozařování na některé fyzikálně-chemické parametry bentonitu byl zkoumán v řadě zahraničních studií především v souvislosti s radiolýzou vody a jejím vlivem na CEC a stav montmorillonitu. Pokud byl vzorek ozařován ve stavu přirozené vlhkosti („za sucha“) vysokými dávkami (až několik MGy), tak nebyly pozorovány významné změny nebo byly pozorovány drobné změny ve fyzikálně-chemických vlastnostech bentonitu (např. Negron et al. 2002, Plötze et al. 2003, Galamboš et al. 2012, Parab et al. 2020, Cheng et al. 2022 apod.). V přítomnosti vody však dochází k radiolýze vody. Produkty radiolýzy mají oxidační i redukční účinky. Pozorovaný pokles CEC a náboje vrstvy u montmorillonitových standardů (SWy-1, STx-1, SAz-1) a bentonitů

MX-80 a Volclay po ozáření celkovou dávkou 1,1 MGy přisoudili redukci Fe^{3+} na Fe^{2+} (na základě poklesů signálů Fe^{3+} z elektronové paramagnetické rezonance, EPR) způsobenou právě radiolytickými produkty (hydratované elektrony, atomární vodík) (Plötze et al. 2003).

Holmboe et al. (2011) ozařovali vzorky MX-80 (i upravovaných do homoionních forem) a Na-MMT ve formě BS a nasyceného KB, kde sledovali vliv ozáření (mimo jiné) na sorpční a difúzní chování Cs a Co. Bohužel kvůli nepřehlednosti prezentovaných dat a experimentálních podmínek se výsledky ztrácí. Odhadem dat z jejich grafů SOR experimentů lze dovozovat, že ozařováním MMT nedošlo k významným změnám v hodnotách R_d(Cs, Co), zatímco při ozařování MX-80 (i Na- a Ca-formy) došlo k poklesu R_d (zřetelnější pro Co). Radiací indukovaným strukturním cyklickým změnám Fe^{3+}/Fe^{2+} (Obr. 61) v prostředí kompaktovaného MMT a bentonitu se Holmboe a Jonsson (2022) zabývá v současnosti za realističtějších podmínek podobných úložišti (úrovně nasycení vodou, oxické/anoxické podmínky).



Obr. 61 Radiolýza vody indukující cyklické strukturní změny Fe^{3+}/Fe^{2+} v montmorillonitu (Holmboe a Jonsson 2022, upraveno).

Oxidačními stavy železa v závislosti na délce ozařování suspenze se zabývali Chikkamath et al. (2021). Pro tento účel cíleně připravili Fe(II)-MMT, kde dosáhli poměru Fe^{2+}/Fe^{tot} ~ 0,98, avšak uznávají že se může měnit díky oxidaci v aerobních podmínkách. Ozařováním dávkovým příkonem 0,6 kGy/h brzy dosáhli (za cca den) zpětné redukce zoxidovaného Fe^{3+} na Fe^{2+}. Oxidační stav železa v bentonitu může být zásadní otázkou též pro rozvoj mikrobiální aktivity anaerobních IRB, kteří Fe^{3+} využívají pro svůj metabolismus (Madigan 2012). Ozařování tedy teoreticky může zvyšovat dostupnost tohoto nutrientu pro mikrobiální aktivitu, přičemž aktivitou IRB může docházet k negativním změnám ve struktuře bentonitu, viz (3.9).

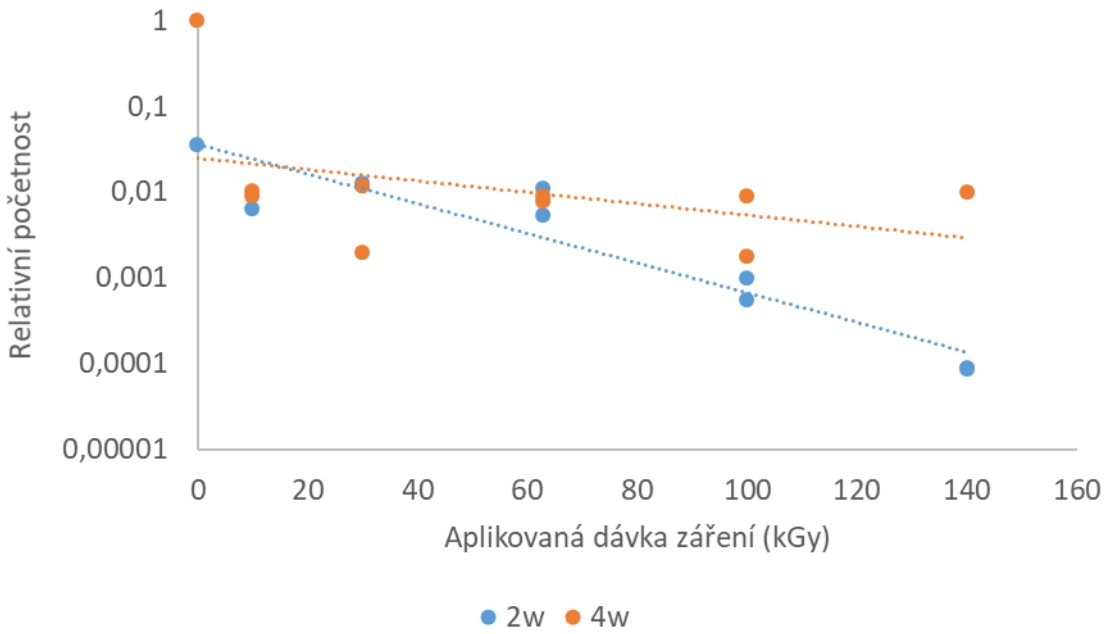
3.7.2 Mikrobiologické parametry

Pro účely vytvoření postupu pro sterilizaci bentonitu v projektu Bioben byl otestován vliv ionizujícího záření o různých celkových dávkách až do výše 140 kGy (Tab. 19).

Tab. 19 Počet vzorků a vyhodnocení analýz provedených na podvzorcích bentonitu BCV sterilizovaných pomocí ionizujícího záření.

			Podmínky inkubace				MB2_EB	MB2_qPCR						MB3_NGS	Analýza					
Typ zátěže	Počet podvzorků	Popis vzorku	atmosféra	doba inkubace, d	přídavek živin (výpsat)	teplota, °C	přítomnost živých buněk	16S rRNA RQ	Geobacteraceae(16S rRNA) RQ	NRB(NosZ) RQ	NRB(MrK) RQ	SRB(ApsA) RQ	SRB(DsrA) RQ	max 5 nejčetnějších rodů	mikroorganismy detekovány	mikrobiální aktivita	SRB aktivita/kultivovatelnost	NRB aktivita/kultivovatelnost	IRB aktivita/kultivovatelnost	limitní hodnota nutná pro potlačení MB aktivity
BCV prášek (0-140 kGy) Černá et al. (2020)	12	prášek_0-140kGy_2w inkubace	anaerobní	14	H2	lab	N.A.	graduální pokles s dávkou	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	Noviherbaspirillum; Bacillus, Thermincola, Paenibacillus(0kGy) /N.D.(140kGy)	do 100 kGy	do 10 kGy	N.A.	N.A.	N.A.	>10 kGy?
	12	prášek_0-140kGy_4w inkubace	anaerobní	28	H2	lab	N.A.	stejné snížení u všech dávek > 10 kGy	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	Noviherbaspirillum; Bacillus, Thermincola, Paenibacillus(0kGy) /N.D.(140kGy)	do 100 kGy	do 10 kGy	N.A.	N.A.	N.A.	
BCV suspenze (0-140 kGy) Černá et al. (2022)	12	susp 1:5, 25d 0-140kGy	anaerobní	25+0	H2	lab	ano 0-140kGy(kontaminace?)	graduální pokles s dávkou	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	Pseudomonas, Peptococcaceae, Massilia(0kGy)/pozadí(od 70kGy)	do 27 kGy	do 27 kGy	N.A.	N.A.	N.A.	>27<70 kGy
	12	susp 1:5, 25d_0-140kGy-2w inkubace	anaerobní	25+14	H2	lab	ano 0-140kGy(kontaminace?)	graduální pokles s dávkou	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	Masilia, Pseudomonas, Anaerobacillus, Lactobacillus(0kGy) /Anaerosolibacter, pozadí(140kGy)	do 27 kGy?	do 27 kGy	N.A.	N.A.	N.A.	
BaM suspenze Černá et al. (2019)	7	suspenze suspenze 1:3,33 s VITA ozařovaná (19 656kGy)	aerobní	7-63d	ne	20	N.A.	stagnace	stagnace	nárůst/pokles	N.A.	stagnace	N.A.	dominance NRB rody - Bacillus, Psudomonas, Paenibacillus, aj.	ano	velmi omezená	ne	ano	ne	významné omezení MB aktivity (ale bez kontrol, aerobně), podobné u vzorků se živinami i bez
BaM suspenze Černá et al. (2019)	7	suspenze suspenze 1:3,33 s VITA ozařovaná (19 656kGy)	aerobní	7-63d	acetát, síran, dusičnan	20	N.A.	stagnace	stagnace	nárůst/pokles	N.A.	stagnace	N.A.	dominance NRB rody - Bacillus, Psudomonas, Paenibacillus, aj.	ano	velmi omezená	ne	ano	ne	

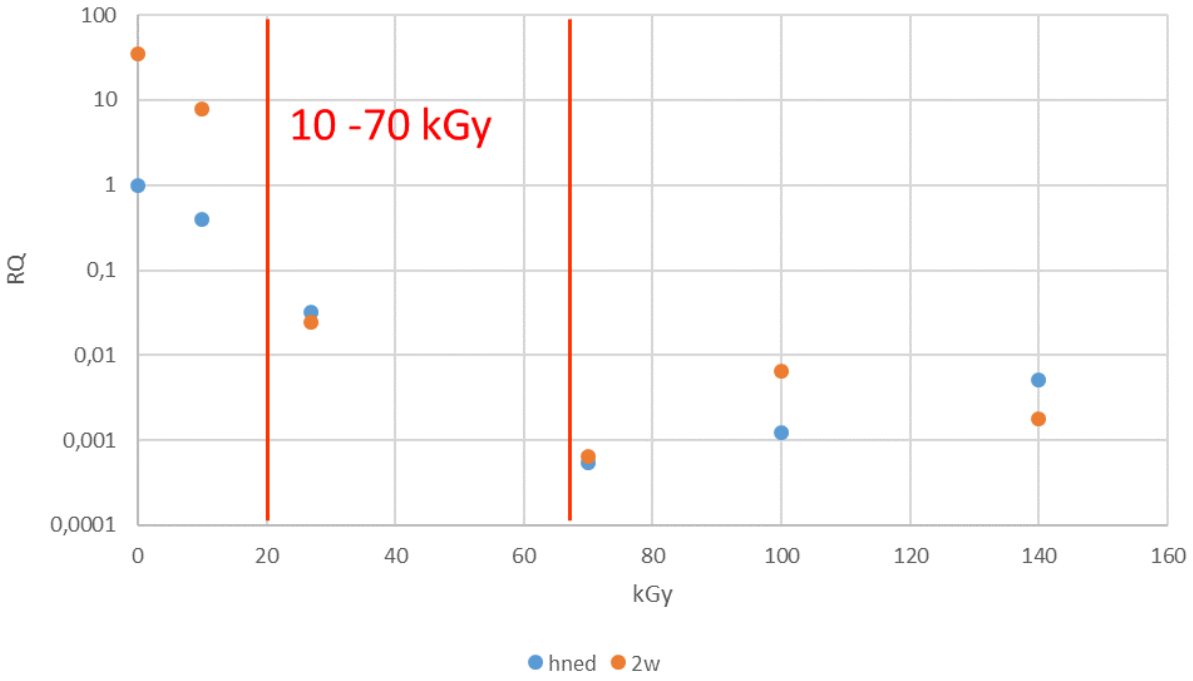
V případě ozařování BCV prášku byl použit dávkový příkon 221,4 Gy/min a po skončení ozařování byl prášek suspendován ve vodě a inkubován po dobu 14 a 28 dnů v anaerobních podmínkách za přítomnosti vodíku pro detekci možné regenerace ze spor. Výsledné vzorky byly analyzovány pouze geneticky. V obou případech byl pozorován pokles relativní abundance s aplikovanou dávkou, kdy v případě 2-týdenní inkubace byl trend zřetelnější, než v případě inkubace 4-týdenní (Tab. 19, Obr. 62).



Obr. 62 Sterilizace ozařováním – relativní početnost mikroorganismů detekovaná pomocí qPCR (16S rRNA gen) v ozařovaných vzorcích po 2/4 týdenní inkubaci v anaerobním boxu TUL. Převzato z Černá a kol. (2020).

U vzorků ozařovaných nízkými dávkami došlo k rozvoji běžných bentonitových mikrobiálních společenstev s rody *Pseudomonas, Noviherbaspirillum, Bacillus, Thermincola, Paenibacillus*. Při nejvyšších dávkách již složení vzorků odpovídalo pozadí (Tab. 19). Na základě sumarizace zjištěných výsledků bylo odhadnuto, že pro signifikantní omezení mikrobiální aktivity postačuje již aplikace dávky > 10 kGy, přičemž však nebylo možné stanovit jednoznačně hodnotu dávky záření nutné ke kompletní sterilizaci bentonitu. Experiment je z tohoto důvodu aktuálně opakován v rámci projektu TAČR BioBen.

V případě ozařování suspenzí (25 dnů staré anaerobně inkubované suspenze) byl použit dávkový příkon 258.3 Gy/min a vzorky byly analyzované hned po ozáření a dále po 14-denní inkubaci. Na rozdíl od prášku byla při vyhodnocení inkubovaných vzorků provedena kromě genetických metod i extrakce buněk (MB2_EB), výsledky však byly pravděpodobně ovlivnění kontaminací během tohoto procesu (Černá et al. 2022). Genetická data ukázala podobně jako v případě prášku graduální pokles relativní početnosti bakterií tak NGS signálu s aplikovanou dávkou (Tab. 19, Obr. 63) a na základě shrnutí výsledků byla stanovena dávka záření nutná pro sterilizaci suspenze v rozmezí 27-70 kGy. Získaná data tak naznačují mírně nižší radiační odolnost mikroorganismů v suchém prášku než ve formě suspenze. Toto se shoduje s údaji v literatuře, kdy bylo pozorováno, že odolnost spor vůči ozařování se zvyšovala se zvyšující se vlhkostí okolního prostředí (Todoriki et al. 2000, Hilsen et al. 2005).



Obr. 63 Ozařování BCV suspenze – relativní početnost mikroorganismů detekovaná pomocí qPCR (16S rRNA gen) v ozařovaných vzorcích suspenzí po skončení ozařování (hned) a po 2 týdenní inkubaci v anaerobním boxu TUL (2w). Červené svislé čáry naznačují rozmezí, v němž se dle výsledků nachází letální dávka záření. Převzato z Černá et al. (2022).

U bentonitu BaM byl testován vliv ionizujícího záření na rozvoj mikrobiální aktivity v bentonitové suspenzi (Černá et al. 2019) a to za dávek (20 kGy) a dávkových příkonů (13 Gy/h) bližších podmínkám očekávaným HÚ RAO než výše popsaný sterilizační experiment. Ozařovány byly suspenze čisté i s přídavkem živin (acetát, sírany, dusičnany). U obou typů ozařovaných bentonitových suspenzí (s přídavkem živin i bez) došlo k významné redukci mikrobiální aktivity

a téměř u všech studovaných markerů byla pozorována stagnace relativní početnosti či pokles v čase, Tab. 19. Ve vzorcích byly detekované různé rody NRB (Tab. 19). Experiment však probíhal za aerobních podmínek, kdy jsou mikrobiální aktivity obecně nižší, než za podmínek anaerobních a dále zde z technických důvodů chyběly adekvátní neozařované kontroly. Provedeny byly pouze genetické analýzy. Míra vlivu ionizujícího záření na rozvoj mikrobiální aktivity tak nemohla být relevantně posouzena a není tak zcela jisté, že ke sledované stagnaci mikrobiální proliferace došlo pouze vlivem ozařování.

Mikroorganismy adaptované životu v suchých prostředích, kde hrozí vysychání, obecně vykazují vyšší odolnost vůči ionizujícími záření. Vysychání totiž způsobuje podobné poškození buněk jako ozařování (Mattimore a Battista 1996). Na druhou stranu, odolnost spor vůči ozařování se obvykle zvyšuje se zvyšující se vlhkostí okolního prostředí (Todoriki et al. 2000, Hilsen et al. 2005). V provedených sterilizačních experimentech byla jasně prokázána negativní závislost životaschopnosti bakterií a aplikované dávky u prášku i suspenze, přičemž v případě suspenzí byly odhadované letální dávky záření mírně vyšší (>27<70 kGy) než v případě prášku (>10 kGy), což by odpovídalo výsledkům popsaným výše. Vyhodnocení experimentů však nebylo zcela jednoznačné a práce na tomto tématu však pokračují v rámci projektu TAČR Bioben. V případě suspenzí bentonitu BaM dlouhodobě inkubovaných za přítomnosti relativně nízkých dávkových příkonů ionizujícího záření ukázalo pouze minimální rozvoj mikrobiální aktivity, ale nikoli sterilizaci materiálu po aplikaci absorbované dávky téměř 20 kGy. Ke sterilizaci bentonitu je tedy nezbytné použít dávku 27-70 kGy při vysokém dávkovém příkonu. Reakce přirozených mikroorganismů na dlouhodobé vystavení dávkovým příkonům očekávaným v HÚ RAO (cca 0,1Gy/h) je aktuálně studována u bentonitové suspenze a KB v rámci projektu TAČR Bioben (Černá et al. 2022) a na základě výsledků těchto experimentů bude možné udělat přesnější závěry.

3.8 Vliv objemové hmotnosti

Hodnocení chování bentonitu v závislosti na suché objemové hmotnosti vychází z následujících experimentů:

- **Bentonit BCV** v suspenzi za anaerobních podmínek, doba zátěže 0-140 dnů (Černá et al. 2020).
- **Bentonit BCV** v suspenzi za anaerobních podmínek, různé poměry pevné fáze (1:1-1:5), doba zátěže 48 a 84 dnů (Černá et al. 2022).
- **Bentonit BCV** v kompaktovaném stavu (ρ_D = 1200 kg/m^3), doba zátěže 1-3 měsíce (Černá et al. 2022).
- **Bentonit Rokle** v kompaktovaném stavu (ρ_w = 1670-1940 kg/m^3), přidané SRB, doba zátěže 33-78 dnů (Bengtsson et al. 2017).
- **Bentonit BaM** v kompaktovaném stavu (ρ_D = 1400-1850 kg/m^3) sycený VITA vodou, doba zátěže 3-10 měsíců (Černá et al. 2018, Černík et al. 2018).
- **Bentonit BaM** v kompaktovaném stavu (ρ_D = 1200-2000 kg/m^3) sycený SBPOW, doba zátěže 8 měsíců (Černík et al. 2017).
- **Bentonit BaM** za zatěžovaný v suspenzi s vodou YCW za laboratorní teploty (Červinka et al. 2019).
- **Bentonit B75** kompaktovaný na 1400 kg/m^3 a zatěžovaný s low-pH cementem a SGW vodou při laboratorní teplotě po dobu více jak 1 rok (Vašíček et al. 2016).

Vliv objemové hmotnosti bentonitu, při které byl bentonit zatěžován se nejvíce projevuje v porovnání dat zatěžování v bentonitové suspenze oproti datům ze zatěžování kompaktovaného bentonitu. Analýzy výluhů a roztoků získaných vysokotlakou extrakcí (Obr. 8-Obr. 10) ukazují změnu v koncentraci hlavních kationtů a aniontů. U bentonitů zatěžovaných v suspenzi je závislost mezi poměrem bentonit : voda a koncentrací iontu převážně lineární. U roztoků získaných z kompaktovaného bentonitu má tato závislost více zakřivený („logaritmický“) tvar. koncentrace iontů v pórové vodě ovlivňuje.

Zcela odlišně se choval bentonit BaM kontaktovaný v suspenzi s YCW při laboratorní teplotě v poměru s:l 37,5, 62,5 a 125 g/l. m (Obr. 55-Obr. 56) a bentonit B75 kontaktovaný z LPC kompaktovaný na 1400 kg/m^3 a syceného vodou Josef za in-situ podmínek (Obr. 57-Obr. 58). V suspenzi došlo k nahrazení vyměnitelných kationtů Ca^{2+} a Mg^{2+} za Na^+ a K^+. Naproti tomu v kompaktované stavu zůstal poměr kationtů Ca^{2+} a Mg^{2+} srovnatelný s nezatíženým vzorkem (Vašíček et al. 2016).

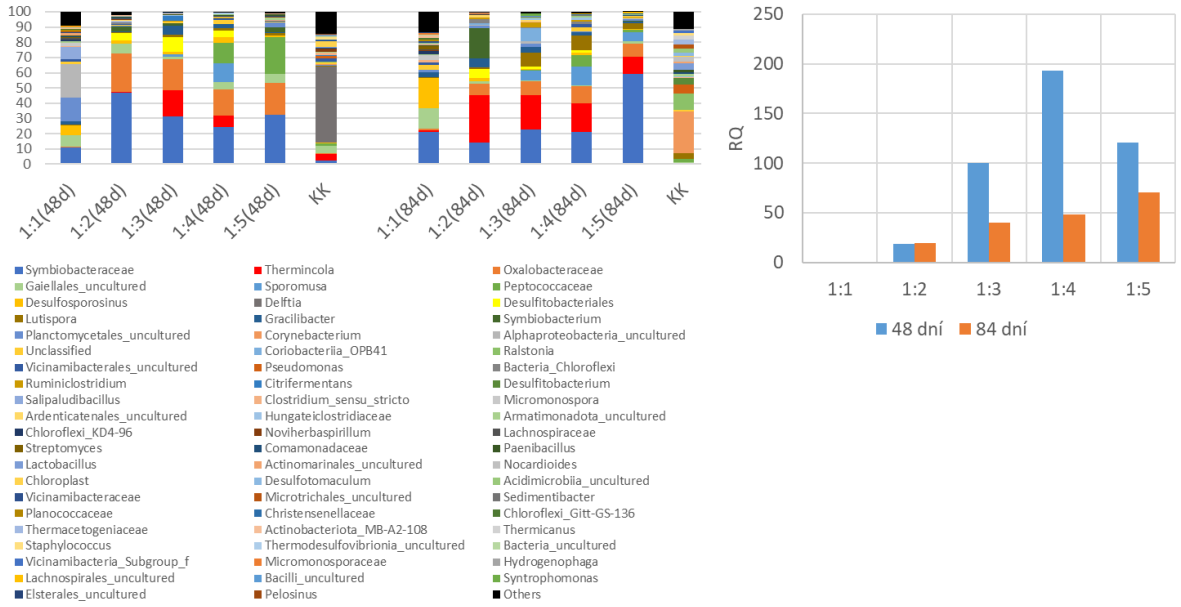
3.8.1 Mikrobiologické parametry

Suchá objemová hmotnost je jedním z klíčových parametrů zodpovědných za regulaci mikrobiální aktivity v prostředí HÚ RAO. Limitní hodnota suché objemové hmotnosti pro český bentonit nebyla dosud spolehlivě určena, nicméně níže shrnujeme existující poznatky o vlivu suché objemové hmotnosti na rozvoj mikrobiální aktivity na příkladu suspenzí BCV a BaM a kompaktovaných bentonitů BCV, BaM a Rokle (Tab. 20).

Tab. 20 Počet vzorků a vyhodnocení analýz provedených na podvzorcích bentonitových suspenzích a bentonitů o různé suché objemové hmotnosti.

		Podmínky inkubace						MB1	MB2_EB	MB2_K		MB2_qPCR						MB3-NGS	MB4		Vyhodnocení					
	Počet podvzorků	Typ vzorku	Atmosféra	Teplota, °C	Doba inkubace, d	Přídavek kultur (které)	Přídavek živin	Typ izolace DNA	přítomnost živých buněk	použité médium(+pozitivní/-negativní)	SRB MPN/l	16S rRNA RQ	Geobacteraceae(16S rRNA) RQ	NRB(NirK) RQ	NRB(NosZ) RQ	SRB(ApsA) RQ	Acetogeny(Acs) RQ	Nejčastější rody	Produkce Cu35S (kBq)	detekce produkce acetátu (umol/gdw)	Mikroorganismy detekovány	Mikrobiální aktivita	SRB aktivita/kultivovatelnost	NRB aktivita/kultivovatelnost	IRB aktivita/kultivovatelnost	AA aktivita/kultivovatelnost
BCV suspenze Černá et al. (2020)	40	suspenze 1:5	ANA	lab	0-133	ne	H2	EKK	ano	SBM+ PGM+		nárůst	nárůst	N.A.	nárůst	nárůst	N.A.	Noviherbaspirillum; Peptococcaceae, Bacillus, Thermincola; Paenibacillus, Pseudomonas			ano	ano	ano/ano	ano/ano	ano	ano
	26	suspenze 1:5	ANA	lab	0-140	ne	ne	EKK	ano	N.A.		nárůst	nárůst	N.A.	nárůst	nárůst	stagnace	Noviherbaspirillum; Anaerobacillus;Peptococcaceae; Thermincola; Pseudomonas; Symbiobacteraceae, Bacillus			ano	ano	ano	ano	ano	ne
BCV suspenze poměry fází Černá et al. (2022)	5	suspenze 1:1-1:5	ANA	lab	48	ne	H2	EKK	ano	N.A.		nárůst s menším zastoupením pevné fáze	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	uncultured; Desulfosporosinus, Salipaludibacillus(1:1)/Symbiobacteraceae, Thermincola, Oxalobacteraceae, Sporomusa, Peptococcaceae(1:5)			ano	ano	pokles s menším zastoupením pevné fáze	N.A.	N.A.	N.A.
	5	suspenze 1:1-1:5	ANA	lab	84	ne	H2	EKK	ano	N.A.		nárůst s menším zastoupením pevné fáze	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	Symbiobacteraceae, Desulfosporosinus, uncultured(1:1)/Symbibacteraceae, Thermincola, Oxalobacteraceae, Sporomusa(1:5)			ano	ano	pokles se snížením pevné fáze	N.A.	N.A.	N.A.
BCV KB Černá et al. (2022)	2	KB 1200 kg/m3	ANA	lab	30-90	ne	ne	EKK	N.A.	N.A.		Cq = 20-25	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	Streptomyces, Micromonospora, Desulfosporosinus, Staphylococcus, KD4-92			ano	ano	ano?	N.A.	N.A.	N.A.
	2	KB 1200 kg/m3	ANA	lab	30-90	ne	H2	EKK	N.A.	N.A.		Cq = 20-25	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	Streptomyces, Alkalibacter, Desulfosporosinus, Micromonospora; KD4-92; Ralstonia			ano	ano	ano?	N.A.	N.A.	N.A.
Rokle KB Bengtsson et al. (2017)	1	1676 kg/m3 ww	ANA	lab	78d	ne	35SO42−, laktát	N.A.	N.A.	SRB+	0,1-1 x 10-6	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0,41	7,2	ano	ne?	ne/ano	N.A.	N.A.	N.A.
	2	1670-1692 kg/m3 ww	ANA	lab	33-78d	SRB	35SO42−, laktát	N.A.	N.A.	SRB+	0,1-10 x 10-6	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0,05/577	4,38/11,7	ano	ano	ano/ano	N.A.	N.A.	N.A.
	2	1830-1838 kg/m3 ww	ANA	lab	33-78d	SRB	35SO42−, laktát	N.A.	N.A.	SRB+	0,1-10 x 10-6	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0,06/0,09	3,31/4,79	ano	ne?	ne/ano	N.A.	N.A.	N.A.
	1	1924 kg/m3 ww	ANA	lab	78d	ne	35SO42−, laktát	N.A.	N.A.	SRB+	0,1-1 x 10-6	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0,15	4,04	ano	ne?	ne/ano	N.A.	N.A.	N.A.
	2	1932-1940 kg/m3 ww	ANA	lab	33-78d	SRB	35SO42−, laktát	N.A.	N.A.	SRB+	0,1-10 x 10-6	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0,02	2,73/3,96	ano	ne?	ne/ano	N.A.	N.A.	N.A.
BaM KB Černá et al. (2018); Černík et al. (2018)	21	KB 1400-1850 kg/m3 sycený VITA vodou	ANA	lab	3-10m	VITA	ne	EFCH	ano	CHAB+	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	vzorky dominované podobnými rody NRB - Pseudomonas, Hydrogenophilus, Methylovirgula			ano (1400 a 1600 kg/m3)	ano	N.A.	ano (1400 a 1600 kg/m3)	N.A.	N.A.
BaM KB Černík et al. (2017)	3	KB 1200-2000 kg/m3 sycený SBPOW	ANA	lab	8m	ne	SBPOW	EFCH	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	vzorky dominované podobnými rody NRB - Pseudomonas, Streptomyces, u 2000 kg/m3 již jen pozadí			ne u 2000 kg/m3	ne u 2000 kg/m3	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.

V suspenzích BCV inkubovaných za přítomnosti H_2 byl pozorován pokles mikrobiální aktivity se vzrůstajícím poměrem pevné fáze, detekované mikrobiální složení však bylo podobné u všech typů suspenzí kromě nejhustší (poměr 1:1), kde byl detekovaný nárůst SRB rodu *Desulfosporosinus* (Obr. 64). Podobný nárůst SRB byl detekován také vzorků BCV kompaktovaného na 1200 kg/m^3 (Obr. 44, Tab. 20). Obojí patrně souvisí s koncentrací živin v těchto vzorcích.



Obr. 64 Mikrobiální složení (vlevo) a relativní početnost (vpravo) bakterií detekovaných v suspenzích BCV o různých poměrech pevné fáze inkubovaných 48 a 84 dnů. Převzato z Černá et al. (2022).

Mikrobiální aktivita ve vysoce kompaktovaných bentonitech za účelem stanovení limitní suché objemové hmotnosti pro rozvoj mikroorganismů byla studována v bentonitech BaM a Rokle (Tab. 20).

V bentonitu Rokle byla pro detekci limitní hodnoty použita metoda detekce produkce $Cu^{35}S$ - metabolického produktu mikrobiální redukce radioaktivně značeného síranu po reakci s přítomným měděným plíškem. Tato metoda je velmi citlivá a přímo detekuje míru metabolické aktivity SRB. Pro bentonit Rokle byla uvedeným způsobem stanovena limitní hodnota vlhké objemové hmotnosti 1670-1692 kg/m^3. Kultivovatelné však SRB zůstaly i při nejvyšší testované vlhké objemové hmotnosti 1940 kg/m^3.

V bentonitu BaM byly studovány kompaktované bentonity o suché objemové hmotnosti 1200-2000 kg/m^3 sycené vodou či SBPOW. Použito bylo pouze sekvenování, které nepodchycuje míru mikrobiální aktivity, ale může zjistit přítomné rody. Na základě genetického signálu bylo odhadnuto, že limitní hodnotou pro mikrobiální aktivitu v bentonitu BaM je suchá objemová hmotnost 1800-2000 kg/m^3. Pro přesnější stanovení limitní hodnoty by však bylo nezbytné zahrnout relativní kvantifikaci a ideálně též některou z metod detekující produkty mikrobiálního metabolismu, viz Večerník et al. (2022).

V aktuálně probíhajícím projektu TAČR Bioben probíhají testy limitní hodnoty suché objemové hmotnosti pro mikrobiální aktivitu u bentonitu BCV. Zjištěné výsledky bude nezbytné ověřit na dalších typech českých bentonitů tak, aby bylo možné stanovit univerzální hodnotu suché objemové hmotnosti platnou pro český bentonit.

3.9 Vliv mikrobiální aktivity na stabilitu bentonitu

Bentonit je díky svým unikátním vlastnostem považován za vhodný těsnící materiál také pro hlubinná úložiště (HÚ) radioaktivního odpadu (Hicks et al. 2009). V bentonitech se stejně tak jako v dalších půdních materiálech vyskytují přirozené mikroorganismy (Lopez-Fernandez et al. 2015). Některé druhy těchto mikrobů vykazují pozoruhodnou toleranci vůči stresovým podmínkám (radiace, zvyšování teploty, bobtnání, snížená velikost pórů, snížená aktivita vody či nedostatek živin) a jsou schopny přežívat v simulovaném prostředí úložišť (Mulligan et al. 2009; Pedersen 2010). Z těchto důvodů je nezbytné pochopit mikrobiálně působené jevy, které mohou v úložišti nastat a mají potenciál ovlivnit dlouhodobou bezpečnost a stabilitu hlubinného úložiště. Jednou z těchto hrozeb jsou mikroorganismy působené změny v mineralogické struktuře bentonitu způsobující zhoršení geotechnických vlastností.

Mikroorganismy v redukčních anaerobních podmínkách hlubinných prostředí využívají pro svůj energetický metabolismus jiné akceptory elektronů než kyslík, a to podle jejich energetické výhodnosti (Madigan 2012). V anaerobních podmínkách je tak hojně využívaných elektronovým akceptorem Fe^{3+}, a to bakteriemi IRB. Fe^{3+} rovněž tvoří klíčovou složku mnoha jejich proteinů, např. cytochromů (Lopez-Fernandez et al. 2021; Perdrial et al. 2009). Kromě metabolické činnosti IRB mohou redukci Fe^{3+} způsobovat i SRB a to nepřímo vlivem produkovaného sulfanu následujícím způsobem (Pedersen et al. 2017) $HS^- + 2Fe^{3+} \rightleftharpoons 2Fe^{2+} + S^0 + H^+$

(*7*)-$HS^- + Fe^{2+} \rightleftharpoons FeS + H^+$

(*8)*:

$$HS^- + 2Fe^{3+} \rightleftharpoons 2Fe^{2+} + S^0 + H^+ \quad (7)$$

$$HS^- + Fe^{2+} \rightleftharpoons FeS + H^+ \quad (8)$$

Sumární reakce $2HS^- + 2Fe^{3+} \rightleftharpoons Fe^{2+} + S^0 + H^+ + FeS + 2H^+$ (*9*):

$$2HS^- + 2Fe^{3+} \rightleftharpoons Fe^{2+} + S^0 + H^+ + FeS + 2H^+ \quad (9)$$

Tento jev tedy způsobuje snížení koncentrace produkovaného sulfanu jeho chemickým vyvazováním na bentonit, což je jev, který může snižovat korozní rychlosti, nicméně na druhou stranu může způsobovat destabilizaci minerální struktury bentonitu podobně, jako vlivem IRB popsaným výše.

V bentonitech je trojmocné železo Fe^{3+} součástí samotné minerální struktury montmorillonitu (v oktaedrické vrstvě, kde substituuje Al^{3+}) a zároveň se zde vyskytuje též jako součást různých přídavných minerálů, což platí i pro české bentonity, které obecně obsahují poměrně vysoké procento přídatných minerálů (Červinka et al. 2018). IRB pravděpodobně dokáží využívat oba tyto zdroje Fe^{3+} v bentonitu, přičemž efekt těchto dvou procesů na případnou destabilizaci bentonitu není dostatečně známý.

Níže stručně rozebereme oba jevy separátně.

Strukturní železo

Většina strukturního železa v jílových minerálech může být chemicky nebo biologicky redukována. Je známo, že redukce strukturního Fe^{3+} způsobuje určité plně vratné i nevratné změny ve struktuře a chemismu jílového minerálu a/nebo jeho redukční rozpouštění (např.

(Gorski et al. 2013; Stucki 2011). To závisí na mnoha faktorech, včetně povahy jílového minerálu (tj. obsahu železa, náboje vrstvy a chemismu), rozsahu redukce, chemismu vodného prostředí a přítomnosti mikroorganismů (Dong 2012).

Vlivem mikrobiální redukce Fe^{3+} může docházet ke změně redoxního potenciálu železa v bentonitech, nicméně její přímý vliv na mineralogii a geochemii bentonitů zůstává v mnohém nejasný a mnohdy i rozporuplný (Haynes et al. 2021). Redukce železa vede ke zvýšení celkového náboje vrstvy (Khaled and Stucki 1991; Stucki 1984). (Fitch 1995) tvrdí, že tento zvýšený náboj povrchové vrstvy způsobuje zvýšené bobtnání, zatímco v práci (Kostka et al. 1999) je uvedeno, že naopak vede ke snížení bobtnací schopnosti (až o cca 40 %). (Kostka et al. 1999) rovněž ve své práci uvádějí další změny v mineralogii smektitu SWa-1 vlivem předešlé redukce, včetně snížení specifického povrchu o cca 30-50 % nebo zvýšení kationtové výměnné kapacity o cca 20-30 %. Všechny tyto změny mohou mít významný vliv na těsnící schopnosti bentonitového materiálu (Gilmour et al. 2022).

V důsledku mikrobiální redukce strukturního Fe^{3+} dochází dále k rozpouštění jílových minerálů, což může vést ke vzniku nových nebo pozměněných minerálů, včetně biogenního oxidu křemičitého (Dong et al. 2003; Li et al. 2004; Zhang et al. 2007), smektitu (Pusch and Kasbohm 2002), illitu (Kim et al. 2004; Zhang et al. 2007), vivianitu (Dong et al. 2003) či sideritu (Kim et al. 2004; Zhang et al. 2007). Tyto pozměněné či nově vzniklé minerály mohou rovněž ovlivňovat požadované vlastnosti bentonitu.

Železo v příměsích

Ještě složitější je pak otázka vlivu akcesorického železa, jež je v českých bentonitech spolu s dalšími příměsemi poměrně hojné (Šachlová et al. 2022; Červinka et al. 2018). V kontextu tohoto tématu se nepodařilo dohledat žádné práce, které by se zabývaly efektem mikrobiálně redukovaného železa z přídatných minerálů na stabilitu minerálů v bentonitu. Možnou paralelu pro vyhodnocení tohoto efektu by snad mohly představovat studie, které zkoumají vliv korozních produktů na vlastnosti bentonitu, potažmo stabilitu úložišť, neboť mikrobiální redukcí přídatných minerálů obsahujících železo může docházet ke vzniku podobných výsledných produktů.

V průběhu aerobní fáze úložiště vzniknou jako korozní produkty (oxy)hydroxidy železa v důsledku interakcí železa s jílem, při nichž se postupně spotřebuje veškerý kyslík dostupný v systému. Při následné korozi kovového železa nebo oceli za redukčních podmínek se v roztoku uvolňuje Fe^{2+} a v důsledku disociace vody a redukce protonů vzniká vodík, což vede ke zvýšení pH a snížení redoxního potenciálu (a také zvýšení mikrobiální aktivity). Za těchto redukčních podmínek pak vzniká jako produkt koroze magnetit, siderit, sulfidy a silikáty železa (Fe-serpentinit, greenalit, cronstedtit). Nebobtnavý serpentinit bohatý na Fe (berthierin a cronstedtit), coby výsledný produkt interakce Fe-bentonit, uvádějí i některé další studie (Lantenois et al. 2005; Marty et al. 2010; Perronnet et al. 2008; Savage et al. 2010).

V důsledku reakce bentonitu s korozními produkty může docházet ke změnám některých fyzikálně-chemických vlastností bentonitu. (Fernández et al. 2018) popisují snížení kationtové výměnné kapacity a specifického povrchu přibližně o 11-35 %, resp. 43-65 % ve srovnání s referenční hodnotou bentonitu FEBEX. Snížení hodnoty kationtové výměnné kapacity bentonitu vlivem interakcí mezi kanystrem a obalovým materiálem popisuje i práce (Kale and Ravi 2022) a byla též popisována u českých bentonitů (viz kap. 3.5.1). Jiná práce popisující závěry pocházející z in-situ experimentu FEBEX ve Švýcarsku uvádí, že v jednom ze studovaných bentonitových bloků vedla koroze ocelové vložky k difúzi Fe do bentonitu, což mělo za následek vznik velkých

korozních lemů (šířka> 140 mm) červené, oranžové a modré barvy. Jako hlavní korozní produkt v červené a oranžové zóně byl identifikován goethit, přičemž zde nebyl pozorován žádný přebytek Fe^{2+} (ve srovnání s neovlivněným bentonitem). Fe^{2+} difundoval dále do jílu (modré zóny – zvýšení obsahu Fe o 10–12 %), ale jeho speciaci se nepodařilo jednoznačně objasnit. V rámci této studie bylo v vzorků ze studovaného bloku bentonitu analyzováno i akcesorické železo, kdy se pomocí Ramanovy spektroskopie podařilo identifikovat goethit (FeO(OH)) (zrna od několika mikrometrů do více než 1 mm), magnetit (Fe_3O_4) či ilmenit ($FeTiO_3$). Značné množství akcesorického Fe bylo nadále přítomno jako submikronická zrna uzavřená v jiných akcesorických minerálech. I zde autoři poukazují na nedostatek zdrojů, zabývajících se právě akcesorickými Fe-minerály a zároveň dodávají, že jejich lepší poznání je důležité pro vytvoření celkového „pozadí Fe“ přítomného v bentonitu a pro pochopení změn jeho obsahu (Hadi et al. 2019). Žádná z těchto prací se však nezabývá rolí, kterou v uvedených procesech sehrává mikrobiální aktivita, byť v rámci experimentů v nesterilních podmínkách k mikrobiální aktivitě nutně docházet muselo a mnohé procesy mohla mikrobiální činnost urychlovat či naopak inhibovat.

3.9.1 Výsledky pilotního mikrobiologického zatěžování českých bentonitů

Bentonit BCV z ložiska Černý vrch obsahuje veliké množství přídatného železa - 10,1 hm. % (Červinka et al. 2018) a je tedy nutné ověřit, zda zde nemohou nastávat negativní jevy spojené s jeho mikrobiální redukcí. Pro zodpovězení otázky vlivu mikroorganismů na stabilitu bentonitu je nezbytný multidisciplinární přístup, jež obnáší kombinaci mikrobiologických analýz s celou řadou mineralogických, geotechnických a geochemických analýz, které mohou odhalit případné změny ve vlastnostech bentonitu po mikrobiální zátěži. Jak bylo ukázáno podrobněji v Podkladové zprávě TZ 624/2022 (Šachlová et al. 2022) a jak vyplývá z Tab. 21 překryv mikrobiologických analýz s jinými typy analýz u dosud analyzovaných vzorků prakticky neexistuje. Z tohoto důvodu není aktuálně možné vliv mikroorganismů na stabilitu bentonitu vyhodnotit.

Tab. 21 Souhrnné počty analýz pro bentonit zatěžovaný MB.

Materiál	CC	PXRD	CEC	SSA-BET	SSA-EGME	SI	WL	WP	SpD	PROP	SWEP	THC	další analýzy	MB
B75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BaM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BCV	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3[1]	0
Rokle	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Při práci s anaerobně inkubovanými vzorky BCV suspenzí bylo opakovaně pozorováno, že bentonit mění některé své vlastnosti a dochází mimo jiné k významnému poklesu volného bobtnání. Dlouhodobě zatěžovaný materiál se také chová odlišně v případě extrakcí buněk (Hlaváčková et al. submited). Z tohoto důvodu byly v rámci projektu TAČR BioBen provedeny

[1] zahrnuty analýzy LUH

pilotní analýzy mikrobiálně zatěžovaných BCV vzorků za účelem ozkoušení analytických přístupů a stanovení technických možností pro studium tohoto fenoménu (Černá et al 2022).

Pro pilotní analýzu vlivu mikrobiální aktivity na stabilitu v rámci této technické zprávy byly použity vzorky:

- **Bentonit BCV** anaerobně inkubovaného v suspenzi (s deionizovanou vodou) za přístupu H2, doba zátěže > 13 měsíců (Černá et al. 2022).
- **Bentonit BCV** zatěžovaného v suspenzi s přídavkem PGM media za anaerobních i aerobních podmínek, doba zátěže 6 měsíců (Černá et al. 2020; 2022).
- **Bentonit BaM** v kompaktovaném stavu kontaktovaný s práškovým železem (Gondolli et al. 2018a, 2018b).

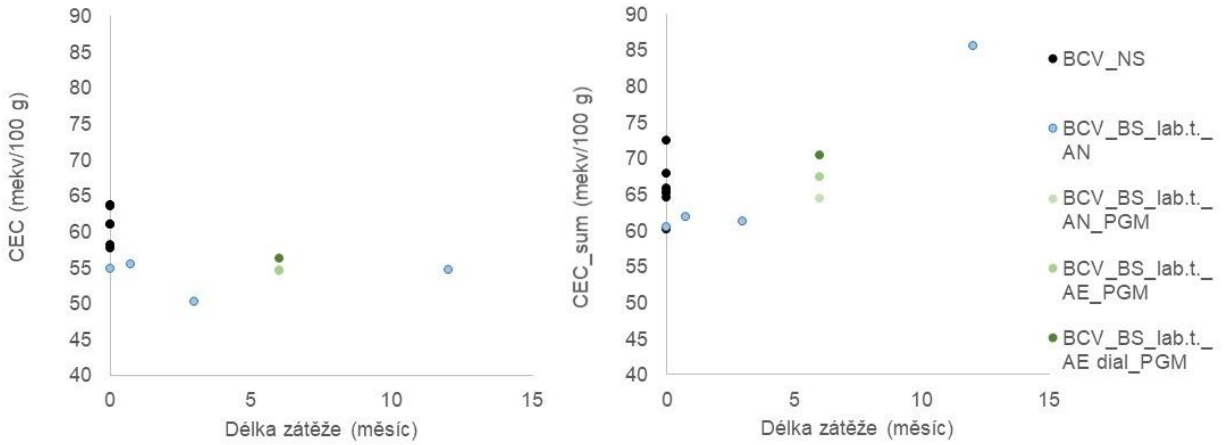
Žádný z těchto vzorků nebyl analyzován mikrobiologicky, nicméně jiné dokončené experimenty za stejných inkubačních podmínek ukázaly jednoznačný rozvoj MB aktivity v takovýchto vzorcích (viz kap. 3.1.2, 3.4.2 a 3.5.2) a shodnou míru MB aktivity, proto můžeme předpokládáme i v pilotně analyzovaných vzorcích vyjmenovaných výše. V budoucích analýzách však bude jistě nezbytné studovat u vzorků všechny parametry současně.

Vývoj dlouhodobě anaerobně inkubované suspenze BCV v deionizované vodě za přítomnosti H_2 byl podrobněji popsán v kap. 3.1.1. Výsledky analýz u těchto vzorků indikují pokles SI o více jak polovinu po jednom roce (Obr. 11). Změny SI však nekorelují se změnami v CEC ani CEC_sum (Obr. 12) ale slabě korelují pouze s poklesem Na^+ v pozici vyměnitelného kationtu. Změny v obsahu Na^+ jsou patrné i ve výluhu (Obr. 14). Rozdíly v obsahu Na_2O jsou v řádu desetin hm. %., resp. desítek mg Na^+/ l výluhu po 12 měsících.

Hodnoty CEC bentonitu BCV zatěžovaného v suspenzi s přídavkem PGM media za anaerobních i aerobních podmínek se výrazně nelišily od BCV v suspenzi pouze s miliQ vodou (Obr. 65). Pokles CEC_sum pozorovaný u anaerobního vzorku s PGM ve srovnání se vzorkem aerobním by opět mohl naznačovat vliv anaerobních mikroorganismů na vlastnosti bentonitu. U těchto vzorků však nebyl analyzován swell index.

Dalším relevantním zdrojem informací mohou být CEC analýzy provedené na anaerobně inkubovaném kompaktovaném bentonitu BaM s ocelí či práškovým železem a které mohou složit jako donory elektronů a podporovat růst mikroorganismů. I zde je patrný významný pokles CEC s délkou inkubace zatěžovaných vzorků, což může naznačovat jisté změny ve vlastnostech bentonitu. Opět zde však chybí další typy analýz.

Všechna výše uvedená data tedy potvrzují vysokou potřebu dalších studií, které by jednoznačně potvrdily vliv mikrobiální aktivity na pozorovaných procesech. Výsledky dosud provedených pilotních analýz jsou z tohoto hlediska nedostatečné a poskytují rozporuplné výsledky. Přestože dosud provedené analýzy CEC neukázaly významné rozdíly u zatěžovaných vzorků BCV suspenzí ve srovnání se vzorky nezatěžovanými, významný pokles SI a další vizuálně patrné změny na chování bentonitu naznačují, že zde k nějakým změnám vlastností docházet může. Zásadní otázkou tak pravděpodobně zůstává pochopení chemických (potenciálně mikroorganismy působených) procesů zodpovědných za pozorovaný pokles SI a pochopení role železa či přídatných minerálů obecně v těchto procesech.



Obr. 65 Porovnání CEC (vlevo) a CEC_sum BCV_NS a BCV zatěžovaného v suspenzi bez přídavku a s přídavkem PGM media (PGM) za aerobních (AE) a anaerobních (AN) podmínek a laboratorní teploty. Dial – vzorek byl po interakci dialyzován.

S ohledem na vysoký obsah přídatných minerálů (včetně těch, obsahujících železo) v českých bentonitech nebude možné provést cílené analýzy mikrobiální redukce strukturního Fe^{3+} a odlišit tento jev od jevů způsobených redukcí železa v přídatných minerálech. Pro analýzy redukce strukturálního železa je vyžadována vysoká čistota materiálu a všechny studie tímto se zabývající byly realizovány na bentonitech s vysokým podílem smektitové složky. V případě BCV (případně dalších českých bentonitů s vysokým podílem příměsí) tak bude možné sledovat jen obecné změny ve fyzikálně-chemických vlastnostech bentonitu vlivem redukce přítomného Fe, bez detailního rozlišení jeho původu. Pro případné analýzy cílené na detekci redukce strukturálního železa a jejího dopadu na vlastnosti bentonitu by bylo nezbytné z nativního českého bentonitu připravit matriál co nejvíc nabohacený o smektit a experimenty provádět na tomto upraveném materiálu.

Jak již bylo zmíněno, velikým problémem dosud proběhlého výzkumu je velice nízká provázanost výsledků z různých oborů. Jednotlivé efekty byly často studovány izolovaně, bez zasazení širšího kontextu a z publikovaných prací je tak obtížné vytvořit solidní vědomostní základnu pro další výzkum. Dalšímu výzkumu tohoto tématu by proto měla předcházet debata odborníků napříč různými obory, jež by měla sloužit k vytipování jevů a analýz, které mohou ukázat na možné změny v chování bentonitu a na které bude nezbytné se do budoucna zaměřit. Klíčem bude provádění multidisciplinárních analýz a jejich správná a vzájemná interpretace.

3.10 Stabilita bentonitu - souhrn

Kombinace faktorů uvedených v Kap. 3.1-3.9 bude ovlivňovat dlouhodobou stabilitu bentonitu v HÚ. V počáteční fázi HÚ bude buffer převážně suchý obsahující pouze vstupní vlhkost pelet/ bloků. Po uložení UOS bude docházet k jednostrannému ohřívání, a tedy vývoji teplotního gradientu směrem do okolí. Naopak z okolního prostředí bude postupem času docházet k sycení vodou, a tak k dočasnému vzniku hydraulických gradientů (do doby úplného nasycení bufferu). V souvislosti se sycením bentonitu podzemní vodou bude docházet ke změně z oxických na anoxické podmínky, které budou ovlivňovat korozi UOS a MB činnost (Pospíšková et al. 2022).

Stupeň nasycení se ukazuje jako zcela zásadní faktor ovlivňující parametry bentonitu. Přítomnost vody vede k rozpouštění vodorozpustných solí a karbonátů. Pórová voda získaná ze sukčního

lysimetru ukazovala s narůstajícím časem odběru pokles v koncentraci některých prvků. V kompaktovaném nasyceném bentonitu dochází ke zvýšení koncentrace pórového roztoku. Se změnami v pórovém roztoku souvisí změny v CEC i míra MB aktivity. Vývoj MB osídlení ve vzorcích suspenzí a KB ukazuje, že anaerobní podmínky jsou z hlediska MB aktivity příznivé a dochází zde k rozvoji relativní abundance fakultativně anaerobních i obligátně anaerobních skupin mikroorganismů (IRB, SRB, acetogeny). Konkrétní MB složení vzorku je závislé na typu vzorku (chemismus bentonitu a použitých saturačních médií, poměr pevné fáze/objemová hmotnost atd.) a délce inkubace. U dlouhodobě anaerobně inkubovaných vzorků suspenzí byly dále detekovány změny ve swell indexu i CEC, což může naznačovat negativní vliv MB aktivity na vlastnosti bentonitu.

Kompaktizací bentonitu na vysoké objemové hmotnosti je možné docílit omezení MB aktivity. Pro bentonit Rokle byla stanovena limitní hodnota vlhké objemové hmotnosti pro aktivitu SRB 1670-1692 kg/m^3, přičemž kultivovatelnost SRB byla zachována i při nejvyšší testované vlhké objemové hmotnosti 1940 kg/m^3. Pro bentonit BaM bylo zjištěno, že limitní hodnota pro mikrobiální aktivitu se nachází v rozmezí suché objemové hmotnosti 1800-2000 kg/m^3. Limitní objemové hmotnosti bentonitu BCV jsou aktuálně stanovovány v projektu TAČR Bioben. Zjištěné výsledky bude nezbytné ověřit na dalších typech českých bentonitů tak, aby bylo možné stanovit univerzální hodnotu suché objemové hmotnosti platnou pro český bentonit.

Saturační roztok může být zdrojem živin pro MB aktivitu v bentonitu a může též představovat zdroj bakterií, jako je tomu například u sycení podzemní vodou. Výsledky nezávislých experimentů ukázaly, že mikroorganismy původem ze saturačních médií se zpravidla na detekovaném výsledném mikrobiálním složení bentonitu po kontaktu příliš nepromítají, a to jak ve formě suspenze, tak kompaktovaného bentonitu. Obě prostředí spolu tedy komunikují jen velmi omezeně, což je opakovaně popisováno též u zahraničních studií. Vliv mikrobiologického složení podzemních vod bude tedy pro mikrobiologický vývoj v HÚ RAO pravděpodobně nízký.

Sycení vodou kombinované s teplotou do 100 °C způsobuje v prvních měsících zvýšení CEC a změnu poměru vyměnitelných kationtů. Po přibližně po 2 letech zatěžování došlo k návrat CEC k hodnotám pro NS. Minimální je vliv zatěžování do 100 °C na geotechnické parametry. Zcela chybí data ze zatěžování do 100 °C pro BCV bentonit. Stejně tak chybí data pro swell index a SSA_EGME. U suspenzí byla prokázána negativní závislost mikrobiální aktivity a teploty a jako limitní hodnota byla stanovena teplota 90 °C, kdy již nebyla pozorována ani mikrobiální aktivita, ani následná regenerace. Nižší teploty (50-60 °C) však mohou naopak vést k proliferaci termofilních skupin bakterií a nezávislé výsledky z in-situ experimentů potvrzují přítomnost MB aktivity v bentonitu za zvýšených teplot. V bentonitu tedy existuje řada termofilních druhů bakterií a zvýšené teploty až do výše 80-90 °C tak pravděpodobně nebudou limitovat MB aktivitu v HÚ RAO, pokud bude celý systém zavodněný.

Přídavek práškového Fe obecně způsobuje pokles hodnot CEC. Z důvodu parametrů experimentu (malý objem zatěžovaného bentonitu) nebylo možné vliv práškového Fe ověřit jinými chemickými metodami. Zároveň experiment narazil na limity spojené s kontaminací bentonitu částicemi Fe, které mohly výsledky analýz ovlivnit. Z geotechnických analýz byly provedeny zkoušky s přítomností Fe pouze na tepelně zatěžované suspenzi bentonitu Rokle a to po 11 měsících vystavení teplotě 95 °C. Mez tekutosti přítomnost práškového Fe v teplotně zatěžované suspenzi neovlivnila a hodnoty odpovídají teplotně zatěžované suspenzi bez Fe. Byla však zaznamenána mírně zvýšená propustnost v případě všech tří sledovaných objemových hmotnostech a tomu odpovídá i mírné snížení bobtnacího tlaku, zaznamenané také u všech

sledovaných objemových hmotností vzhledem k zatěžované suspenzi bez Fe. Ačkoli je k dispozici pouze měření po jednom časovém intervalu (11 m) je důvodné zmínit systematičnost změn u všech tří sledovaných objemových hmotností. Přítomnost práškového železa dále prokazatelně zvyšuje MB aktivitu a obzvláště aktivitu SRB u bentonitové suspenze i KB. Naopak přítomnost kovových vzorků v zahřívaném korozním in-situ experimentu s kompaktovaným bentonitem BaM nevedl k prokazatelným změnám v MB složení u vzorků ve vnějších částech bentonitové bariéry a v těsném okolí kovového vzorku. Mikrobiální aktivita v bentonitu je tedy s jistotou ovlivňována přítomností železa, nicméně výsledný efekt je pravděpodobně závislý na objemové hmotnosti a dále je též ovlivněn velikostí reaktivní plochy železa, která je u práškového železa násobně větší než v případě UOS. Jelikož však není možné vzorky s práškovým železem spolehlivě analyzovat, je nezbytné v budoucnu provést kontrolovaný laboratorní korozní experiment s kovovými kupony v kompaktovaných bentonitech za podmínek potencující MB aktivitu a MIC, kde by bylo možné lépe odhadnout korozní chování a možné alterace bentonitu spojené s tvorbou korozních produktů a jejich interakce s bentonitem.

Kontaktování bentonitové suspenze s YCW vedlo k výrazné změně v zastoupení vyměnitelných kationtů a s tím související nárust CEC a SWEP a pokles PROP. V KB způsobilo kontaktování s cementovou kostkou minimální změny jak v CEC, tak v SSA_EGME. V in-situ podmínkách byl bentonit B75 v kontaktu s cementovým materiálem ve formě válečků, které byly spolu s lisovanými bentonitovými válečky umístěny v podzemí ve vrtu, kde byly přirozeně syceny podzemní vodou Josef. Do vybraných vrtů byly bentonitové válečky umístěny střídavě s cementovými válečky. Další vrty byly vyplněny pouze bentonitovými válečky bez přítomnosti cementového materiálu. Takovýmto podmínkám vystavený bentonit vykazoval nižší hydraulickou vodivost po prvním odběru po 10 měsících bez ohledu na přítomnost cementu ve vrtu. Propustnost se však 20 měsících vrátila na úroveň neovlivněného bentonitu a výrazně se s dalším odběrem po 30 měsících nezměnila. Bobtnací tlak se choval odlišně, a to tím způsobem, že po prvním odběru nebyla zaznamenána žádná změna a ta se projevila až po 20 měsících snížením bobtnacího tlaku bez ohledu na přítomnost cementu ve vrtu. Po 30 měsících byl zaznamenán stejný pokles jako u vzorků z předchozího odběru. Došlo tedy k poklesu bobtnacího tlaku po 10 měsících, který se ani po 30 měsících nevrátil na svou původní hodnotu, ale ani nedošlo k jeho dalšímu poklesu. Kontakt s LPC dále ovlivňoval též MB chování bentonitu. Experiment na suspenzích bentonitu BaM a LPC prášku ukázal, že přítomnost LPC zásadním způsobem ovlivňuje vývoj mikrobiálního osídlení bentonitového vzorku a způsobuje pokles relativní abundance bakterií ve srovnání s čistě bentonitovými kontrolami. Dále je však nezbytné ověřit efekt vzájemné interakce obou materiálů v realističtějším uspořádání ve zhutněné podobě bentonitu a LPC.

Teplota zatěžování za 150-200 °C za sucha vedla ke zhoršení geotechnických i geochemických parametrů. Změny viditelné na bazálním píku smektitu byly diskutovány jako důsledek dehydratace smektitu. Zatěžování bentonitové suspenze při 150 °C způsobilo mírné zlepšení geotechnických i geochemických vlastností bentonitu. Pro zatěžování bentonitové suspenze při 150 °C je k dispozici minimum dat a není tak možné odlišit, zda se jednalo o výkyv nebo o dlouhodobý trend ve vlastnostech bentonitu. Při zatěžování za 150-200 °C chybí data pro kompaktovaný bentonit. Z mikrobiologického hlediska zatěžování prášku teplotou 150 °C po dobu 6-12 měsíců nevedlo ke kompletní sterilizaci matriálu, ale životaschopnost bakterií s časem významně poklesla. Teplotní sterilizace ve formě prášku je tedy poměrně obtížná. Jiné provedené experimenty však ukázaly, že teplotní sterilizace naopak funguje dobře u suspenzí. Přítomnost vody tedy představuje zásadní parametr ovlivňující schopnost přežívání extrémních podmínek

u přirozených bakterií v bentonitu a vývoj saturace společně s vývojem teploty v HÚ RAO tak může být velice zásadním parametrem k predikování budoucí mikrobiální aktivity v HÚ RAO. Tento vztah by tak měl být předmětem dalšího výzkumu.

Zcela neprozkoumaný zůstává vliv ozařování na geochemické a geotechnické vlastnosti bentonitu. Naopak vliv ozařování na MB aktivitu je již poměrně dobře prozkoumán. Experimenty za použití vysokých dávkových příkonů ukázaly možnost sterilizace bentonitového prášku i suspenze při aplikaci celkové dávky 27-70 kGy. Reakce přirozených mikroorganismů na dlouhodobé vystavení dávkovým příkonům očekávaným v HÚ RAO (cca 0,1 Gy/h) je aktuálně studována u bentonitové suspenze a KB v rámci projektu TAČR Bioben a na základě výsledků těchto experimentů bude možné udělat přesnější závěry.

Mikroorganismy v redukčních anaerobních podmínkách hlubinných prostředí využívají pro svůj energetický metabolismus jiné akceptory elektronů než kyslík, a to podle jejich energetické výhodnosti. V anaerobních podmínkách je tak hojně využívaných elektronovým akceptorem Fe^{3+}, a to bakteriemi IRB. Kromě metabolické činnosti IRB mohou redukci Fe^{3+} způsobovat i SRB, a to nepřímo redukcí Fe^{+} produkovaným sulfanem. V bentonitech je trojmocné železo Fe^{3+} součástí samotné minerální struktury montmorillonitu a zároveň se zde může vyskytovat též jako součást různých přídavných minerálů, což případ českých bentonitů na přídavné minerály velmi bohatých. Do jaké míry jsou oba tyto zdroje Fe^{3+} dostupné a využívané coby zdroje pro MB aktivitu a do jaké míry mohou být tyto procesy zodpovědné za změny v těsnící funkci bentonitu není známo. V českých bentonitech byl v rámci pilotních studií s mikrobiologicky zatěžovaným bentonitem pozorovány významné změny v chování a vzhledu bentonitu po MB zátěži a byl zde pozorován výrazný pokles SI a dále mírné změny v CEC a zastoupení vyměnitelných kationtů. Procesy zodpovědné za tyto pozorované změny však zůstávají neznámé a je proto nezbytné provést další experimenty a analýzy s cílem tyto procesy pochopit.

4 Navrhované práce

Posouzení stability bentonitu uvedené v Kap. 3 kombinuje data z jednotlivých projektů a experimentů. Většina experimentů simulujících zatěžování bentonitu bylo provedeno na max. 1-2 typech českých bentonitů. Podmínky jednotlivých experimentů se liší a s ohledem na omezený počet dat a limity analytických metod nebyly některé jevy dostatečně ověřeny a vysvětleny. Z dostupných dat vyplývá řada nezodpovězených otázek.

Na některé z těchto otázek mohou odpovědět experimenty v rámci aktuálně probíhajících projektů, jejichž výsledky zatím nejsou k dispozici. V aktuálně běžícím projektu Dismantling Mock-Up Josef (SO2022-035, DMCJ) bude analyzován bentonit B75 zatěžovaný v nasyceném stavu teplotou do 100 °C. Z projektu Inženýrská bariéra 200C (TK01030031, IB200C) bude možné doplnit analýzy práškového bentonitu zatěžovaného na 200 °C. Dlouhodobý efekt teploty na 150 °C bude možné zkoumat EURAD HITEC (N 847593) na práškovém bentonitu i suspenzi. Tepelně zatěžované vzorky KB, suspenze a práškového bentonitu budou analyzované také v korozním projektu EURAD Concord. Součástí Interakčního experimentu Bukov (IE Bukov) bude kompaktovaný bentonit zatěžovaný zvýšenou teplotou, sycením a kontaktem s LPC a OPC. Současně běží projekty zaměřené na mikrobiální aktivitu v bentonitu (TAČR Bioben), vzájemnou interakci bentonitu a LPC (EURAD MAGIC; EURAD DOPAS) či dlouhodobý zahřívaný in-situ korozní experiment (Pilotní korozní experiment Bukov (SO2020-086, PKE). Hlavním problémem výše uvedených experimentů je však omezené množství zatěžovaného materiálu k dalším analýzám. V některých případech je také možné využít zatížený materiál z již dokončených projektů. Příkladem může být H2020 CEBAMA, Výzkum vlastností materiálu pro bezpečné ukládání radioaktivních odpadu a vývoj postupu jejich hodnocení - FR TI 1/362. Materiál tak bude možné charakterizovat nově používanými metodami. Experimenty navrhované v následujících kapitolách mají za cíl doplnit již dostupná data a přispět k vyjasnění otázek souvisejících se stabilitou zatěžovaného bentonitu.

4.1 Nezatížené vzorky

4.1.1 Charakterizace bentonitů z vybraných ložisek

Velmi stručný popis:	Charakterizace nových vzorků bentonitu v nezatíženém stavu.
Hypotéza	V České republice se nacházejí bentonity (a montmorillonitické jíly), které dosud nebyly analyzovány. Jejich charakterizace rozšíří znalosti o potenciálních materiálech pro výplně HÚ.
Relevantnost pro HÚ	Rozšíření znalostí o českých bentonitech jakožto potenciálních materiálech pro HÚ.
Stručný popis a cíl experimentu:	Základní charakterizace nových vzorků bentonitu v rozsahu analýz uvedených v Kap. 2.
Odhadovaná délka experimentu (příprava,	Závisí na době potřebné pro vytipování lokalit, získání reprezentativních vzorků a provedení analýz.

provedení, intepretace výsledků):	
Doporučená stanovení:	CC, PXRD, CEC, SSA_EGME, LUH, SOR, DIF, MB (dle 4.15.4), SI, WL, PROP, SWEP

4.1.2 Ověření vlivu průmyslové úpravy (bez natrifikace) na parametry bentonitu

Velmi stručný popis:	Geochemické, mineralogické, geotechnické a MB parametry bentonitu průmyslově dodávaného budou porovnány s bentonitem odebraným in-situ v ložisku. Průmyslově zpracovaný bentonit nebude ovlivněn natrifikací.
Hypotéza	Průmyslové zpracování bentonitu ovlivňuje geochemické a MB parametry bentonitu. Kontakt s atmosférickými srážkami i průmyslovými stroji může výrazně ovlivnit složení pórové vody, sorpční vlastnosti a MB parametry.
Relevantnost pro HÚ	V DÚ05 „Návrhu koncepčního řešení bufferu, backfillu, zátek, výplní komor ostatních RAO, ostatních výplní a konstrukčních prvků“ (Svoboda et al. draft) je zmiňována možnost využití těženého bentonitu pro buffer a backfill. Tento bentonit se může výrazně lišit od bentonitu průmyslově zpracovaného.
Stručný popis a cíl experimentu:	Odběr vzorků bentonitu in-situ v ložisku bude cílen na kompletní postižení všech typů bentonitu přítomných na ložisku. Data budou srovnána s parametry průmyslově zpracovaného bentonitu pocházejícího ze stejného ložiska.
Odhadovaná délka experimentu (příprava, provedení, intepretace výsledků):	2 roky.
Doporučená stanovení:	CC, PXRD, CEC, SSA_EGME, LUH, SOR, DIF, MB (dle 4.15.4), SI, WL, PROP, SWEP

4.1.3 Stanovení limitní hodnoty suché objemové hmotnosti pro mikrobiologickou aktivitu u českých bentonitů

Velmi stručný popis:	MB aktivita potenciálně ohrožuje dlouhodobou stabilitu HÚ RAO. Zhutněním materiálu je možné MB aktivitu omezit až zcela zastavit. Pro jednotlivé různé typy českých bentonitů je nutné

	ověřit limitní hodnotu objemové hmotnosti nutné k potlačení MB aktivity.
Hypotéza	Zhutněním materiálu je možné MB aktivitu omezit až zcela zastavit - stanovení hodnoty suché objemové hmotnosti bentonitu nutné k potlačení MB aktivity.
Relevantnost pro HÚ	Příspěvek ke stanovení optimální hodnoty suché objemové hmotnosti bentonitového bufferu a backfillu v HÚ RAO.
Stručný popis a cíl experimentu:	Příprava KB o objemových hmotnostech 1400-2000 kg/m^3 pro různé typy bentonitů (co nejodlišnější v chemismu a mineralogii) s provedenou vstupní MB charakterizací, inkubace v MB příznivých podmínkách (metodika dle výstupů TAČR BioBen) a následná detekce rozvoje MB aktivity v závislosti na objemové hmotnosti.
Odhadovaná délka experimentu (příprava, provedení, intepretace výsledků):	2 roky.
Doporučená stanovení:	NGS, qPCR, další analýzy a přesná metodika budou upřesněny dle výsledků TAČR BioBen - (NmetS).

4.2 Teplotní zatěžování BCV při 95 °C v suchém, mokrém a kompaktovaném stavu

Velmi stručný popis:	Práškový, kompaktovaný i vlhčený bentonit bude zatěžován teplotou 95 °C. Zatěžovaný bentonit bude odebraný po 0,5, 1, 2, 3 4 a 5 letech zatěžování.
Hypotéza	Geochemické, mineralogické a geotechnické analýzy BCV bentonitu zatěžovaného při teplotě 95 °C zcela chybí. Dostatečná délka experimentu osvětlí možnost ustálení změn parametrů bentonitu případně „návrat“ k výchozím hodnotám.
Relevantnost pro HÚ	Teplota do 100 °C je v současnosti uvažovaná pro český koncept HÚ. BCV je typickým příkladem Ca-Mg bentonitu těženého v ČR. Data doplní již provedené experimenty na jiných typech bentonitu (B75, Rokle) a zároveň experimenty s BCV za 150 a 200 °C a tím přispějí ke zhodnocení stability bentonitu za vyšších teplot.

Stručný popis a cíl experimentu:	Bentonit BCV bude zatěžován ve třech formách: práškový, v suspenzi a KB kompaktovaný na dvě rozdílné objemové hmotnosti v rozmezí 1200 a 1800 kg/m^3. Vybrané analýzy budou provedeny ihned po provedený jednotlivých odběrů. Dlouhodobý charakter experimentu umožní vysvětlit procesy ustálení parametrů bentonitu.
Odhadovaná délka experimentu (příprava, provedení, intepretace výsledků):	Min 6 let.
Doporučená stanovení:	CC, PXRD, CEC, SSA_EGME, LUH, SOR, DIF, MOSS, MB, SI, WL, PROP, SWEP, MB analýzy pouze doplňkové coby kontrola/doplnění výsledků TAČR Bioben + EURAD Concord).

4.3 Teplotní zatěžování BCV při 150 °C v kompaktovaném stavu

Velmi stručný popis:	KB bude zatěžován teplotou 150 °C. Zatěžovaný bentonit bude odebraný po 1, 2, 3 4 a 5 letech zatěžování.
Hypotéza	Geochemické, mineralogické a geotechnické analýzy BCV KB zatěžovaného při teplotě 150 °C zcela chybí. Při porovnání s výsledky z projektu HITEC bude možné lépe vysvětlit vliv kompakce na parametry bentonitu. Dostatečná délka experimentu osvětlí možnost ustálení změn parametrů bentonitu případně „návrat“ k výchozím hodnotám.
Relevantnost pro HÚ	Teplota do 150 °C urychlí degradaci bentonitu, která se nemusí projevit při nižších teplotách. BCV je typickým příkladem Ca-Mg bentonitu těženého v ČR.
Stručný popis a cíl experimentu:	KB BCV o objemové hmotnosti 1400 kg/m^3 je v současnosti zatěžován teplotou 150 °C a sycen destilovanou vodou v experimentu Little MockUp. První vzorky zatěžovaného bentonitu budou k dispozici říjnu 2023. Součástí projektu HITEC jsou pouze geotechnické parametry. Nutné doplnit geochemickou, mineralogickou a MB charakterizaci.
Odhadovaná délka experimentu (příprava, provedení, intepretace výsledků):	Min 6 let.

Doporučená stanovení:	CC, PXRD, CEC, SSA_EGME, LUH, SOR, DIF, MOSS, MB SI, PROP, SWEP, (pouze případné doplnění dat k TAČR Bioben a EURAD Concord).

4.4 Teplotní zatěžování při 150 °C BCV ve formě práškového bentonitu a suspenze ve velké ploše

Velmi stručný popis:	**Zahřívání BCV (150 °C) ve formě práškového bentonitu a suspenze ve velké ploše.**
Hypotéza	Svrchní vrstva bentonitu (krusta) má odlišné vlastnosti než zahřívaný vnitřní („bulk“) bentonit.
Relevantnost pro HÚ	Vytvoření krusty na kontaktu UOS/bentonit v operační fázi HÚ.
Stručný popis a cíl experimentu:	Charakterizace krusty z pohledu retardace a transportu radionuklidů.
Odhadovaná délka experimentu (příprava, provedení, intepretace výsledků):	3 roky a více – limitující pro úspěšné provedení experimentu je získání dostatečně velkého množství bentonitu reprezentujícího krustu.
Doporučená stanovení:	CC, PXRD, CEC, SSA, LUH, SOR, DIF, SI, PROP, SWEP (dostatečné množství se vytvoří za 2 roky).

4.5 Analýzy homoionních forem bentonitu

Velmi stručný popis:	Převedení BCV bentonitu do homoionních forem ve velkém objemu v suspenzi.
Hypotéza	Typ kationtu vázaný na vyměnitelných pozicích bentonitu výrazně ovlivňuje geochemické, mineralogické geotechnické i MB vlastnosti bentonitu. Získání relevantního počtu dat pro jednotlivé homoionní fáze je podmíněno přípravou homoionních forem ve velkém objemu.
Relevantnost pro HÚ	Homoionní fáze jsou krajním členem řady ve složení smektitu. Reprezentují podmínky, pokud by v HÚ došlo k plnému zastoupení vyměnitelných kationtů jedním druhem.
Stručný popis a cíl experimentu:	BCV bentonit bude převeden do homoionních forem. Homoionní formy budou smíšeny v různém poměru. Velkoobjemový typ

	experimentu umožní kompletní analýzu homoionních forem včetně geotechnických zkoušek.
Odhadovaná délka experimentu (příprava, provedení, intepretace výsledků):	2-3 roky.
Doporučená stanovení:	CC, PXRD, CEC, SSA_EGME, LUH, SOR, DIF, MOSS, SI, WL, PROP, SWEP.

4.6 Určení obsahu montmorillonitu jako parametru omezujícího vhodnost bentonitu v hlubinném úložišti

Velmi stručný popis:	Smísením čistého montmorillonitu s inertním materiálem o různém poměru umožní identifikaci mezní hodnoty obsahu montmorillonitu ovlivňující geochemické, mineralogické a geotechnické parametry.
Hypotéza	Zvyšující obsah montmorillonitu zvyšuje sorpční kapacitu, CEC, SSA_EGME i bobtnací tlak a snižuje hydraulickou vodivost. Pro nízký poměr montmorillonit:inertní materiál je závislost „lineární“. Pro vyšší poměry se závislost mění na logaritmickou. Limitní hodnota obsahu montmorillonitu je parametr určující použitelnost bentonitu v HÚ.
Relevantnost pro HÚ	Obsah montmorillonitu ovlivňuje sorpční, retardační i bobtnací vlastnosti bentonitu.
Stručný popis a cíl experimentu:	Čistý montmorillonit bude míchán s nejílovými minerály v různém poměru. Směsi budou testovány s ohledem na geochemické a geotechnické parametry určující použitelnost bentonitu v HÚ.
Odhadovaná délka experimentu (příprava, provedení, intepretace výsledků):	2-4 roky.
Doporučená stanovení:	CC, PXRD, CEC, SSA_EGME, LUH, SOR, DIF, MOSS, SI, WL, PROP, SWEP.

4.7 Experimentálně vyvolané „stařeni“ bentonitu v důsledku rozdílného složení saturačních medií

Velmi stručný popis:	Vysoká koncentrace vybraných iontů (např. K^+) v sytícím roztoku způsobuje modifikaci či alteraci bentonitu.
Hypotéza	„Stařeni“ bentonitu v důsledku jeho kontaktování se syntetickými vodami o vysokém obsahu zájmových kationtů způsobí alteraci bentonitu. Alkalické roztoky mohou aktivovat reaktivní Si-fáze přítomné v bentonitu.
Relevantnost pro HÚ	Alterovaný či modifikovaný bentonit vykazuje nižší sorpční vlastnosti i specifický povrch, což se může projevit na geotechnických parametrech bentonitu. Přítomnost reaktivního Si zvyšuje náchylnost UOS ke korozi. Tyto jevy mohou ovlivnit stabilitu. UOS okamžitě po jeho uložení a ovlivnit jeho dlouhodobou stabilitu.
Stručný popis a cíl experimentu:	Bentonit bude interagován s alkalickým roztokem a následně kontaktován s ocelovými plátky. Koroze a změny ve vlastnostech bentonitu budou zkoumány v intervalu týdnů-let. Korozní produkty budou mapovány na ocelových plátcích mikroskopicky.
Odhadovaná délka experimentu (příprava, provedení, intepretace výsledků):	2-5 let.
Doporučená stanovení:	CC, PXRD, CEC, SSA_EGME, LUH, SOR, DIF, MOSS, SI, WL, (PROP, SWEP – pokud bude dostatek materiálu), MB (qPCR, NGS u relevantních vzorků).

4.8 Stabilita kompaktovaného bentonitu v důsledku sycení podzemními vodami o odlišném složení a zatěžování za 95 °C

Velmi stručný popis:	Kompaktovaný bentonit bude sycen přírodními podzemními vodami a zatěžován teplotou 95 °C. Data budou porovnána s výsledky analýz bentonitu zatěžovaného ve formě suspenze a bentonitu zatěžovaného bez vlivu vody.

Hypotéza	Samostatně i jako celek bude zkoumán vliv složení podzemní vody, teploty i odlišné chování bentonitu v kompaktovaném stavu oproti suspenzi.
Relevantnost pro HÚ	Na lokalitách vytipovaných pro HÚ budou odebrány podzemní vody, které budou kontaktovány s práškovým bentonitem i KB. Specifické složení podzemní vody výrazně ovlivňuje geochemické i MB parametry bentonitu. Zvýšená teplota simuluje podmínky v HÚ a zároveň urychluje alteraci bentonitu.
Stručný popis a cíl experimentu:	Tento typ experimentu umožní kompletní analýzu změn v chemismu, mineralogii a také migračních parametrech a geotechnických vlastnostech bentonitu ovlivněného působením podzemní vody a zvýšené teploty.
Odhadovaná délka experimentu (příprava, provedení, intepretace výsledků):	2-4 roky.
Doporučená stanovení:	CC, PXRD, CEC, SSA_EGME, LUH, SOR, DIF, MOSS, SI, WL, PROP, SWEP.

4.9 Mikrobiologická degradace bentonitu

Velmi stručný popis:	Střednědobé vystavení bentonitové suspenze (BCV) aktivitě mikroorganismů v aerobních a anaerobních podmínkách, kompletní charakterizace alterovaného materiálu a následné ověření vlastností alterovaného bentonitu jako těsnicího materiálu (též v kompaktované podobě). Odhalení role akcesorických minerálů, a zvláště železitých fází v BCV na detekované změny v chování bentonitu. Role různých skupin mikroorganismů (např. NRB, IRB, SRB) při mikrobiální degradaci bentonitu a ověření vlivu tvorby biofilmu (extracelulární matrix, ECM) na změny pozorované v chování mikrobiálně zatěžovaného bentonitu.
Hypotéza	Bentonit vystavený činnosti bakterií vykazuje zhoršení jeho vlastností - pokles SI, změny v CEC, viz kap. 3.9.1. Za tento efekt jsou zodpovědné především anaerobní skupiny bakterií. Akcesorické minerály představují hlavní zdroj nutrientů pro rozvoj mikrobiální aktivity, a tedy určují míru mikrobiální aktivity (a zvyšují riziko alterace). Roli ve studovaných degradačních procesech hraje též tvorba biofilmu a extracelulární matrix.

Relevantnost pro HÚ	Simulace dlouhodobého působení mikrobiální aktivity v HÚ (extrémní podoba v suspendovaném stavu).
Stručný popis a cíl experimentu:	Bentonitové suspenze inkubované v aerobních a anaerobních podmínkách (s dotací živin - H_2, práškové Fe, specifická kultivační média), maximalizace mikrobiální zátěže, časové odběry. Pro studium vlivu akcesorických minerálů mikrobiální zatěžování na separované lehké a těžké frakci a na karbonátech a Fe-oxihydroxidech (bez vlivu jílových minerálů). Kontrolní suspenze v anaerobních podmínkách bez dotace živin a sterilní kontroly (TAČR Bioben - Z_{tech}). Celková charakterizace mikrobiálně zatíženého (potenciálně alterovaného) bentonitu, detekce případných změn vlastností.
Odhadovaná délka experimentu (příprava, provedení, intepretace výsledků):	Až 2 roky.
Doporučená stanovení:	NGS, qPCR, EB, CEC, SOR, SSA, LUH, SI, určení oxidačního stavu Fe pomocí barevných reakcí s vhodnými činidly. Analýzy vhodné pro aerobně zatěžované vzorky (kontrolní vzorky) – PXRD, CC, MÖSS, FTIR, TA, PROP, SWEP, WL.

4.10 Zatěžování bentonitu v kontaktu s různými formami Fe

4.10.1 Změny vlastností bentonitu v důsledku kontaktování s Fe-bohatými roztoky za teploty 50, 70 a 95 °C

Velmi stručný popis:	Zatěžování bentonitu za zvýšených teplot v kompaktovaném stavu a v suspenzi syceném Fe^{2+} bohatými roztoky v anaerobních i aerobních podmínkách.
Hypotéza	Využití práškového Fe při simulaci degradace bentonitu za přítomnosti korozních produktů způsobuje podhodnocení parametrů v důsledku kontaminace bentonitu částicemi Fe. Využití Fe-roztoků umožní minimalizovat vliv nezreagovaných částic práškového Fe. Zvýšená teplota a koncentrace Fe v sytícím roztoku urychlí proces alterace bentonitu.
Relevantnost pro HÚ	Simulace chemické a mikrobiální alterace bentonitu za zvýšené teploty.

Stručný popis a cíl experimentu:	Kompaktovaný i práškový bentonit budou syceny Fe-bohatými roztoky. V intervalu 0,5, 1, 2, 3, 4 a 5 let budou odebrány kontrolní vzorky bentonitu. Mikroskopicky bude monitorován vnik novotvořených Fe-fází. Vlastnosti zatěžovaného bentonitu budou porovnány s bentonitem kontaktovaným s práškovým Fe a s mikrobiologicky zatěžovaným Fe (Kap. 4.9 a 4.10.2).
Odhadovaná délka experimentu (příprava, provedení, intepretace výsledků):	6 let.
Doporučená stanovení:	CEC, SSA, LUH, PXRD, FTIR, SEM/EDS, SI, WL, SWEP. PROP, NGS, qPCR.

4.10.2 Laboratorní simulace dlouhodobého působení korozních produktů vzniklých vlivem MIC na kompaktovaný bentonit

Velmi stručný popis:	Zatěžování bentonitu za zvýšených teplot v kompaktovaném stavu v anaerobních podmínkách a vliv tvorby korozních produktů na stabilitu bentonitu
Hypotéza	Dlouhodobá interakce s korozními produkty může vést k degradaci bentonitu.
Relevantnost pro HÚ	Ověření vlivu korozních produktů na stabilitu bentonitu. Ověření vlivu kompaktizace na vývoj korozních produktů v reálných podmínkách bez přídavku práškového železa.
Stručný popis a cíl experimentu:	Kompaktovaný bentonit (různé objemové hmotnosti) s kovovými kupony bude inkubován v anaerobním prostředí bohatém na vodík, popř. obohacen o živiny za laboratorní teploty a zvýšené teploty (50-60 °C). Sterilní kontroly (Z_{tech} Bioben) k odlišení chemických a mikrobiologických efektů.
Odhadovaná délka experimentu (příprava, provedení, intepretace výsledků):	6 let.
Doporučená stanovení:	NGS, qPCR, CEC, SSA, LUH, XRD, FTIR, SEM/EDS (analýza korozních produktů).

4.11 Dlouhodobý experiment v „reálném“ 1D měřítku simulující teplotní zatížení a postupnou hydrataci

Velmi stručný popis:	Studium protichůdného působení zvýšené teploty (vliv zbytkového tepla kontejneru) a sycení bentonitové bariéry podzemní vodou.
Hypotéza	Po uložení kontejneru s VJP a zaplněním úložné jímky bufferem budou v bufferu probíhat protichůdné děje, na straně kontejneru vysušování působením tepla, na straně horniny sycení podzemní vodou.
Relevantnost pro HÚ	Znalost vlivu tepla a saturace umožní lepší popis pro bezpečnostní hodnocení (popis THM procesů bufferu).
Stručný popis a cíl experimentu:	Laboratorní experiment s vrstvou bentonitu „reálného měřítka“ tj. několika desítek cm, z jedné strany zahřívaná na teploty 95 °C a další zájmové, z druhé strany sycený podzemní vodou po tlakem relevantním pro HÚ. Sledování protichůdných dějů saturace a působení tepla pro popis THM procesů v bufferu. Ověření rozvoje MB aktivity v závislosti na rozvoji vývoje saturace a teplotního gradientu.
Odhadovaná délka experimentu (příprava, provedení, intepretace výsledků):	2-4 roky.
Doporučená stanovení:	CEC, SSA, LUH, PXRD, FTIR, SEM/EDS, SI, WL, SWEP. PROP, NGS, qPCR.

4.12 Laboratorně kontrolovaný experiment s LPC a kompaktovaným bentonitem

Velmi stručný popis:	Ověření oboustranného působení LPC betonu na vlastnosti bentonitu na rozhraní a zvýšené deteriorace betonu vlivem bentonitu v sycených celách (anaerobní podzemní voda) s kompaktovaným bentonitem a plackami betonu (LPC).
Hypotéza	Zvýšené pH bude alterovat vlastnosti bentonitu na rozhraní, může dojít k degradaci bentonitu, a naopak vlivem bentonitu může dojít k urychlení deteriorace betonové zátky. Výkyvy v koncentracích živin v podzemní vodě mohou významně narušit procesy na

	rozhraní. V laboratorně kontrolovaných podmínkách lze procesy snáze simulovat a pochopit.
Relevantnost pro HÚ	Pochopení efektů na rozhraní bentonit/cementových materiálů a vlastnosti bentonitu ovlivněné výluhem z cementu. Vliv bentonitu na stabilitu cementu v raných a pozdějších fázích.
Stručný popis a cíl experimentu:	Ověření stability navrhovaného systému na rozhraní bentonit/LPC beton v různých stádiích vývoje HÚ v různých časových odběrech. Monitorování vlivu reaktivního Si pocházejícího z bentonitu na stabilitu LPC.
Odhadovaná délka experimentu (příprava, provedení, intepretace výsledků):	6 let.
Doporučená stanovení:	NGS, qPCR, CC, pH, LUH, OM, SEM/EDS, strukturní analýzy na betonu i bentonitu ovlivněné interakcí materiálů a mikrobiální aktivitou, XRD, XRF, Ramanova Spektroskopie, FTIR, SI, WL, SWEP, PROP.

4.13 Ozařování bentonitu v suspenzi i v kompaktovaném stavu

Velmi stručný popis:	Vliv působení radiace na bentonit v suspenzi i v kompaktovaném stavu
Hypotéza	Buffer bude ovlivňován působením radiace z VJP.
Relevantnost pro HÚ	Působení radiace na bentonit může ovlivnit jeho vlastnosti
Stručný popis a cíl experimentu:	Ozařovací experimenty provedené ve velkém objemu/množství vzorku je nezbytné pro proveditelnost geochemických i geotechnických analýz.
Odhadovaná délka experimentu (příprava, provedení, intepretace výsledků):	2-5 let v závislosti na ozařovaném objemu/množství bentonitu.
Doporučená stanovení:	CEC, SSA, LUH, PXRD, FTIR, SOR, DIF, SI, WL, SWEP. PROP, MB analýza pouze doplňkově coby kontrola/doplnění výsledků z TAČR Bioben.

4.14 Mikrobiální znovuosídlení sterilního bentonitu z okolí sterilní zóny

Velmi stručný popis:	Rozvoj mikrobiálního osídlení ve sterilním bentonitu v těsném okolí ÚOS z nesterilního bentonitu ve vzdálenějším okolí sterilní zóny či podzemní vody. Bentonit BCV.
Hypotéza	Vlivem přítomnosti záření a dlouhodobého vystavení vysoké teplotě je možné očekávat významný pokles životaschopnosti až úplnou sterilizaci v zóně kolem UOS o neznámé šířce. Lze očekávat (a případně jak rychle) po skončení horké fáze případné mikrobiální oživení z okolního bentonitu (šíře sterilní zóny je neznámá) či podzemní vody?
Relevantnost pro HÚ	Odhad vývoje mikrobiální aktivity v zóně v těsném okolí UOS.
Stručný popis a cíl experimentu:	a) Dlouhodobé experimenty s KB (různé objemové hmotnosti, odběry v čase) - kontakt sterilního (viz Z_{tech} z projektu TAČR Bioben) a nesterilního materiálu – sledování rozvoje mikrobiálního osídlení ve sterilní zóně. b) Sterilní bentonit v kontaktu s podzemní vodou – rozvoj MB aktivity vodních mikroorganismů v bentonitu
Odhadovaná délka experimentu (příprava, provedení, intepretace výsledků):	2 roky.
Doporučená stanovení:	NGS, qPCR, EB, kultivace.

4.15 Metodická doporučení

4.15.1 Technická doporučení pro sjednocení laboratorních postupů při přípravě a zkoušení bentonitu a počtu analýz

Velmi stručný popis:	Metody, které jsou uvedeny v metodikách (DÚ01) se omezují pouze na základní formu provedení, ke které existují varianty, nebo rozšíření. Doporučení má specifikovat postup zkoušky v případě využití rozšířené formy metody. Upřesněn bude minimální počet opakování analýz tak, aby byly splněny podmínky pro statistické vyhodnocení. Součástí technického doporučení budou požadavky na strukturu dat s důrazem na rozlišení, zda se jedná o jednorozměrné, nebo vícerozměrné sady dat.

Hypotéza	Heterogenita a nedostatečný počet dat vyloučily statistické zpracování dat některých parametrů bentonitu v DÚ03. Rozšířením základní formy metody je možné získat nadstavbové informace o chování bentonitu.
Relevantnost pro HÚ	Získání dostatečně reprezentativní sady dat pro jednotlivé parametry. Rozšíření analyzovaných aspektů v rámci jedné zkoušky. Stanovení intervalů spolehlivosti.
Stručný popis a cíl experimentu:	Na základě dohody budou upřesněny požadavky k jednotlivým analýzám. Požadavky budou aplikovány na analýzy prováděné v Kap.4.1.1. Vyhodnocení dat povede ke zpětnému ověření vhodnosti požadavků.
Odhadovaná délka experimentu (příprava, provedení, intepretace výsledků):	Musí předcházet i navazovat na analýzy dle Kap. 4.1.1.
Doporučená stanovení (revize metod):	CC (včetně Ctot, TOC, Stot), PXRD, XRF, SI, W, PROP, SWEP.

4.15.2 Mezilaboratorní porovnání výsledků a metod

Velmi stručný popis:	Stanovení parametrů v různých laboratořích může dávat různě odlišné výsledky. To se týká měření jak v českých, tak i mezinárodních laboratořích.
Hypotéza	Rozdíly mohou být způsobeny principem zvolené metody, jejím provedením, případně vyhodnocením, nebo systematickou chybou na pracovišti, nebo zatím neobjasněným vlivem při provádění analýzy
Relevantnost pro HÚ	Získání spolehlivých, konzistentních výsledků z laboratoří
Stručný popis a cíl experimentu:	Identifikace metod, identifikace materiálů (české i mezinárodní), identifikace zdrojů dat, rešerše výsledků, analýza rozdílů a možných příčin. Plán doplňujících měření (hypotézy a strategie, parametry, materiály, laboratoře). Doplnění dat o nová měření a vyhodnocení
Odhadovaná délka experimentu (příprava, provedení, intepretace výsledků):	V závislosti na hypotézách a plánu měření, cca 2 - 3 roky.

Doporučená stanovení:	SWEP, PROP, PXRD, CEC_Cu, CC (včetně Ctot, TOC, Stot).

4.15.3 Ověření vhodnosti loužení při získání pórové vody

Velmi stručný popis:	Ověření vhodnosti loužení bentonitu při získání pórové vody.
Hypotéza	Ověření vhodnosti loužení bentonitu v destilované vodě při charakterizaci pórové vody bentonitu. Výsledky chemického složení výluhu budou srovnány s vodami získanými metodou vysokotlaké extrakce, sukčního lysimetru a ze saturačního experimentu na kompaktovaném bentonitu.
Relevantnost pro HÚ	Charakter pórové vody zásadním způsobem ovlivňuje MB činnost, korozi UOS a stabilitu bentonitu.
Stručný popis a cíl experimentu:	Pórový roztok bude získán metodou vysokotlaké extrakce, sukčního lysimetru a ze saturačního experimentu na kompaktovaném bentonitu. Chemické složení roztoku bude porovnáno s loužicími experimenty.
Odhadovaná délka experimentu (příprava, provedení, intepretace výsledků):	2 roky.
Doporučená stanovení:	CEC, LUH, SQE, DIF, SOR.

4.15.4 Vývoj metodiky vstupní mikrobiologické charakterizace bentonitu

Velmi stručný popis:	Vyvinutí jednotného postupu pro vstupní MB charakterizaci různých typů bentonitů a ověření jeho aplikovatelnosti u různých typů bentonitů. Nutná provázanost se vstupními chemickými a mineralogickými analýzami bentonitů prováděnými v 4.1.
Hypotéza	Jednotlivé druhy bentonitů se mohou lišit v MB osídlení a aktivitě v závislosti na lokalitě a chemickém a mineralogickém složení bentonitu. Nutné ověřit, zda je na základě unifikovaných vstupních charakterizací (MB, mineralogických a chemických) možné predikovat MB aktivitu v jednotlivých materiálech.
Relevantnost pro HÚ	Určení bentonitů vhodných pro použití v HÚ RAO z MB hlediska

Stručný popis a cíl experimentu:	Nadefinování metodického postupu pro jednotné vstupní charakterizace bentonitu a pilotní ověření funkčnosti navrženého postupu na bentonitech analyzovaných dle Kap. 4.1.1.
Odhadovaná délka experimentu (příprava, provedení, intepretace výsledků):	2 roky.
Doporučená stanovení:	NGS, qPCR, inkubace suspenze/KB o nízké objemové hmotnosti, kultivace (různá média), MPN (SRB).

5 Závěr

České bentonity byly analyzovány za posledních 20 let v ovlivněném i neovlivněném stavu. Data z více jak 40 projektů a odborných článků byla shrnuta v databázi DÚ02 „*Shromáždění všech dat výzkumu na českých bentonitech a LPC betonu“.* Statistické vyhodnocení dat z databáze v rámci podkladové zprávy DÚ03 (zpráva 624/2022, Šachlová et al. 2022) ukázalo na vysokou heterogenitu dat související s obdobím a laboratoří, kde byly analýzy provedeny; dostupností poznatků o dané analytické metodě; způsobem jejího provedení a heterogenitou analyzovaných bentonitů.

Pro účely aktuální zprávy byla provedena částečná redukce dat a charakterizace bentonitu v nezatíženém stavu byla zaměřena především na bentonit, u kterého byla provedena homogenizace v celém odebraném objemu a ke kterému existuje dostatek mineralogických, geochemických i geotechnických dat. I přes zpřesnění výběru se jako limitující ukazuje malý počet dat pro neovlivněný bentonit, který v některých případech vyloučil možnost filtrování odlehlých hodnot. Jako minimální požadavek se do budoucna jeví provádění analýz v triplikátu, ze kterého lze získat alespoň interval spolehlivosti dané analýzy. Například u analýz chemického a mineralogického složení bentonitu se analýzy v triplikátu běžně neprovádějí. Informace o intervalu spolehlivosti pro daný typ metody a danou matrici vzorku tak zcela chybí. U dvou a vícerozměrných dat nastává ještě náročnější situace s ohledem na vhodné minimální množství vzorků/ výsledků.

Omezený počet dat byl limitující i pro zpracování dat pro ovlivněné bentonity. Malý objem zatěžovaného vzorku často způsobuje omezení počtu analýz. Ze stejného důvodu často není možné provést kompletní sadu analýz zahrnující geochemické, mineralogické geotechnické i mikrobiologické parametry. Obvykle co projekt, to unikátní podmínky zatěžování bentonitu lišící se v teplotě, přítomnosti a složení sytících medií, délce zatěžování i typu zatěžovaného bentonitu. Heterogenita v použitých materiálech, podmínkách zatěžování i použitých analytických metodách vylučuje použití faktorové analýzy, pomocí které by bylo možné objektivně posoudit vliv zatěžování na stabilitu bentonitu.

Specifickým znakem českých bentonitů je: (a) vysoký obsah a variabilita nesmektitových minerálů (kaolinit, illit, karbonáty, Fe-oxihydroxidy, živce, křemen) a (2) Ca-Mg typ smektitu obsahujícího Fe^{3+}. Obsah nesmektitových minerálů společně s amorfními fázemi tvoří 30-40 hm. % bentonitu. Výše uvedené mineralogické vlastnosti se projevují na vysokém obsahu Fe_2O_3, CaO a Ctot. V porovnání se zahraničními mají české bentonity nižší kationtovou výměnnou kapacitu, celkový specifický povrch, swell index a bobtnací tlak a vyšší hydraulickou vodivost. U bentonitu BaM_NS bylo potvrzeno umělé nabohacení smektitem. U bentonitu B75_NS byl potvrzen zvýšený obsah Na_2O související s částečnou natrifikací, ke které došlo při průmyslové úpravě bentonitu. To potvrdil i zvýšený podíl Na^+ v pozici vyměnitelných kationtů. Vyšší intervaly spolehlivosti u mineralogického složení BCV_NS indikují nedostatečnou homogenizaci při manipulaci s bentonitem a zároveň souvisejí s malým počtem provedených analýz. Analýza vstupních materiálů v nezatíženém stavu také ukázala, že nebyly provedeny jednotné vstupní mikrobiologické charakterizace a není proto možné vstupní materiály porovnávat z mikrobiologického pohledu.

Pojem stabilita bentonitu v důsledku zatěžování je vnímán jako stabilita mineralogických, geochemických a geotechnických parametrů v čase. Vliv jednotlivých faktorů na stabilitu

bentonitu je podrobněji rozebrán v kap. 3 a vyhodnocení jednotlivých faktorů je také podkladem pro nové typy experimentů popsané v kap. 3.10. Ze zhodnocení stability vyplývá zcela odlišné chování bentonitu teplotně zatěžovaného za sucha a v kontaktu s vodou. Změny některých parametrů bentonitu byly pozorovány i u sycení medii nabohacenými o Na^+, K^+, Ca^{2+} a Mg^{2+}. Složení sytícího media se zároveň projevuje na změnách ve vlastnostech bentonitu kontaktovaného s cementovou kostkou a/nebo cementovou vodou. Z hlediska mikrobiologie může sytící médium představovat zdroj živin (a ty pak do veliké míry určují vývoj MB aktivity) anebo též zdrojem externích mikroorganismů (zde je efekt minimální).

Teplotní zatěžování bentonitu za sucha vede ke zhoršení parametrů bentonitu. Teplotní zatěžování bentonitu syceného vodou indikuje možné zlepšení některých parametrů na počátku zatěžování a „návrat“ k původním hodnotám nebo zhoršení parametrů po 2 a více letech zatěžování. Při sycení Na-Ca-Cl vodou bentonitu Rokle došlo ke zlepšení některých geochemických parametrů po více jak 3 letech experimentu. U bentonitu BCV byl podobný efekt pozorován po 0,5-1 roce. Nabohacení roztoku K^+ v kombinaci se zvýšenou teplotou může vést k illitizaci smektitu. Dlouhodobá data pro tyto experimenty chybí.

Zatěžování v důsledku kontaktu s práškovým Fe a/nebo ocelí způsobuje výrazné zhoršení některých geochemických parametrů. Lze předpokládat, že stejně se práškové Fe může projevit i na geotechnických parametrech. Z dosud provedených experimentů není patrné, do jaké vzdálenosti od oceli dochází k ovlivnění bentonitu. Obvykle jsou korozní produkty mapovány pouze ve vrstvě přiléhající k oceli. Velmi malé množství zatíženého bentonitu limituje provedení většího množství analýz a metod. Přítomnost práškového železa dále prokazatelně zvyšuje MB aktivitu a obzvláště aktivitu SRB u bentonitové suspenze i KB. Naopak přítomnost kovových vzorků v zahřívaném korozním in-situ experimentu s kompaktovaným bentonitem BaM o vyšší objemové hmotnosti nevedl k prokazatelným změnám v MB složení u vzorků ve vnějších částech bentonitové bariéry a v těsném okolí kovového vzorku.

Ze zhodnocení stability vyplývá řada nedořešených otázek souvisejících s: dlouhodobým chováním bentonitu, ustálením některých parametrů v čase, vratností mineralogických a geochemických změn ve smektitu, dostupností živin pocházejících z bentonitu pro mikrobiální aktivitu. V souvislosti se stabilitou v HÚ je nutné uvážit, jaký podíl z celkového množství bentonitu bude v kontaktu s cementovými a UOS komponentami. Vzhledem k nízké hydraulické vodivosti bentonitu lze předpokládat, že kontaktem s cementem a UOS komponentami budou ovlivněny pouze kontaktní zóny a převážná část bentonitu nebude zasažena. Pro ověření jsou nezbytná data z experimentů v reálném měřítku propojená s geochemickým a THMC modelováním.

Nově navrhované experimenty mají za cíl zodpovědět výše uvedené otázky a upřesnit některé analytické metody, jejichž aktuální způsob provádění není dostačující. Nové zatěžovací experimenty jsou navrženy převážně ve velkém měřítku tak, aby na zatíženém bentonitu mohly být analyzovány všechny zájmové parametry.

6 Reference

ANDRA. (2005): Ecoclay II: Effects of Cement on Clay Barrier Performance – Phase II. Final Report. EC project N° FIKW-CT-2000-00018.

BECKHOFF B., KANNGIEßER B., LANGHOFF N., WEDELL R., WOLFF H. (Eds.) (2006). Handbook of Practical X-Ray Fluorescence Analysis. Springer, SBN: 978-3-540-36722-2.

BENGTSSON, A., BLOM, A., JOHANSSON, L., TABOROWSKI, T., ERIKSSON, L. & PEDERSEN, K. (2017): Bacterial sulphide-producing activity in water saturated iron-rich Rokle and iron-poor Gaomiaozi bentonite at wet densities from 1 750 to 1 950 kg m-3. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co, Stockholm, Švédsko.

BILDSTEIN O., TROTIGNON L., PERRONNET M., JULLIEN M. (2006): Modelling iron-clay interactions in deep geological disposal conditions. Physics and Chemistry of the Earth, 31, 618–625.

BIRGERSSON M., (2017). A general framework for ion equilibrium calculations in compacted bentonite. Geochimica et Cosmochimica Acta 200, 186–200. https://doi.org/10.1016/j.gca.2016.11.010

BIRGERSSON, M., KARNLAND, O., 2009. Ion equilibrium between montmorillonite interlayer space and an external solution—Consequences for diffusional transport. Geochimica et Cosmochimica Acta 73, 1908–1923. https://doi.org/10.1016/j.gca.2008.11.027

BIRGERSSON M., BÖRGESSON L., HEDSTRÖM M., KARNLAND O., NILSSON U. (2009): Bentonite erosion – Final Report, SKB Technical report TR-09-34, Švédsko, 164 s.BRÁZDA L., ČERVINKA R. (2016) Determination of specific surface area of clay minerals by EGME method. Clay Colloids in Aqueous Systems, 3. - 4.2.2016, Berlín, Německo.

BRÁZDA L., ČERVINKA R. (2016) Determination of specific surface area of clay minerals by EGME method. In 4th BELBaR Annual Workshop; Berlín, Německo.

CARTER, D. L.; MORTLAND, M. M.; KEMPER, W. D. (1986): Specific Surface. Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods, 2nd ed.; American Society of Agronomy–Soil Science Society of America: Madison, USA, Chapter 16, pp 413–423.

CLAY MINERALS SOCIETY, 09-09-2022, https://www.clays.org/sourceclays_data/

ČERNÁ, K., ŠEVCŮ, A., STEINOVÁ, J. & POLÍVKA, P. (2018): Microbial mobility in saturated bentonites of different density. MIND Project.

ČERNÁ, K., ČERNOUŠEK, T., POLÍVKA, P. & ŠEVCŮ, A. (2019): Survival of microorganisms in bentonite subjected to different levels of irradiation and pressure. MIND Project.

ČERNÁ, K., HOFMANOVÁ, E., HLAVÁČKOVÁ, VERONIKA, BARTAK, D., VEČERNÍK, P., KAŠPAR, V., DOBREV, D. & ŠACHLOVÁ, Š. (2020): Limitní faktory pro přežití a proliferaci mikrobiálních společenstev, významných pro korozi bariér hlubinného úložiště radioaktivních odpadů (BioBen). TAČR TK02010169: Odborná zpráva za rok 2020. Technická univerzita v Liberci.

ČERNÁ, K., HOFMANOVÁ, E., HLAVÁČKOVÁ, VERONIKA, BARTAK, D., ŘÍHA, J., DOBREV, D., KAŠPAR, V., ŠACHLOVÁ, Š., VEČERNÍK, P. & ZUNA, M. (2022): Limitní faktory pro přežití a proliferaci mikrobiálních společenstev, významných pro korozi bariér hlubinného úložiště radioaktivních

odpadů (BioBen). TAČR TK02010169: Odborná zpráva za rok 2021. Technická univerzita v Liberci.

ČERNÍK, M., STEINOVÁ, J., MIKEŠ, J., ŠPAČEK, P., DOBREV, D., ČERNOUŠEK, T. & STOULIL, J. (2017): SÚRAO report 196/2017: Mikrobiální koroze za podmínek HÚ pro koncepci UOS-zhutněný bentonit. SURAO, Praha.

ČERNÍK, M., STEINOVÁ, J., MIKEŠ, J., ŠPAČEK, P., DOBREV, D., ČERNOUŠEK, T. & STOULIL, J. (2018): SÚRAO report 340/2019: Mikrobiální koroze za podmínek hlubinného úložiště pro koncepci ocelový UOS - zhutněný bentonit. SURAO, Praha.

ČERVINKA R., GONDOLLI J. (2015): Modelování pórové vody kompaktovaného bentonitu BaM. Projekt UOS č. 14E1054. Revize 1. ÚJV Zpráva č. 14407. ÚJV Řež, a.s.

ČERVINKA R., VOPÁLKA D., ADAM R., BRÁZDA L., DRTINOVÁ 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. Výzkumná podpora bezpečnostního hodnocení hlubinného úložiště. ZL Transport 3_1.PZ. SÚRAO TZ 24/2015. ÚJV Řež, a.s.

ČERVINKA, R., VAŠÍČEK, R., VEČERNÍK, P. & KAŠPAR, V. (2018): SÚRAO report 419/2019: Kompletní charakterizace bentonitu BCV 2017. SURAO, Praha.

ČERVINKA R., VOPÁLKA D. A KOL. (2019): Transport radionuklidů z Íložiště / Vstupní parametry a procesní modely pro zkodnocení transportu radionuklidů přes inženýrské bariéry. 2. Průběžná zpráva. ZL TRANSPORT 3_4.PZ. SÚRAO TZ 352/2019

ČGS (2021) Osvědčení o akreditaci č.: 426/2021 Příloha – Česká geologická služba. Praha, 4.8.2021.

ČSN EN 15935 (838126). *Kaly, upravený bioodpad, půdy a odpady – Stanovení ztráty žíháním*. Praha: Český normalizační institut. 2017.

DOBREV D., GONDOLLI J., KOUŘIL M., MENDOZA MIRANDA A. N., STOULIL J., STRAKA M. (2017): Korozní zkoušky s materiály navrženými pro konstrukci ukládacích obalových souborů. Výzkum a vývoj ukládacího obalového souboru pro hlubinné ukládání vyhořelého jaderného paliva do stádia realizace vzorku. SÚRAO TZ 248/2018. Rev č.1. ÚJV Řež, a.s.

DOBREV D., MENDOZA MIRANDA A. N., STEINOVÁ J., ZUNA M. (2020): Korozní zkouška v přírodním granitoidním prostředí. Zapojení v projektu Material Corrosion Test (MaCoTe), Část zakázky č.2 Realizace a vyhodnocení MaCoTe experimentu v Grimsel Test Site. Průběžná zpráva. SÚRAO TZ 194/2017 rev. č. 3. Praha.

DOHRMANN R., KAUFHOLD S., (2017): Characterization of the Second Package of the Alternative Buffer Material (ABM) Experiment — II Exchangeable Cation Population Rearrangement. Clays and Clay Minerals 65(2): 104–121.

DOHRMANN R., GENSKE D., KARNLAND O., KAUFHOLD S., KIVIRANTA L., OLSSON S., PLÖTZE M., SANDÉN T., SELLIN P., SVENSSON D., VALTER M. (2012): Interlaboratory CEC and Exchangeable Cation Study of Bentonite Buffer Materials: I. Cu(II)-Triethylenetetramine Method. Clays and Clay Minerals 60, 162–175.

DONG, H. (2012): Clay-Microbe Interactions and Implications for Environmental Mitigation. Elements 8(2): 113–118. https://doi.org/10.2113/gselements.8.2.113

DONG, H., KOSTKA, J. E. & KIM, J. (2003): Microscopic Evidence for Microbial Dissolution of Smectite. Clays and Clay Minerals 51(5): 502–512. https://doi.org/10.1346/CCMN.2003.0510504

FARDEAU, M.-L., BARSOTTI, V., CAYOL, J.-L., GUASCO, S., MICHOTEY, V., JOSEPH, M., BONIN, P. & OLLIVIER, B. (2010): Caldinitratiruptor microaerophilus, gen. nov., sp. nov. isolated from a French hot spring (Chaudes-Aigues, Massif Central): a novel cultivated facultative microaerophilic anaerobic thermophile pertaining to the Symbiobacterium branch within the Firmicutes. Extremophiles: Life Under Extreme Conditions 14(3): 241–247. https://doi.org/10.1007/s00792-010-0302-y

FERNÁNDEZ A., VILLAR A. M. (2010) Geochemical behaviour of a bentonite barrier in the laboratory after up to 8 years of heating and hydration. Applied Geochemistry 25(6):809-824, 10.1016/j.apgeochem.2010.03.001

FERNÁNDEZ A., CUEVAS J., RIVAS P. (2000): Pore Water Chemistry of the Febex Bentonite. MRS Proceedings, 663, doi.org/10.1557/PROC-663-573.

FERNÁNDEZ A.M., BAEYENS B., BRADBURY M., RIVAS P. (2004) Analysis of the porewater chemical composition of a Spanish compacted bentonite used in an engineered barrier. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C 29(1): 105-118, https://doi.org/10.1016/j.pce.2003.12.001.

FERNÁNDEZ A. M., MELÓN A., SÁNCHEZ D. M., GALÁN M. P., MORANTE R., GUTIÉREZ-NEBOT L., TURRERO M. J., ESCRIBANO A. (2008): Changes on the Mineralogical and Physical Properties of FEBEX Bentonite Due to Its Contact With Hyperalkaline Pore Fluids in Infiltration Tests. MRS Online Proceedings Library (OPL) 1107.

FERNÁNDEZ, A. M., KAUFHOLD, S., SÁNCHEZ-LEDESMA, D. M., REY, J. J., MELÓN, A., ROBREDO, L. M., FERNÁNDEZ, S., LABAJO, M. A. & CLAVERO, M. A. (2018): Evolution of the THC conditions in the FEBEX in situ test after 18 years of experiment: Smectite crystallochemical modifications after interactions of the bentonite with a C-steel heater at 100 °C. Applied Geochemistry 98: 152–171. https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2018.09.008

FERNÁNDEZ R., GONZÁLEZ-SANTAMARÍA D., ANGULO M., TORRES E., RUIZ A. I., TURRERO M. J., CUEVAS J. (2018): Geochemical conditions for the formation of Mg silicates phases in bentonite and implications for radioactive waste disposal. Applied Geochemistry 93: 1–9.

FITCH, A. (1995): Effect of Clay Charge on Swelling: A Clay-Modified Electrode Study. Clays and Clay Minerals 43(5): 607–614. https://doi.org/10.1346/CCMN.1995.0430510

FRANČE J. (1992): Bentonity ve východní části Doupovských hor. – Sborník geol. věd, Ložisková geologie, mineralogie. 30, 43–90.

GALAMBOŠ M., DAŇO M., ROSSKOPFOVÁ O., ŠERŠEŇ F., KUFČÁKOVÁ J., ADAMCOVÁ R., RAJEC P. (2012): Effect of gamma-irradiation on adsorption properties of Slovak bentonites. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry 292(2): 481–492.

GILMOUR, K. A., DAVIE, C. T. & GRAY, N. (2022): Survival and activity of an indigenous iron-reducing microbial community from MX80 bentonite in high temperature / low water environments with relevance to a proposed method of nuclear waste disposal. Science of The Total Environment 814: 152660. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152660

GONDOLLI J., BRYNYCH V., DRTINOVÁ B., HOFMANOVÁ E., VEČERNÍK P., VIDENSKÁ K., VOPÁLKA D. (2013): Výzkum interakčních procesů vybraných radionuklidů s materiály inženýrských bariér. ÚJV Zpráva č. 14270. ÚJV Řež, a.s.

GONDOLLI J., DOBREV D., KLAJMON M., ČERNOUŠEK T., KOUŘIL M. (2018a): Korozní produkty – 3. Průběžná zpráva. Výzkumná podpora bezpečnostního hodnocení hlubinného úložiště. SÚRAO TZ 217/2018. ÚJV Řež, a.s.

GONDOLLI J., KLAJMON M., KOUŘIL M. (2018b): Korozní produkty – Závěrečná zpráva. Výzkumná podpora bezpečnostního hodnocení hlubinného úložiště. SÚRAO TZ 329/2018. ÚJV Řež, a.s.

GORSKI, C. A., KLÜPFEL, L. E., VOEGELIN, A., SANDER, M. & HOFSTETTER, T. B. (2013): Redox Properties of Structural Fe in Clay Minerals: 3. Relationships between Smectite Redox and Structural Properties. Environmental Science & Technology 47(23): 13477–13485. https://doi.org/10.1021/es403824x

HADI, J., WERSIN, P., SERNEELS, V. & GRENECHE, J.-M. (2019): Eighteen years of steel–bentonite interaction in the FEBEX in situ test at the Grimsel Test Site in Switzerland. Clays and Clay Minerals 67(2): 111–131. https://doi.org/10.1007/s42860-019-00012-5

HAYNES, H. M., BAILEY, M. T. & LLOYD, J. R. (2021): Bentonite barrier materials and the control of microbial processes: Safety case implications for the geological disposal of radioactive waste. Chemical Geology 581: 120353. https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2021.120353

HERBERT H.-J., KASBOHM J., MOOG H.C., HENNING K.-H. (2004) Long-term behaviour of the Wyoming bentonite MX-80 in high saline solutions. Applied Clay Science, 26, 275-291.

HICKS, T., WHITE, M., BALDWIN, T., CHAPMAN, N., NEALL, F., MCKINLEY, I., HOOKER, P., RICHARDSON, P. & KING, S. (2009): Design Options for the UK's ILW Geological Disposal Facility. ASME 2009 12th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management, Volume 1, ASMEDC, Liverpool, UK.

HILSEN R. E., KOURNIKAKIS B., FORD B. (2005): Inactivation of Microorganisms by Gamma Irradiation. Bacillus atropheus spores and Erwinia herbicola. Technical Memorandum DRDC Suffield TM 2005-235. Defence Research and Development Canada.

HLAVÁČKOVA, V., SHRESTHA, R., HOFMANOVÁ, E., KEJZLAR, P., ŘÍHA, J., ŠEVCŮ, A., ČERNÁ, K. (submited): A protocol for the extraction of viable bacteria for identification of bacterial communities in bentonite. submitted to Applied Clay Science.

HOLMBOE M., JONSSON M. (2022): Effect of gamma-radiation on the redox state of the structural iron in bentonite clay. Nancy, France.

HOLMBOE M., KARIN NORRFORS K., JONSSON M. & WOLD S. (2011): Effect of γ-radiation on radionuclide retention in compacted bentonite. Radiation Physics and Chemistry 80(12): 1371–1377.

CHIKKAMATH S., MANJANNA J., KABADAGI A., PATIL D., TRIPATHI V. S., KAR A. S., TOMAR B. S. (2021): Gamma (60Co) irradiation and thermal effect on redox behavior of interlayer iron in montmorillonite. Applied Clay Science 200: 105893.

INOUE A., VELDE B., MEUNIER A., TOUCHARD G. (1988): Mechanism of illite formation during smectite to illite conversion in a hydrothermal system. Am. Miner. 73, 1325–1334.

KALE R.C, RAVI A. (2022): Influence of thermal gradient and canister corrosion on the hydration of compacted Barmer bentonite. Annals of Nuclear Energy 166, 108727

KARNLAND O., OLSSON S., NILSSON U. (2006) Mineralogy and sealing properties of various bentonites and smectite-rich clay materials. SKB Tech. Rep. TR-06-10, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co, Stockholm, Švédsko.

KAŠPAR, V., ŠACHLOVÁ, Š., HOFMANOVÁ, E., KOMÁRKOVÁ, B., HAVLOVÁ, V., APARICIO, C., ČERNÁ, K., BARTAK, D. & HLAVÁČKOVÁ, V. (2021): Geochemical, Geotechnical, and Microbiological Changes in Mg/Ca Bentonite after Thermal Loading at 150 °C. Minerals 11(9): 965. https://doi.org/10.3390/min11090965

KAUFHOLD S., KLIMKE S., SCHLOEMER S., ALPERMANN T., RENZ F., DOHRMANN R. (2020a): About the corrosion mechanism of metal iron in contact with bentonite. ACS Earth Space Chem. 4, 711–721.

KAUFHOLD S., SCHIPPERS A., MARX A., DOHRMANN R. (2020b): Sem study of the early stages of fe-bentonite corrosion and the role of naturally present reactive silica. Corros. Sci. 171, 108716.

KAUFHOLD S., DOHRMANN R., WEBER C. (2021): Evolution of the pH value at the vicinity of the iron-bentonite interface. Applied Clay Science, 201 105929.

KHALED, E. M., STUCKI, J. W. (1991): Iron Oxidation State Effects on Cation Fixation in Smectites. Soil Science Society of America Journal 55(2): 550. https://doi.org/10.2136/sssaj1991.03615995005500020045x

KIM, J., DONG, H., SEABAUGH, J., NEWELL, S. W. & EBERL, D. D. (2004): Role of Microbes in the Smectite-to-Illite Reaction. Science 303(5659): 830–832. https://doi.org/10.1126/science.1093245

KOSTKA, J. E., WU, J., NEALSON, K. H. & STUCKI, J. W. (1999): The impact of structural Fe(III) reduction by bacteria on the surface chemistry of smectite clay minerals. Geochimica et Cosmochimica Acta 63(22): 3705–3713. https://doi.org/10.1016/S0016-7037(99)00199-4

KŘÍŽOVÁ V., VINŠOVÁ H., VÍDENSKÁ K., PŘIKRYL R., ŠVANDOVÁ J., ZEMAN J. Hanuláková D. (2010): Sledování dlouhodobé stability inženýrských bariér na bázi bentonitu s využitím zatěžovacích procedur a experimentů „in situ“ a hodnocení jejich retardační funkce – Závěrečná zpráva. SÚRAO 2008/024/Šu. SÚRAO TZ 23/2010. VŠCHT v Praze.

LAINE H., KARTTUNEN P. (2010): Long-Term Stability of Bentonite. A Literature Review. POSIVA Working Report 2010-53, POSIVA OY, Olkiluoto, Finsko.

LANDOLT D., DAVENPORT A., PAYER J., SHOESMITH D. (2009): A Review of Materials and Corrosion Issues Regarding Canisters for Disposal of Spent Fuel and High-level Waste in Opalinus Clay. Canister Materials Review Board, NAGRA report 09-02.

LANSON B., LANTENOIS S., VAN AKEN P.A., BAUER A., PLANÇON A. (2012): Experimental investigation of smectite interaction with metal iron at 80 °C: Structural characterization of newly formed Fe-rich phyllosilicates. American Mineralogist (2012) 97 (5-6): 864–871. https://doi.org/10.2138/am.2012.4062

LANTENOIS S., LANSON B., MULLER F., BAUER A., JULLIEN M., PLANCON A. (2005): Experimental study of smectite interaction with metal Fe at low temperature: 1. Smectite destabilization. Clays and Clay Minerals, 53, 597–612.

LI Y.-L., VALI H., SEARS S. K., YANG J., DENG B., ZHANG C. L. (2004): Iron reduction and alteration of nontronite NAu-2 by a sulfate-reducing bacterium. Geochimica et Cosmochimica Acta 68(15): 3251–3260. https://doi.org/10.1016/j.gca.2004.03.004

LOPEZ-FERNANDEZ M., CHERKOUK A., VILCHEZ-VARGAS R., JAUREGUI R., PIEPER D., BOON N., SANCHEZ-CASTRO I., MERROUN M. L. (2015): Bacterial Diversity in Bentonites, Engineered Barrier for Deep Geological Disposal of Radioactive Wastes. Microbial Ecology 70(4): 922–935. https://doi.org/10.1007/s00248-015-0630-7

LOPEZ-FERNANDEZ M., MATSCHIAVELLI N., MERROUN, M. L. (2021): Bentonite geomicrobiology. Pp. 137–155. The Microbiology of Nuclear Waste Disposal. Elsevier.

MADIGAN M. T. (ed). (2012): Brock biology of microorganisms. 13th ed,. – Benjamin Cummings, San Francisco, 1043 pp.

MADSEN F.T. (1998): Clay mineralogical investigations related to nuclear waste disposal. Clay Miner. 33, 109–129.

MARTY N. C. M., FRITZ B., CLÉMENT A., MICHAU, N. (2010): Modelling the long term alteration of the engineered bentonite barrier in an underground radioactive waste repository. Applied Clay Science 47(1–2): 82–90. https://doi.org/10.1016/j.clay.2008.10.002

MATTIMORE V., BATTISTA J. R. (1996): Radioresistance of Deinococcus radiodurans: functions necessary to survive ionizing radiation are also necessary to survive prolonged desiccation. Journal of Bacteriology 178(3): 633–637.

MOORE, D.M., REYNOLDS, R.C. (1997): X-ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals, 2nd edition – Oxford University Press, Oxford, New York.

MOSSER-RUCK R., CATHELINEAU M., BARONNET A., TROUILLER A. (1999) Hydrothermal reactivity of K-smectite at 300 C and 100 bar: dissolution–crystallisation process and non-expandable dehydrated smectite formation. Clay Miner. 34, 275–290.

MULLIGAN C. N., YONG R. N., FUKUE M. (2009): Some effects of microbial activity on the evolution of clay-based buffer properties in underground repositories. Applied Clay Science 42(3): 331–335. https://doi.org/10.1016/j.clay.2008.03.002

MUURINEN A., CARLSSON T. (2013) Bentonite Pore Structure Based on SAXS, Chloride Exclusion and NMR Studies. VTT Working Report 2013-53.

OSACKÝ M., SUCHÁ V., CZIMEROVA A., MADEJOVA J. (2010): Reaction of smectites with iron in a nitrogen atmosphere at 75 °C. Applied Clay Science, 50, 237–244.

PACOVSKÝ ET AL. (2003): Verification of replacing bentonite by montmorillonitic clays, Partial report. Order No.: 101 502. SÚRAO TZ 68/03. Centre of experimental geotechnics CTU in Prague.

PACOVSKÝ J., VAŠÍČEK R., HAUSMANNOVÁ L. (2010): Experimentální výzkum materiálu na bázi bentonitu při dlouhodobém působení teploty a saturačního média s extrémními účinky – Závěrečná zpráva. SÚRAO 2008/028/Kunc. SÚRAO TZ 17/10. Centrum experimentální geotechniky ČVUT v Praze.

PARAB H., MAHADIK P., SENGUPTA P., VISHWANADH B., KUMAR S. D. (2020): A comparative study on native and gamma irradiated bentonite for cesium ion uptake. Progress in Nuclear Energy 127: 103419.

PASTINA B., HELLÄ P. (2006): POSIVA report 2006-05: Expected Evolution of a Spent Nuclear Fuel Repository at Olkiluoto. Posiva Oy.

PEDERSEN K. (2010): Analysis of copper corrosion in compacted bentonite clay as a function of clay density and growth conditions for sulfate-reducing bacteria. Journal of Applied Microbiology 108(3): 1094–1104. https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2009.04629.x

PERDRIAL J. N., WARR L. N., PERDRIAL N., LETT M.-C., ELSASS F. (2009): Interaction between smectite and bacteria: Implications for bentonite as backfill material in the disposal of nuclear waste. Chemical Geology 264(1–4): 281–294. https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2009.03.012

PERRONNET M., JULLIEN M., VILLIERAS F., RAYNAL J., BONNIN D., BRUNO G. (2008): Evidence of a critical content in Fe(0) on FoCa7 bentonite reactivity at 80 °C. Applied Clay Science, 38, 187–202.

POSPÍŠKOVÁ I., VAŠÍČEK R., HAVLOVÁ V., KOBYLKA D., POLÁK M., VOZÁR M., FIEDLER F., SVOBODA J., KUČEROVÁ M., ŠŤÁSTKA J., ČERNOCHOVÁ K., VEČERNÍK P., DOBREV D., HOFMANOVÁ E., FRÝBORT J., BÍLÝ T., RATAJ J., FRÝBORTOVÁ L, MILICKÝ M. (2022): Analýza FEPs úložiště VJP. MS SÚRAO 618/2022, Praha.

PŘIKRYL R., HANUS R., KOLAŘÍKOVÁ I., VEJSADA J. (2003): Verification of Substitution of Bentonites by Montmorillonitic Clays. Progress report of the 2nd stage. SÚRAO 10/2002/Wol. SÚRAO TZ 29/03. Institute of Geochemistry, Mineralogy and Mineral Resources CUNI.

PŘIKRYL R., HANUS R., KOLAŘÍKOVÁ I., VEJSADA J. (2004): Verification of Substitution of Bentonites by Montmorillonitic Clays: Structural, chemical, geochemical, and mineralogical parameters. Final report. Revision 1. SÚRAO 10/2002/Wol. SÚRAO TZ 56/04. Institute of Geochemistry, Mineralogy and Mineral Resources CUNI.

PUSCH R., KARNLAND O. (1988) Hydrothermal effects on montmorillonite. A preliminary study. SKB Technical Report 88-15, Stockholm, Švédsko.

PUSCH R., KASBOHM J. (2002): Alteration of MX-80 by hydtrothermal treatment under high salt content conditions. Svensk Kärnbränslehantering AB.

RUKAVIČKOVÁ L., PAČES T., HOLEČEK J. (2009) Expertní odhad hydraulických a hydrochemických parametrů, DZZ 3.3 projektu „Výzkum procesů pole vzdálených interakcí HÚ vyhořelého jaderného paliva a vysoce aktivních odpadů“. ČGS Praha.

SAVAGE D., WATSON C., BENBOW S., WILSON J. (2010): Modelling iron-bentonite interactions. Applied Clay Science, 47, 91–98.

SHRESTHA R., ČERNÁ K., SPANEK R., BARTAK D., ČERNOUŠEK, T., ŠEVCŮ A. (2022): The effect of low-pH concrete on microbial community development in bentonite suspensions as a model for microbial activity prediction in future nuclear waste repository. Science of The Total Environment 808: 151861. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151861

SOKOLOVA T., HANEL J., ONYENWOKE R. U., REYSENBACH A.-L., BANTA A., GEYER R., GONZÁLEZ J. M., WHITMAN W. B., WIEGEL J. (2007): Novel chemolithotrophic, thermophilic, anaerobic bacteria Thermolithobacter ferrireducens gen. nov., sp. nov. and Thermolithobacter carboxydivorans sp. nov. Extremophiles 11(1): 145–157. https://doi.org/10.1007/s00792-006-0022-5

STACKEBRANDT E. (2014): The Emended Family Peptococcaceae and Description of the Families Desulfitobacteriaceae, Desulfotomaculaceae, and Thermincolaceae. Pp. 285–290. In: ROSENBERG, E., DELONG, E.F., LORY, S., STACKEBRANDT, E., & THOMPSON, F. (eds): The Prokaryotes: Firmicutes and Tenericutes. Springer, Berlin, Heidelberg.

STOULIL J., KAŇOK J., KOUŘIL M., PARSCHOVÁ H., NOVÁK P. (2013): Influence of temperature on corrosion rate and porosity of corrosion products of carbon steel in anoxic bentonite environment. Journal of Nuclear Materials 443, 20-25.

STUCKI J. W. (2011): A review of the effects of iron redox cycles on smectite properties. Comptes Rendus Geoscience 343(2–3): 199–209. https://doi.org/10.1016/j.crte.2010.10.008

STUCKI J. W. (1984): Effects of Oxidation State of Octahedral Iron on Clay Swelling. Clays and Clay Minerals 32(5): 357–362. https://doi.org/10.1346/CCMN.1984.0320503

SVENSSON D., DUECK A., NILSSON U., OLSSON S., SANDÉN T., LYDMARK S., JÄGERWALL S., PEDERSEN K., HANSEN, S. (2011): Alternative buffer material. Status of the ongoing laboratory investigation of reference materials and test package 1. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co, Stockholm, Švédsko.

SVENSSON D., ERIKSSON P., JOHANNESSON L.E., LUNDGREN C., BLADSTROM T. (2019) Development and testing of methods suitable for quality control of bentonite as KBS-3 buffer and backfill. SKB Technical Report TR-19-25, Švédsko.

SVOBODA J. A KOL. (draft) Návrh českého koncepčního řešení bufferu, backfillu, zátek, výplní komor ostatních RAO, ostatních výplní a konstrukčních prvků (materiál + technické řešení). Závěrečná zpráva Dílčího úkolu 5. SÚRAO TZ XX/YYYY. ČVUT v Praze.

ŠEVCŮ A., STEINOVÁ J., BURKARTOVÁ K., ČERNÁ K. (2018): Microbial diversity in aged bentonites. MIND Project.

ŠINDELÁŘ J., 1982. Chemické složení některých bentonitů v severozápadních Čechách. Acta Universitatis Carolinae – Geologica 1982(1-2): 143-150.

TODORIKI S., FURUTA M., NAGAI T., HAYASHI T. (2000): Modification of radiation resistance of Bacillus spores by water. Radiation Physics and Chemistry 57(3): 531–534.

VAŠÍČEK R., PACOVSKÝ J., SCHROFEL J., HAUSMANNOVÁ L., KAISR Z., SMUTEK J., LEVOROVÁ M., VENKRBEC Z. (2010): Výzkum vlastností materiálů pro bezpečné ukládání radioaktivních odpadů a vývoj postupů jejich hodnocení. Výsledky řešení projektu FR-TI1/362 na CEG FSv ČVUT v Praze v r. 2010. Centrum experimentální geotechniky ČVUT v Praze.

VAŠÍČEK R., HAUSMANNOVÁ L., HOLÍKOVÁ P., SMUTEK J., LEVOROVÁ M., KAISR Z., VENKRBEC Z., ČERVINKA R., VEČERNÍK P., GONDOLLI J., ŠTAMBERG K., DRTINOVÁ B. (2013): Výzkum vlastností materiálů pro bezpečné ukládání radioaktivních odpadů a vývoj postupů jejich hodnocení. Závěrečná zpráva E4.4. FR-TI1/362. Centrum experimentální geotechniky ČVUT v Praze.

VAŠÍČEK R., HAUSMANNOVÁ L., ŠŤÁSTKA J, SVOBODA J., NÁDHERNÁ D., PACOVSKÁ D, HUBÁLKOVSKÁ J, VEČERNÍK P., TRPKOŠOVÁ D., GONDOLLI J., DVOŘÁKOVÁ M., HANUSOVÁ I., BĚLÍČKOVÁ L. (2016): D3.21 Final results of EPSP laboratory testing. DOPAS Deliverable n 3.21. Centrum experimentální geotechniky ČVUT v Praze.

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

VILLAR M. V., ARMAND G., CONIL N., DE LESQUEN Ch., HEROLD Ph., SIMO E., MAYOR J. C., DIZIER A., LI X., CHEN G., LEUPIN O., NISKANEN M., BAILEY M., THOMPSON S., SVENSSON D., SELLIN P. & HAUSMANNOVA L. (2020): D7.1 HITEC. Initial State-of-the-Art on THM behaviour of i) Buffer clay materials and of ii) Host clay materials. EURAD Project, Horizon 2020 No 847593.

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

VOKÁL A., BRŮHA P., ČUBA V., DOBREV D., HOKR M., KŘÍŽOVÁ V., MARYŠKA J., POLÍVKA P., SILBER R., VAŠÍČEK R., VEJSADA J., VELICKÝ M., VINŠOVÁ H., VOPÁLKA D. (2008): Výzkum procesů pole blízkých interakcí hlubinného úložiště vyhořelého jaderného paliva a vysoce aktivních odpadů – Závěrečná zpráva. SÚRAO TZ 18/08 (ÚJV Zpráva Z 2175). ÚJV Řež, a.s.

VOKÁL A., BRŮHA P., ČERVINKA R., DOBREV D., DRTINOVÁ B., HAVLOVÁ V., HERCÍK M., LACIOK A., LANDA J., PALÁGYI Š., POLÍVKA P., SILBER R., VEČERNÍK P., VEJSADA J., VELICKÝ M., VETEŠNÍK A., VOJTĚCHOVÁ H., VOPÁLKA D. (2009): Závěrečná zpráva Projektu výzkumu a vývoje „Výzkum bariér úložišť radioaktivních odpadů" ev. c. 1H-PK/25 v programu POKROK. ÚJV Zpráva č. 13074. ÚJV Řež, a.s.

VOKÁL A. (2010): Roční zpráva o řešení Projektu výzkumu a vývoje ev. c. FR-TI1/362 v programu TIP v roce 2010. Výzkum vlastností materiálů pro bezpečné ukládání radioaktivních odpadů a vývoj postupu jejich hodnocení. ÚJV Řež, a.s.

WERSIN P., JOHNSON L. H., MCKINLEY I. G. (2007): Performance of the bentonite barrier at temperatures beyond 100 °C: A critical review. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C 32(8): 780–788.

WILSON J., SAVAGE D., CUADROS J., SHIBATA M. RAGNARSDOTTIR K.V. (2006): The effect of iron on montmorillonite stability. (I) Background and thermo dynamic considerations. Geochimica et Cosmochimica Acta, 70, 306–322.

ZHANG G., DONG H., KIM J., EBERL D. D. (2007): Microbial reduction of structural Fe^{3+} in nontronite by a thermophilic bacterium and its role in promoting the smectite to illite reaction. American Mineralogist 92(8–9): 1411–1419. https://doi.org/10.2138/am.2007.2498.

Reference projekty

BioBen (2019-2023) Limitní faktory pro přežití a proliferaci mikrobiálních společenstev, významných pro korozi bariér hlubinného úložiště (BioBen), Číslo projektu: TAČR TK02010169, Financování: TAČR.

DMCJ (2022-2024) Dismantling MockUp Josef, číslo smlouvy: SO2022-035, Financování: SÚRAODOPAS (2007-2013) Full Scale Demonstration of Plugs and Seals, Číslo projektu: 323273, Financování: Evropská komise v programu Euratom FP7.

EURAD (2019-2024) European Joint Programme on radioactive Waste Management, Číslo projektu: 847593, Financování: Evropská komise v programu Euratom/H2020. DOI://10.3030/847593. WP Concord, WP HITEC, WP MAGIC.

H2020 CEBAMA (2014-2015) H2020-NFRP-2014/2015 grant agreement n° 662147 (CEBAMA European Union's Horizon 2020 Reasearch and Training Programme of the European Atomic Energy Community (EURATOM).

IB200C (2018-2025) Inženýrská bariéra 200C, číslo projektu: TAČR TK01030031, Financování: TAČR.

IE (2017-2022) Interakční fyzikální modely in-situ v PVP Bukov, číslo smlouvy SO 2017-053, Financování: SÚRAO

MaCoTe (2016-2023) Material Corrosion Test (MaCoTe), Číslo Smlouvy SÚRAO: SO 2019–131, Financování: SÚRAO.

PKE (2020-2030), Pilotní korozní experiment Bukov, číslo Smlouvy SÚRAO: SO 2020-086, Financování: SÚRAO

SÚRAO | SPRÁVA ÚLOŽIŠŤ RADIOAKTIVNÍCH ODPADŮ | NAŠE BEZPEČNÁ BUDOUCNOST

www.surao.cz