

ANALÝZA ČESKÝCH
BENTONITŮ –
VYHODNOCENÍ DAT
Z DATABÁZE (podkladová
zpráva)

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

Praha, 2022

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

NÁZEV ZPRÁVY: Analýza českých bentonitů – vyhodnocení dat z databáze (podkladová zpráva)

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, Kolková K.³, Stiblíková P.³, Hlaváčková V.³

ÚJV Řež, a. s.¹, České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební², Technická univerzita v Liberci³

(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., KOLKOVÁ K., STIBLÍKOVÁ P., HLAVÁČKOVÁ V. (2022): Analýza českých bentonitů – Vyhodnocení dat z databáze (podkladová zpráva), Zpráva SÚRAO 624/2022, Praha.

Lucie Hausmannová

Manažer projektu (SÚRAO)

Jiří Svoboda

Manažer projektu (ČVUT)

16.7.2022

Obsah

1	Úvod	13
1.1	Technické zadání	13
1.2	Struktura zprávy	14
2	Analýza dat	15
2.1	Chemické složení (CC)	20
2.1.1	CC – BCV	21
2.1.2	CC – B75, BaM, Rokle, Stránce a Zelený jíl	27
2.1.3	CC – metodické a statistické zhodnocení	31
2.2	Stanovení mineralogického složení (PXRD)	32
2.2.1	PXRD – BCV	32
2.2.2	PXRD – B75, BaM, Rokle, Stránce a Zelený jíl	35
2.2.3	PXRD – metodické a statistické zhodnocení	37
2.3	Kationtová výměnná kapacita	39
2.3.1	CEC – BCV	40
2.3.2	CEC – B75	43
2.3.3	CEC – BaM	45
2.3.4	CEC – Rokle	50
2.3.5	CEC – Stránce a Zelený jíl	52
2.3.6	CEC – metodické a statistické zhodnocení	53
2.4	Specifický povrch (SSA)	56
2.4.1	SSA_BET	56
2.4.2	SSA_EGME	60
2.4.3	Statistické a metodické zhodnocení	62
2.5	Swell index	62
2.5.1	SI – BCV	63
2.5.2	SI – Rokle	65
2.5.3	SI – BaM	67
2.5.4	SI – B75	67
2.5.5	SI – Stránce	67
2.5.6	SI - Zelený jíl	68
2.5.7	Metodické a statistické zhodnocení	70
2.6	Mez tekutosti (WL)	70
2.6.1	WL – BCV	72

2.6.2	WL – BaM	74
2.6.3	WL – Rokle	74
2.6.4	WL – B75	77
2.6.5	WL – Stránce	79
2.6.6	WL – Zelený jíl	80
2.6.7	Metodické a statistické zhodnocení	83
2.7	Mez plasticity.....	83
2.7.1	WP – BCV.....	83
2.7.2	WP – Rokle.....	83
2.7.3	WP – BaM.....	86
2.7.4	WP – B75.....	87
2.7.5	WP – Stránce.....	87
2.7.6	WP – Zelený jíl.....	88
2.7.7	Metodické a statistické zhodnocení	90
2.8	Specifická hustota	91
2.8.1	SpD – BCV.....	91
2.8.2	SpD – Rokle.....	91
2.8.3	SpD – BaM.....	92
2.8.4	SpD – B75.....	93
2.8.5	SpD – Stránce.....	94
2.8.6	SpD – Zelený jíl.....	95
2.8.7	Metodické a statistické zhodnocení	96
2.9	Hydraulická vodivost (PROP)	97
2.9.1	PROP – BCV	98
2.9.2	PROP – Rokle.....	106
2.9.3	PROP - BaM	123
2.9.4	PROP – B75	123
2.9.5	PROP – Stránce.....	132
2.9.6	PROP – Zelený jíl.....	135
2.9.7	Metodické a statistické zhodnocení	141
2.10	Bobtnací tlak	142
2.10.1	SWEP - BCV.....	142
2.10.2	SWEP - Rokle	152
2.10.3	SWEP – BaM.....	168
2.10.4	SWEP – B75.....	169

2.10.5	SWEP – Stránce	176
2.10.6	SWEP – Zelený jíl	178
2.10.7	Metodické a statistické zhodnocení	183
2.11	Pevnost v tlaku	184
2.11.1	RC – BCV	184
2.11.2	RC – Rokle	185
2.11.3	RC – BaM	185
2.11.4	RC - B75	185
2.11.5	RC – Stránce	186
2.11.6	RC – Zelený jíl	186
2.11.7	Metodické a statistické zhodnocení	187
2.12	Tepelná vodivost (THC)	188
2.12.1	THC – BCV	188
2.12.2	THC – Rokle	189
2.12.3	THC – BaM	192
2.12.4	THC – B75	192
2.12.5	THC – Stránce	193
2.12.6	THC – Zelený jíl	193
2.12.7	Metodické a statistické zhodnocení	193
2.13	Měrná tepelná kapacita	193
2.13.1	HEC – BaM	194
2.13.2	HEC – B75	194
2.13.3	HEC – Rokle	195
2.13.4	HEC – BCV	195
2.13.5	HEC - Stránce	195
2.13.6	HEC - Zelený jíl	195
2.13.7	Metodické a statistické zhodnocení	195
2.14	Mikrobiologické zhodnocení	195
2.14.1	BCV	196
2.14.2	Rokle	204
2.14.3	BaM	205
2.14.4	B75	209
2.14.5	Mikrobiologie – metodické a statistické zhodnocení	209
2.15	Další analýzy	216
3	Závěr	218

Seznam příloh (elektronické přílohy)

- Příloha 0A. Počet dat_souhrn
- Příloha 0B. DÚ03_MB_podvzorky_pocet dat_souhrn
- Příloha 1. Statistické parametry_CC
- Příloha 2. Statistické parametry_PXRD
- Příloha 3. Statistické parametry_CEC
- Příloha 4. Statistické parametry_SSA
- Příloha 5. Statistické parametry_PROP
- Příloha 6. Statistické parametry_SWEP
- Příloha 7. Statistické parametry_SpD
- Příloha 8. Statistické parametry_SI
- Příloha 9. Statistické parametry_WL
- Příloha 10. Statistické parametry_WP
- Příloha 11. Statistické parametry_RC
- Příloha 12. Statistické parametry_THC
- Příloha 13. Statistické parametry_HEC
- Příloha 14. Statistické parametry_MB_BCV
- Příloha 15. Statistické parametry_MB_Rokle
- Příloha 16. Statistické parametry_MB_BaM
- Příloha 17. Statistické parametry_MB_B75

Seznam použitých zkratk

AAS	atomová absorpční spektroskopie
AVG	průměr
$\pm L$	interval spolehlivosti Studentova rozdělení na hladině významnosti $\alpha = 0,05$.
B75	neaktivovaný bentonit Braňany-Černý vrch
BaM	bentonit nabohacený montmorillonitem Braňany-Černý vrch
BCV	bentonit Černý vrch dodaný na SURAO v roce 2017
BS	bentonitová suspenze
C_{ox}	obsah oxidu nepřečtený
$C_{ox.-c}$	obsah oxidu přečtený 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)triethyltetraminu
CEC-NH ₄	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
L	interval spolehlivosti Studentova rozdělení na hladině významnosti $\alpha = 0,05$.
LOI	ztráta žíháním
LPC	nízkoalkalický beton, <i>low pH concrete</i>
LUH	stanovení vyluhovatelných iontů
MB	mikrobiologie/mikrobiologický
MEDIAN	medián
MMT	montmorillonit
MÖSS	Mössbauerova spektroskopie
MNČ	Metoda nejmenších čtverců
MPN	most probable number – kultivační metoda

<i>n</i>	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, <i>ordinary Portland cement</i>
OS	ovlivněný stav bentonitu
PGM	Postgate medium – kultivační médium pro kultivaci SRB
PM	polarizační mikroskopie
PROP	hydraulická vodivost
PXRD	prášková rentgenová difrakce
qPCR	kvantitativní polymerázová řetězová reakce (quantitative polymerase chain reaction)
RAO	radioaktivní odpady
RC	pevnost v tlaku
rRNA	ribosomální RNA, součást malé podjednotky prokaryotického ribozomu
<i>s</i>	výběrová směrodatná odchylka
<i>s</i> 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
ZJ	Zelený jíl, bentonit z ložiska Skalná

Vysvětlení pojmů

Neovlivněný stav bentonitu

Bentonit reprezentativní pro dané ložisko dodávaný zpracovatelem (těžebnou 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 biologicky, případně kombinací výše uvedených parametrů.

Abstrakt

Tato zpráva navazuje na předchozí dílčí úkol: „02 Shromáždění všech dat výzkumu na českých bentonitech a LPC betonu“. Cílem zprávy je analýza dat shrnutých v předchozí etapě zaměřená na detailní popis vlastností českých bentonitů v neovlivněném i ovlivněném stavu. Data jsou zpracována statisticky. V závěru zprávy je z důvodu heterogenity dat navržen postup, jak výběr dat zúžit. Hlavními kritérii zúžení dat jsou: (1) reprezentativnost analyzovaného bentonitu pro celé ložisko; (2) homogenizace bentonitu v celém objemu; (3) výběr parametru charakterizujícího bentonit v jeho ovlivněném i neovlivněném stavu; (4) výběr analytické metody dostatečně citlivé pro daný parametr bentonitu a zároveň dobře porovnatelné napříč ovlivněnými i neovlivněnými stavy bentonitu. Zpráva slouží jako podkladová (datová zpráva) pro zprávu, která na ni navazuje - TZ 632/2022.

Klíčová slova

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

Abstract

This report builds on the previous sub-task: “02 Collection of all research data on Czech bentonites and LPC concrete”. The aim of the report is to analyse the data summarised in the previous stage aimed at a detailed description of the properties of Czech bentonites in both unaffected and unaffected state. The data are processed statistically. Due to the heterogeneity of the data, a procedure for narrowing down the selection of data is proposed at the end of the report. The main criteria for data narrowing are: (1) representativeness of the analyzed bentonite for the entire deposit; (2) homogenization of the bentonite throughout the volume; (3) selection of a parameter characterizing bentonite in its affected and unaffected state; (4) selection of an analytical method sensitive enough for a given bentonite parameter and for both affected and unaffected bentonite state. The report serves as a background (data report) for the report that follows it – TZ 632/2022.

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: „*Shromáždění všech dat výzkumu na českých bentonitech a LPC betonu*“ projektu měl za cíl vytvoření souboru dat (databáze dat) charakterizujících české bentonity v ovlivněném (OS) i neovlivněném (NS) stavu. Shrnuta byla data z technických zpráv i odborných článků. Data pocházejí z různých časových období a byla měřena v různých laboratořích.

Cílem této zprávy je analýza dat shrnutých v předchozí etapě včetně jejich statistického zpracování. V závěru zprávy je z důvodu heterogenity dat navržen postup, jak výběr dat zúžit. Hlavními kritérii zúžení dat jsou: (1) reprezentativnost analyzovaného bentonitu pro celé ložisko; (2) homogenizace bentonitu v celém objemu; (3) výběr parametru charakterizujícího bentonit v jeho ovlivněném i neovlivněném stavu; (4) výběr analytické metody dostatečně citlivé pro daný parametr bentonitu a zároveň dobře porovnatelné napříč ovlivněnými i neovlivněnými stavy bentonitu. Zpráva slouží jako podkladová (datová zpráva) pro zprávu, která na ni navazuje - TZ 632/2022.

V navazující právě budou vyhodnoceny faktory ovlivňující stabilitu českých bentonitů v krátkodobém i dlouhodobém měřítku. V případě, že data chybí, nebo jsou nedostatečná, budou navrženy způsoby jejich doplnění.

1.1 Technické zadání

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:

Analýza dat – 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 2).

Celkové zhodnocení dat a odůvodnění zúžení výběru s ohledem na typ bentonitu i analytickou metodu (Kapitola 3 **Error! Reference source not found.**).

2 Analýza dat

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 jíílů) obsažených v technických zprávách a odborných článcích. Zahrnuty byly bentonity B75, BaM a BCV komerčně produkované závodem Keramost, a.s. (závod Obrnice), bentonity pocházející z ložisek Rokle a Stránce a montmorillonitický jííl z ložiska Zelená-Skalná (Grün Erde ~ Zelený jííl, Franče 1992; Přikryl et al. 2003, 2004) Z důvodu zjednodušení terminologie je v následujícím textu termín bentonit používán i pro Zelený jííl. Při vytvoření databáze byly využity pouze číselné údaje. Údaje z grafů a obrázků nebyly zahrnuty.

V případě bentonitu z ložiska Rokle jsou zahrnuty, v souladu se strukturou databáze, 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).

Z celkového počtu 415 záznamů (Příloha 0A) pro bentonit bylo možné použít pro jednotlivé analýzy vždy jen určitou část. Tab. 1 uvádí počet dat zahrnutých do statistického zpracování a počet dat, které zahrnuty nebyly. Mezi data, která zahrnuta v analýze nebyla, patří data z opakujících se záznamů (data zahrnutá do databáze ve formě „Odkaz“ na dříve zahrnuté reference), data získaná z homoionních forem bentonitu a data nereprezentující daný bentonit, např. „Rokle-růžová“ (Vokál et al. 2008), která není reprezentativní pro bentonit Rokle, ale pouze pro určitou část bentonitu v ložisku.

Tab. 1 Počty dat neovlivněného (NS) a ovlivněného (OS) bentonitu zahrnuté (Inc.) a nezahrnuté (N.I.) do statistického zpracování. CC – chemické složení bentonitu, Ctot – celkový obsah uhlíku, Stot – celkový obsah síry, PXRD – prášková rentgenová difrakce, CEC – kationtová výměnná kapacita, SSA-BET – vnější specifický povrch, SSA-EGME – celkový specifický povrch, LUH – chemické složení výluhu, SQE – vysokotlaká extrakce pórové vody, SOR – sorpční vlastnosti, DIF – difúzní vlastnosti, TA – termická analýza, FTIR – infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací, MÖSS – Mössbauerova spektroskopie, PM – polarizační mikroskopie, SEM – skenovací elektronová mikroskopie. PROP – hydraulická vodivost, SWEP – bobtnací tlak, WL – mez tekutosti, WP – mez plasticity, SI – swell index, SpD – specifická hustota, RC – pevnost v tlaku, THC – tepelná vodivost, HEC – měrná tepelná kapacita.

Stav b.	Data ve stat. zprac	CC	Ctot	Stot	PXRD	CEC	SSA-BET	SSA-EGME	MB ¹
NS	Inc.	41	20	23	35	53	17	7	13
	N.I.	19	4	2	109	22	5	11	0
OS	Inc.	21	0	17	4	107	26	13	18
	N.I.	5	3	1	30	14	1	8	0

¹ vzorky pro mikrobiologické analýzy ve smyslu Referencí z Etapy 2, které mohly být dále využity pro tvorbu podvzorků jak jsou definované v záložce MB_podvzorky pro jednotlivé bentonity v rámci databází Etapy 2. Neovlivněné NS vzorky tak mohly být využity jako materiál pro tvorbu různých mikrobiologicky ovlivněných podvzorků. Mikrobiologické analýzy vstupního (mikrobiologicky neovlivněného) materiálu tak představují pouze část zde uvedených NS vzorků a v kapitole 2.14 jsou označovány jako VSTUP.

Stav b.	Data ve stat. zprac	LUH, SQE	SOR	DIF	TA	FTIR	MÖSS	PM	SEM
NS	Inc.	18	20	13	5	18	1	0	1
	N.I.	0	0	0	0	0	0	0	0
OS	Inc.	54	11	18	9	2	5	0	5
	N.I.	0	0	0	0	0	0	0	0

Stav b.	Data ve stat. zprac	PROP	SWEP	WL	WP	SI	SpD	RC	THC, HEC
NS	Inc.	112	118	37	19	32	21	0	6
	N.I.	1	1	0	0	4	0	25	28
OS	Inc.	111	101	76	62	37	1	0	3
	N.I.	42	1	0	0	0	0	80	155

Z Tab. 1 vyplývá nízký počet analýz pro ovlivněný stav (OS) bentonitu. Pokud uvážíme, že zahrnutá data se dále dělí dle druhu bentonitu (zahrnuto bylo 6 druhů bentonitu), které nejsou mezi sebou porovnatelné, dostáváme se na jednotky, max. první desítky dat pro neovlivněný stav (NS): Data pro OS bentonitu existují většinou v počtu $n = 1$ a není možné je nijak seskupit. V takovém počtu dat je možné provádět pouze omezené statistické zhodnocení.

S cílem získat maximální možné informace z dostupných dat byly i soubory dat o $n = 2-3$ zahrnuty do analýzy. Statistické parametry malých souborů dat mohou být zatíženy velkou nejistotou, při dalším zpracování by tento fakt měl být zohledněn.

Parametry polohy výběrového souboru dat byly vypočteny

$$AVG = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i,$$

kde AVG je výběrový aritmetický průměr, n je počet stanovení hodnot x_i Medián (MEDIAN) byl vypočten jako 50% kvantil.

Parametry variability výběrového souboru dat byly vypočteny

$$s = \sqrt{s^2} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2},$$

kde s je výběrová směrodatná odchylka, s^2 je výběrový rozptyl, a

$$SE = \frac{s}{\sqrt{n}}$$

kde SE je směrodatná odchylka výběrového průměru (standard error).

Jednotlivé soubory dat byly podrobeny Dixonově Q-testu pro vyloučení extrémních hodnot. Byla vypočtena testovací kritéria pro první Q_1 a poslední Q_n hodnotu testovaného výběrového souboru

$$Q_1 = \frac{x_2 - x_1}{x_n - x_1},$$

$$Q_n = \frac{x_n - x_{n-1}}{x_n - x_1}.$$

Jestliže

$$Q_1 > Q(\alpha; n), \text{ resp.}$$

$$Q_n > Q(\alpha; n),$$

kde $Q(\alpha; n)$ je kritická hodnota pro Dixonův test na hladině významnosti α pro počet stanovení n , pak byla testovaná hodnota vyloučena a test byl s novým souborem dat opakován.

Oboustranný interval spolehlivosti byl vypočten na základě Studentova t -rozdělení

$$\pm L = t\left(\frac{\alpha}{2}; n - 1\right) \frac{s}{\sqrt{n}} = t\left(\frac{\alpha}{2}; n - 1\right) SE,$$

kde $t\left(\frac{\alpha}{2}; n - 1\right)$ je oboustranná kritická hodnota Studentova rozdělení na hladině významnosti α o stupních volnosti $n - 1$. Hladina významnosti byla v případě všech výpočtů určena $\alpha = 0,05$.

Intervaly spolehlivosti byly vypočteny u výběrových souborů dat NS bentonitu, kde to počet stanovení spolehlivě umožňuje. Problematické je použití intervalu spolehlivosti o $n = 2$. V případě odlehlých hodnot (typicky PXRD data) je interval spolehlivosti velmi široký, často převyšující průměrnou hodnotu souboru dat, a není dále používán.

Jednofaktorová analýza rozptylu a následný t -test pro statistické zhodnocení vlivu parametru na zatížený vzorek v porovnání s NS nebyly z důvodu malého množství opakovaných měření aplikovány. Data pro ovlivněný bentonit byla porovnána s intervalem spolehlivosti dat pro NS bentonit a následně byl vyhodnocen vliv faktorů působících na OS bentonitu.

Grafické zpracování dat bylo provedeno v programech MS Excel, PAST a R. Grafy z programu PAST a R jsou zpracované ve formě tzv. krabicového grafu (box plot). Dolní a horní hranice boxu zobrazují 1. a 3. kvartil, rozdělující úsečka prezentuje 2. kvartil (medián), chybové úsečky znázorňují minimální a maximální naměřené hodnoty. Geotechnické parametry byly zpracovávány a vyhodnoceny v programu R. Výstupem je krabicový graf s číselnou hodnotou, která vyjadřuje průměrnou hodnotu z měřených dat. Součástí grafu je kromě krabicového grafu i grafické vyjádření měřených hodnot ve formě bodů. Názvy jednotlivých vzorků (záznamů) byly převzaty z DÚ 02 projektu a jsou složeny z názvu bentonitu, stavu interakce s vodou (resp. názvu vody, pokud byla jiná než destilovaná), teploty zatěžování (příp. jiného faktoru) a doby zatěžování (příklad: BCV_dry_150C_6m označuje BCV zatěžovaný za sucha při 150 °C po dobu 6 m ěsíců).

V případě dvourozměrných dat (závislosti bobtnacího tlaku, hydraulické vodivosti a tepelné vodivosti na objemové hmotnosti) byly nejprve měřené hodnoty aproximovány vhodnou funkcí (MNČ, MS Excel). Poté následoval výpočet procentuálních rozdílů měřených a aproximovaných hodnot. Rozdíly byly dále statisticky zpracovány jako jednorozměrné sady (stanovení průměrné hodnoty, výběrové směrodatné odchylky a intervalu spolehlivosti). V dalším kroku byly tyto statistické hodnoty přepočteny zpět inverzní funkcí k funkci aproximační na údaje odpovídající

danému parametru (tj. v příslušných jednotkách). V grafech závislostí parametrů jsou tak vykresleny aproximační funkce a intervaly $\pm L$ a $\pm 2s$, vždy pro NS a jeden OS.

Aproximační postup:

- Bobtnací tlak – aproximace exponenciální funkcí.
- Hydraulická vodivost – výpočet přirozeného logaritmu měřené hodnoty, aproximace přímkou.
- Součinitel tepelné vodivosti – aproximace přímkou.

Mikrobiologické zhodnocení

Jak je patrné ze sumární tabulky (viz Příloha 0A), překryv mezi mikrobiologickými a jinými analýzami aplikovanými na studovaných vzorcích je naprosto minimální a s aktuálním množstvím dat tedy není možné říct o vlivu mikroorganismů na stabilitu bentonitu téměř nic. Přestože existující data aktuálně neumožňují vyhodnotit efekt mikroorganismů na stabilitu bentonitu, jsou zcela jistě použitelná pro vyhodnocení obecné míry mikrobiální aktivity v různých typech bentonitů za různých podmínek prostředí, což s případnými mikrobiálními vlivy na bentonit úzce souvisí. Pochopení chování a vývoje mikrobiálního osídlení za různých podmínek prostředí může napomoci odhadu rozvoje mikrobiálního osídlení v budoucím HÚ RAO, což se může následně promítnout v návrhu konceptu úložiště tak, aby k nechtěným mikrobiálním vlivům (na korozi ÚOS či stabilitu bentonitu) docházelo pouze minimálně či vůbec.

Výsledky (mikro)biologických (MB) analýz jsou pro účely publikování zpravidla uváděny v sumární podobě ve formě grafů, jež na první pohled ukazují zjištěné trendy, neboť ty jsou pro interpretaci dat zásadní. Nebývá zde tedy zvykem uvádět primární číselná data, která by se dala použít pro vytváření databáze v rámci DÚ2 podobně, jako v případě jiných studovaných parametrů diskutovaných v kapitolách výše. Aby bylo možné pro účely mikrobiologické databáze shromáždit alespoň nějaká data, byly v případě mikrobiologie, na rozdíl od ostatních analyzovaných parametrů v kapitolách výše, do databáze zahrnuty hodnoty studovaných parametrů řádově odečtené z publikovaných grafů tak, aby bylo možné zachytit alespoň základní trend. Z těchto důvodů a také jelikož se jedná z velké části o data mezi experimenty principálně statisticky neporovnatelné (kvalitativní data, relativní vyjádření abundance aplikovatelné pouze vůči vstupnímu vzorku/negativní kontrole), pro analýzu získaných dat nebylo možné použít tradiční statistické metody. Interpretace výsledků každého biologického pokusu navíc vždy záleží na položené hypotéze, designu experimentu, způsobu odběru, provedených analýzách atd. Na tento problém upozorňujeme od zadání úkolu. I u dat, jež by bylo možné teoreticky statisticky hodnotit (např. množství CFU/g vzorku při kultivacích), je problémem nesourodost použitých kultivačních přístupů (např. různá média pro stejné cílové skupiny bakterií), jež znemožňují přesné vzájemné porovnání. Z těchto důvodů se v analýze proto omezujeme spíše na kvalitativní zhodnocení dat a nalezení trendů v míře mikrobiální aktivity v závislosti na typu vzorku a podmínkách prostředí.

Z výše uvedených důvodů byla shromážděná data analyzována následovně: přehled MB analýz provedených u jednotlivých podvzorků je uveden v souhrnné tabulce v Příloze 0B. Dále, pro každý záznam podvzorků v tabulkách pro jednotlivé typy bentonitů z DÚ2 byla nejprve vyhodnocena zjištěná přítomnost a míra mikrobiální aktivity a u jednotlivých podvzorků byly vyhodnoceny následující kategorie (Příloha 14-17, listy MB_podvzorky_analyza):

1. Mikroorganismy detekovány:
 - ano – pozitivní MB3_NGS/MB2_qPCR/MB2_K (kultivace)/MB2_EB (LD)
 - ne – negativní výše uvedené metody, u NGS signál shodný s pozadím
2. Mikrobiální aktivita:
 - Ano – Pozitivní signál MB3_NGS (detekované rody), MB2_qPCR ($RQ_{16S\ rRNA} \geq 2$; $Cq_{16S\ rRNA} \leq 25$), pozitivní LD či detekce produktů metabolismu
 - Ne – bez výše uvedených
 - ? - MB2_qPCR: $RQ_{16S\ rRNA} = 1$ (pouze pro vstupní vzorky/kontroly, ke kterým byla aktivita v jiných vzorcích vztahována při výpočtu relativní kvantifikace), bez znalosti původní Cq hodnoty
3. SRB/NRB/IRB/acetogeny aktivita/kultivovatelnost²:
 - Ano – MB2_qPCR: RQ pro specifické markery pro jednotlivé metabolické skupiny ≥ 2 , detekce produktů metabolismu (např. CuS), pozitivní kultivace
 - Ne – Bez výše uvedených
 - ? - MB2_qPCR: RQ = 1 (pouze vstupní vzorky/kontroly), bez znalosti původní Cq hodnoty
4. Limitní hodnota nutná pro potlačení MB aktivity:
 - Vyhodnocení hodnoty zátěže nutné pro významné omezení mikrobiální aktivity zjištěné u zatěžovaných podvzorků (napříč celými experimentálními sadami definovanými ve sloupci experiment (název))

Takto vyhodnocené tabulky jsou pro jednotlivé bentonity součástí Přílohy 14-17, listy MB_podvzorky_analyza. Tyto tabulky obsahují reference o původu jednotlivých vzorků a byly také doplněny informacemi o přesném popisu přípravy a nakládání se vzorky a sloužily jako podklad pro navazující kroky vyhodnocení.

V následujícím kroku byly jednotlivé záznamy podvzorků z tabulek rozděleny do následujících tří kategorií, kdy pomocným dělicím kritériem pro jednotlivé analýzy je u podvzorků jejich typ – tedy zda se jedná o kompaktní bentonit, bentonitovou suspenzi či bentonitový prášek:

1. Nezatěžované vstupní podvzorky (= VSTUP), které obsahují jednak vzorky bentonitového prášku a jednak počáteční bentonitové suspenze, které nebyly inkubovány; překryv těchto vstupních podvzorků s neovlivněnými vzorky NS uvedenými v Tab. 1 je pouze částečný, neboť jednotlivé vzorky NS mohly sloužit pro tvorbu několika různých podvzorků, které mohly být dále mikrobiologicky zatěžované či nezatěžované.
2. Podvzorky inkubované za podmínek nelimitujících mikrobiální aktivitu (detekce rozvoje mikrobiální osídlení v různých příznivých podmínkách prostředí, a tedy vyhodnocení mikrobiálního potenciálu) (=INKUBACE); zde se jedná o bentonitové suspenze či kompaktní bentonity.
3. Podvzorky cíleně zatěžované za účelem potlačení mikrobiální aktivity (=LIMITY); zde se jedná o bentonitové suspenze či kompaktní bentonity; jsou zde definované druhy zátěže s cílem co největší porovnatelnosti mezi různými typy bentonitů.

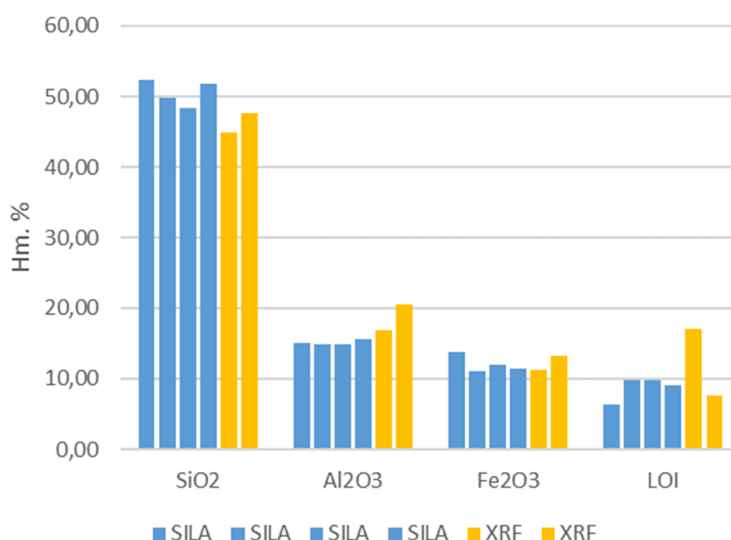
² Data ve výsledných tabulkách vyznačena červeně, pokud se jedná pouze o výsledky z kultivačních analýz (= detekce kultivovatelnosti), černě, pokud se jedná o detekci mikrobiální aktivity, jak je nedefinovaná výše (qPCR, LD, NGS). Pokud byly u vzorku analyzovány jak kultivovatelnost, tak aktivita, jsou uvedené oba výsledky (barevně odlišené). V opačném případě je uvedeno pouze jeden výsledek.

Toto vyhodnocení bylo provedeno pro každý bentonit zvlášť. Výsledné tabulky jsou součástí elektronické přílohy jako separátní listy nazvané VSTUP, INKUBACE a LIMITY v Přílohách 14-17 a byly pro snadnější orientaci oproti výchozím tabulkám v listech MB_podvzorky_analyza popsaným výše mírně zjednodušené. Pro účely poskytnutí rychlého přehledu v textu byly ze sumárních tabulek na listech VSTUP, INKUBACE a LIMITY v Příloze 14-17 dále vytvořené zjednodušené tabulkové výtahy, které jsou součástí textů jednotlivých podkapitol v kapitole 2.14. V těchto souhrnných tabulkách však nezbytně došlo k poměrně velké redukci informací, takže pro podrobnější vzhled doporučujeme při čtení textu nahlížet přímo do rozsáhlejších tabulek v elektronické příloze. V kapitole 2.14 jsou popsány výsledky a závislosti zjištěné pro tyto tři kategorie podvzorků pro jednotlivé typy bentonitů a v závěru byla provedena syntéza dostupných informací napříč bentonity a byly také komentovány analytické přístupy.

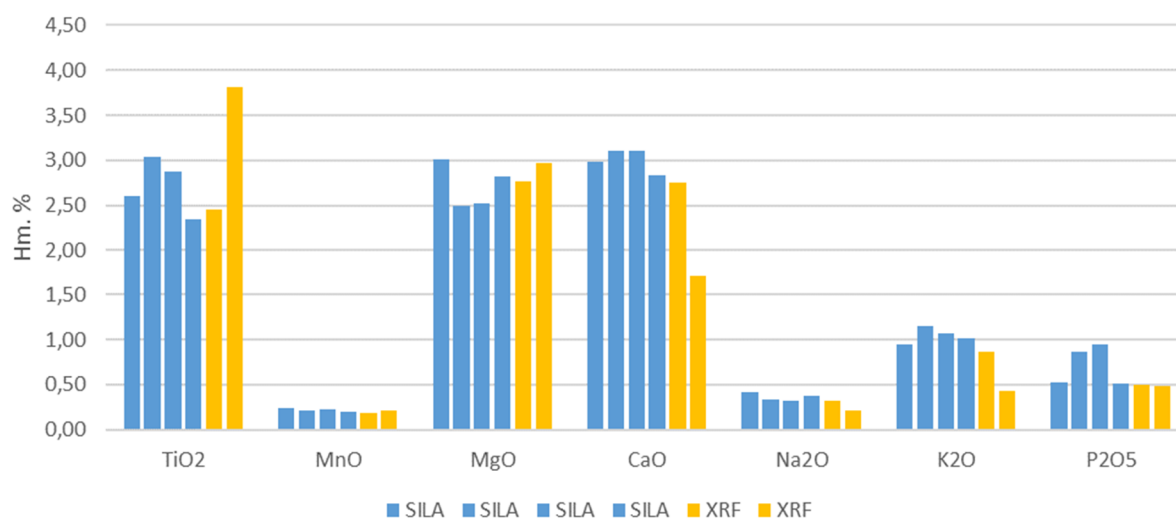
2.1 Chemické složení (CC)

Z celkového počtu 86 záznamů pro chemické složení (CC) bentonitu bylo do statistického zpracování zahrnuto 41 záznamů pro NS a 25 záznamů pro OS.

CC bylo analyzováno čtyřmi typy metod: silikátovou analýzou „na mokré cestě“ (SILA), metodou rentgenové fluorescence (XRF), atomovou emisní spektrometrií s indukčně vázaným plazmatem, (ICP-AES) a hmotnostní spektrometrií s indukčně vázaným plazmatem (ICP-MS). Zcela převažující jsou SILA a XRF. Zbylé dvě metody byly použity v prvních jednotkách analýz. Každá z výše uvedených metod pracuje na jiném principu. Pro ověření porovnatelnosti metod byl vybrán BCV bentonit. Z porovnání dat CC pro BCV bentonit (Obr. 1, Obr. 2) není patrný mezi metodami výrazný rozdíl.



Obr. 1 Porovnání chemického složení bentonitu BCV analyzovaného metodami rentgenové fluorescence (XRF) a silikátovou analýzou (SILA) – část první.



Obr. 2 Porovnání chemického složení bentonitu BCV analyzovaného metodami rentgenové fluorescence (XRF) a silikátovou analýzou (SILA) – část druhá.

Součástí analýz CC je hodnota ztráty žíháním (LOI), která se ukázala jako limitující při porovnání CC dat z různých pracovišť. U některých dat hodnota LOI chybí. S cílem srovnání maximálního množství dat byly hodnoty CC přepočteny na nulový obsah LOI dle rovnice:

$$c_{ox.-c} = \frac{c_{ox.}}{SUM - LOI} * SUM$$

kde: $c_{ox.-c}$ je obsah oxidu přepočtený, $c_{ox.}$ je obsah oxidu nepřepočtený, SUM je suma analýzy a LOI je ztráta žíháním.

Součástí statistického porovnání tak jsou původní data i data přepočtená (značení „-c“ za názvem vzorku).

2.1.1 CC – BCV

Statistické parametry pro CC NS bentonitu BCV (BCV_NS) jsou uvedeny v Příloze 1. Data pro OS BCV pocházejí ze dvou různých experimentů:

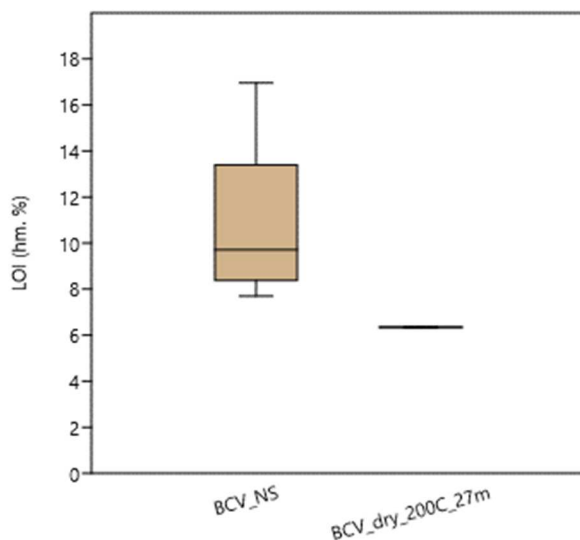
- BCV teplotně zatěžovaný za sucha na 200 °C po dobu 27 měsíců (Laufek et al. 2021).
- BCV kontaktovaný s deionizovanou vodou (BCV_BS) po dobu 3 týdnů až jednoho roku (Černá et al. 2021).

CC BCV_NS a CC BCV_dry_200C_27m bylo měřeno včetně stanovení LOI. Obr. 3 uvádí hodnoty původní i hodnoty přepočtené na 0,00 hm. % LOI (koncovka „-c“ v názvu vzorků). CC BCV_BS bylo měřeno bez stanovení LOI (koncovka „-a“ v názvu vzorků).

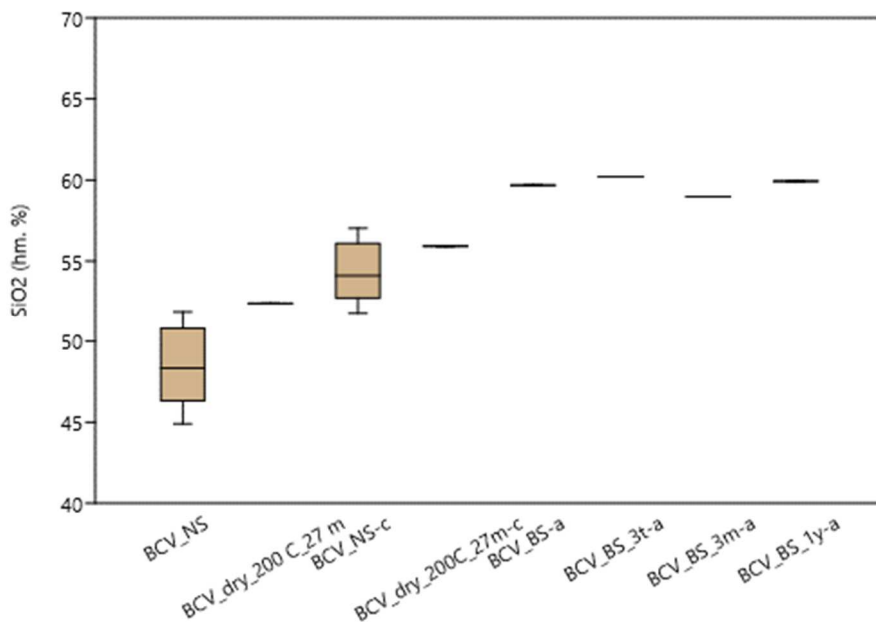
U některých analyzovaných oxidů BCV_dry_200C_27m došlo k posunu hodnot mimo interval spolehlivosti BCV_NS (Obr. 3 - Obr. 14, Příloha 1). Jedná se o Fe_2O_3 (13,21→14,62 hm. %), Na_2O (0,35→0,44 hm. %), SO_3 (0,29→0,02 hm. %) a CO_2 (2,21→1,6 hm. %). Výrazný byl posun u LOI (10,65→6,34 hm. %). Určit, zda se jedná o důsledek teplotního zatěžování nelze z důvodu omezeného počtu teplotně zatěžovaných vzorků.

Mimo interval spolehlivosti BCV_NS spadají hodnoty SiO_2 , Fe_2O_3 , TiO_2 , MnO a Na_2O BCV_BS kontaktovaného s deionizovanou vodou po dobu 3 týdnů, 3 měsíců i 1 roku. Lze předpokládat,

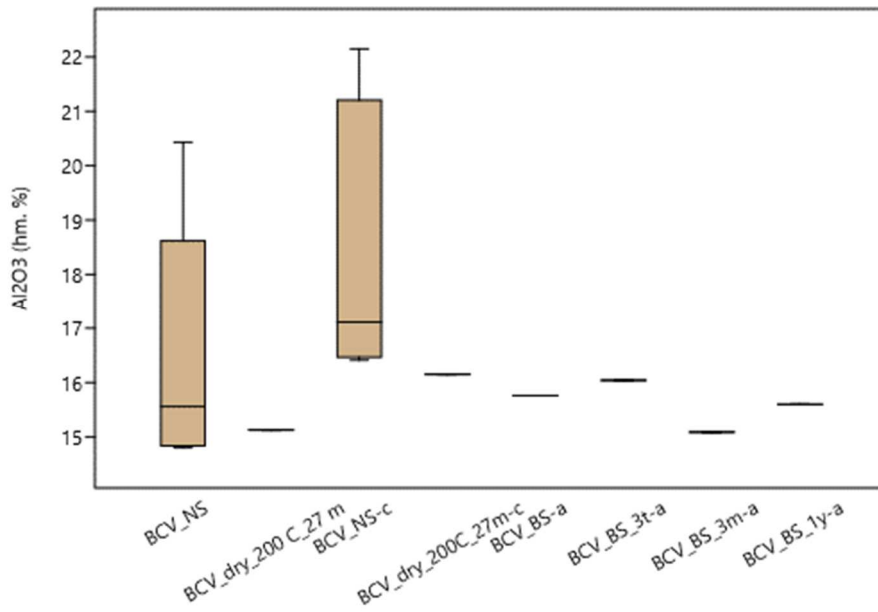
že ke snížení obsahu Fe_2O_3 , TiO_2 , MnO došlo v důsledku jejich vyloužení. Hodnoty Na_2O vzrůstají u BCV_BS kontaktovaného s deionizovanou vodou po dobu 3 týdnů a klesají u BCV_BS kontaktovaného s deionizovanou vodou po dobu 3 měsíců a 1 roku. Vzhledem k omezenému počtu dat není možné jednoznačně určit, zda se jedná o důsledek vyluhování.



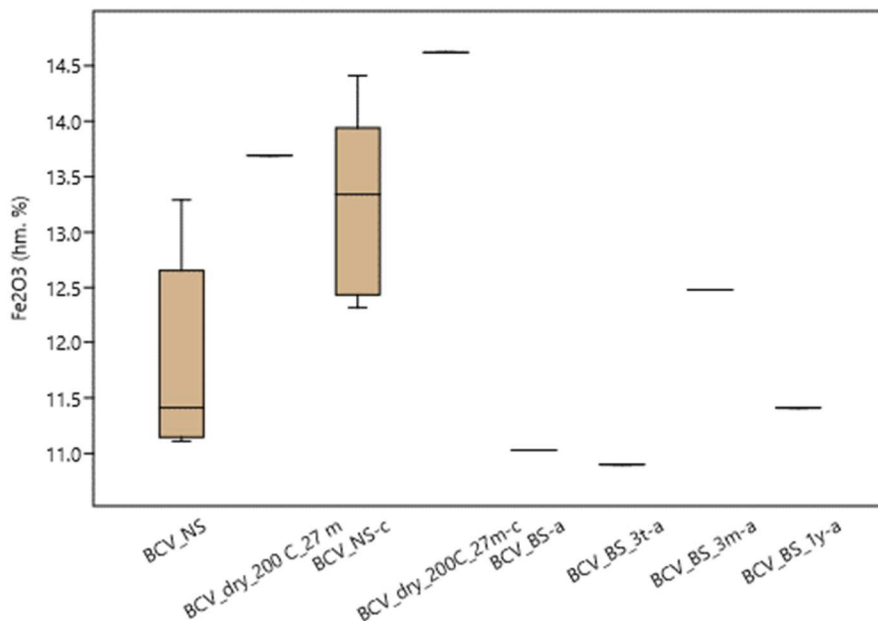
Obr. 3 Porovnání ztráty žíháním (LOI, A) a BCV_NS a BCV teplotně zatěžovaného za teploty 200 °C po dobu 27 měsíců (BCV_dry_200C_27m).



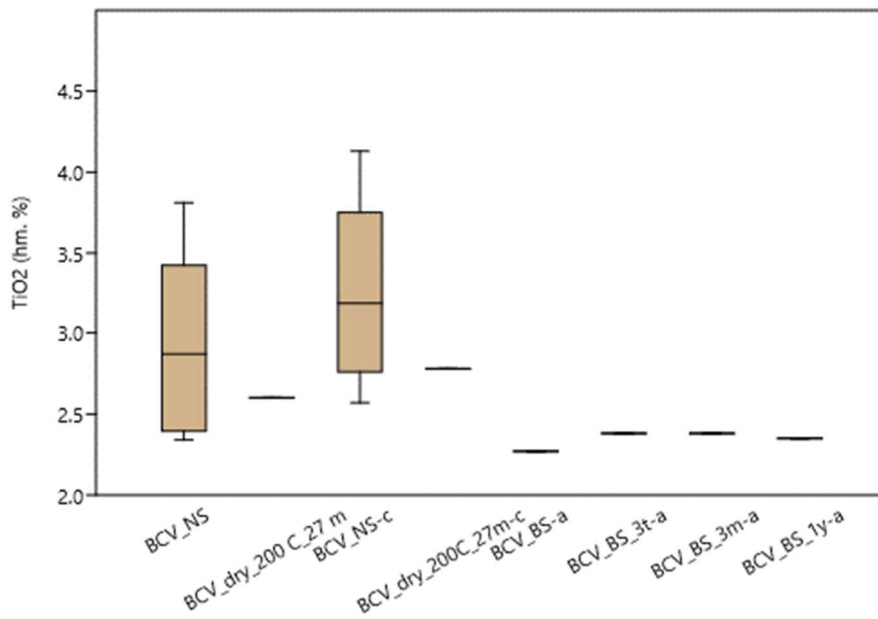
Obr. 4 Porovnání obsahu SiO_2 BCV_NS a BCV teplotně zatěžovaného za teploty 200 °C po dobu 27 měsíců (BCV_dry_200C_27m) a bentonitu kontaktovaného s deionizovanou vodou po dobu 3 týdnů (BCV_BS_3t), 3 měsíců (BCV_BS_3m) a jednoho roku (BCV_BS_1y). c – hodnoty přepočtené na 0,00 hm. % LOI, a – hodnoty analyzované bez LOI.



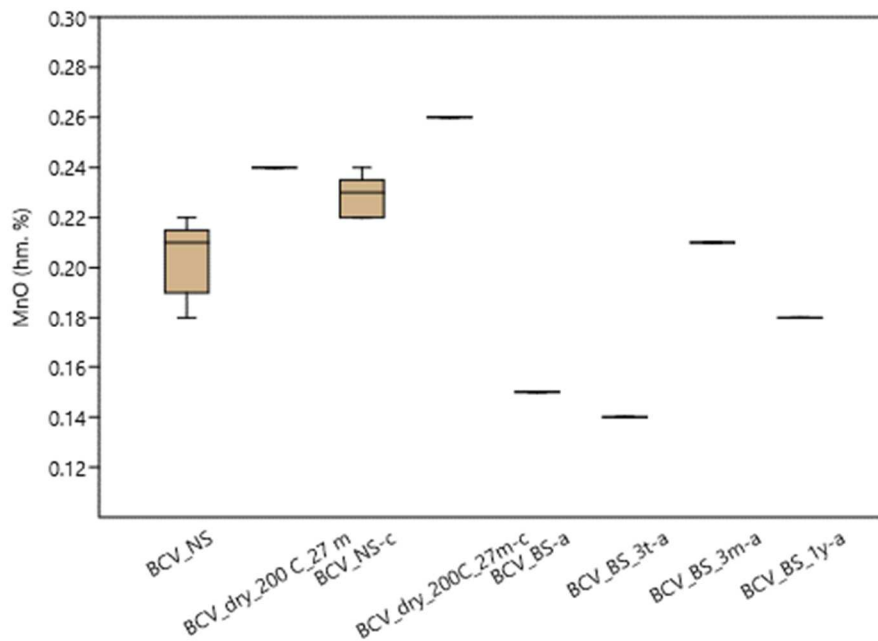
Obr. 5 Porovnání obsahu Al₂O₃ BCV_NS a BCV teplotně zatěžovaného za teploty 200 °C po dobu 27 měsíců (BCV_dry_200C_27m) a bentonitu kontaktovaného s deionizovanou vodou po dobu 3 týdnů (BCV_BS_3t), 3 měsíců (BCV_BS_3m) a jednoho roku (BCV_BS_1y). c – hodnoty přepočtené na 0,00 hm. % LOI, a – hodnoty analyzované bez LOI.



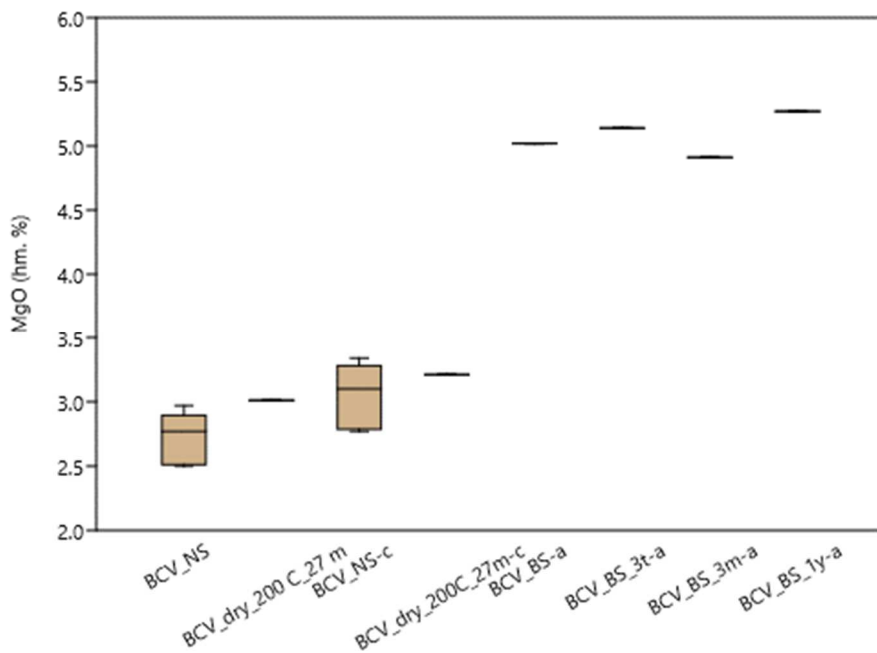
Obr. 6 Porovnání obsahu Fe₂O₃ BCV_NS a BCV teplotně zatěžovaného za teploty 200 °C po dobu 27 měsíců (BCV_dry_200C_27m) a bentonitu kontaktovaného s deionizovanou vodou po dobu 3 týdnů (BCV_BS_3t), 3 měsíců (BCV_BS_3m) a jednoho roku (BCV_BS_1y). c – hodnoty přepočtené na 0,00 hm. % LOI, a – hodnoty analyzované bez LOI.



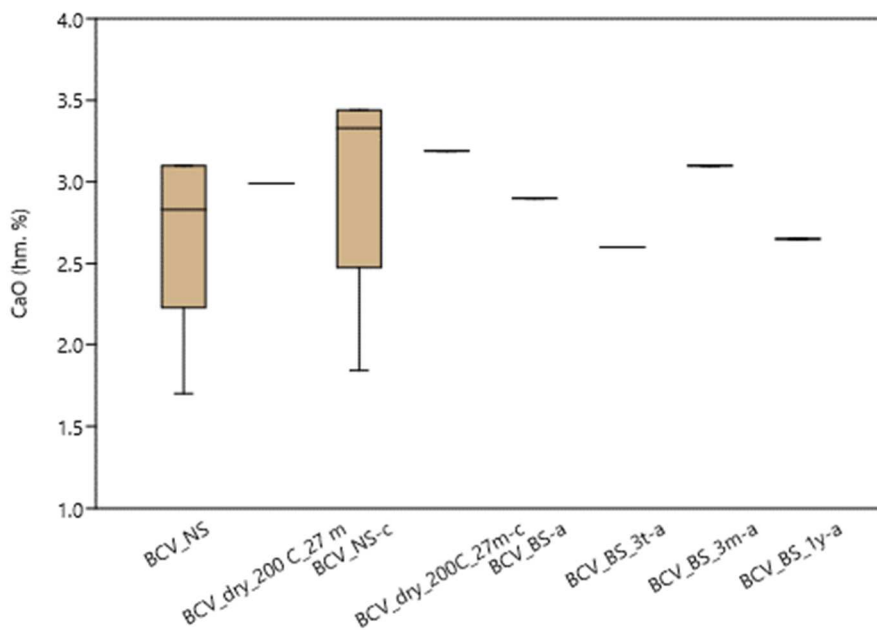
Obr. 7 Porovnání obsahu TiO₂ BCV_NS a BCV teplotně zatěžovaného za teploty 200 °C po dobu 27 měsíců (BCV_dry_200C_27m) a bentonitu kontaktovaného s deionizovanou vodou po dobu 3 týdnů (BCV_BS_3t), 3 měsíců (BCV_BS_3m) a jednoho roku (BCV_BS_1y). c – hodnoty přepočtené na 0,00 hm. % LOI, a – hodnoty analyzované bez LOI.



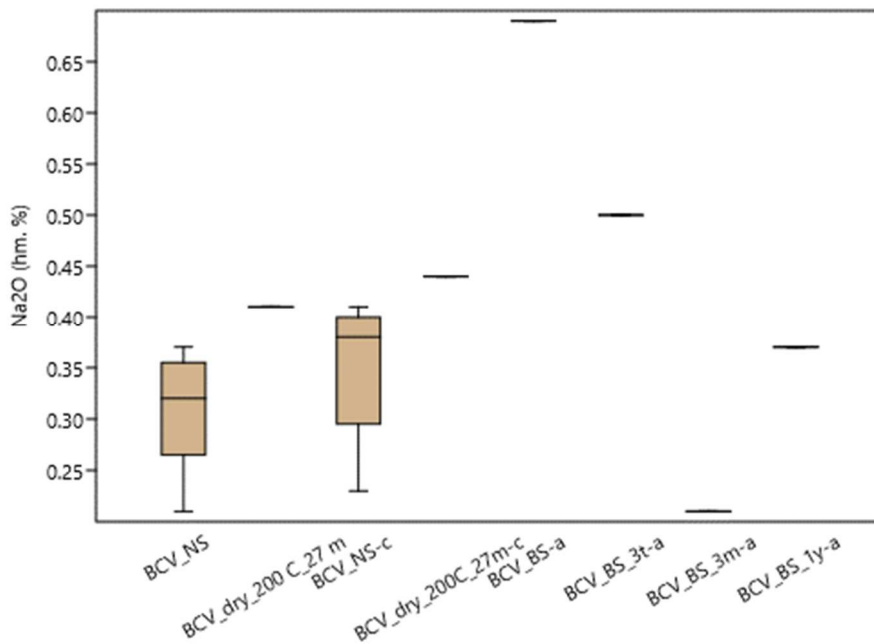
Obr. 8 Porovnání obsahu MnO BCV_NS a BCV teplotně zatěžovaného za teploty 200 °C po dobu 27 měsíců (BCV_dry_200C_27m) a bentonitu kontaktovaného s deionizovanou vodou po dobu 3 týdnů (BCV_BS_3t), 3 měsíců (BCV_BS_3m) a jednoho roku (BCV_BS_1y). c – hodnoty přepočtené na 0,00 hm. % LOI, a – hodnoty analyzované bez LOI.



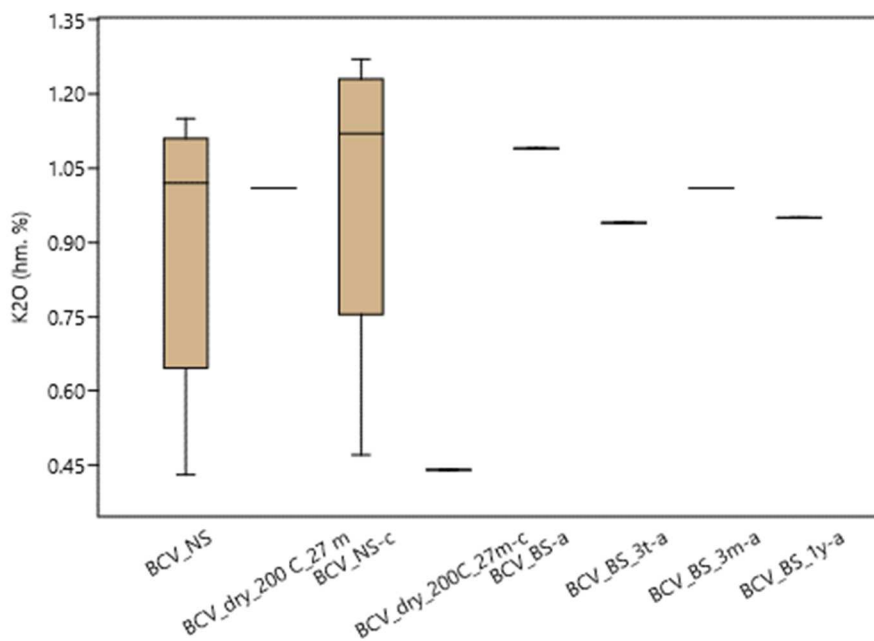
Obr. 9 Porovnání obsahu MgO BCV_NS a BCV teplotně zatěžovaného za teploty 200 °C po dobu 27 měsíců (BCV_dry_200C_27m) a bentonitu kontaktovaného s deionizovanou vodou po dobu 3 týdnů (BCV_BS_3t), 3 měsíců (BCV_BS_3m) a jednoho roku (BCV_BS_1y). c – hodnoty přepočtené na 0,00 hm. % LOI, a – hodnoty analyzované bez LOI.



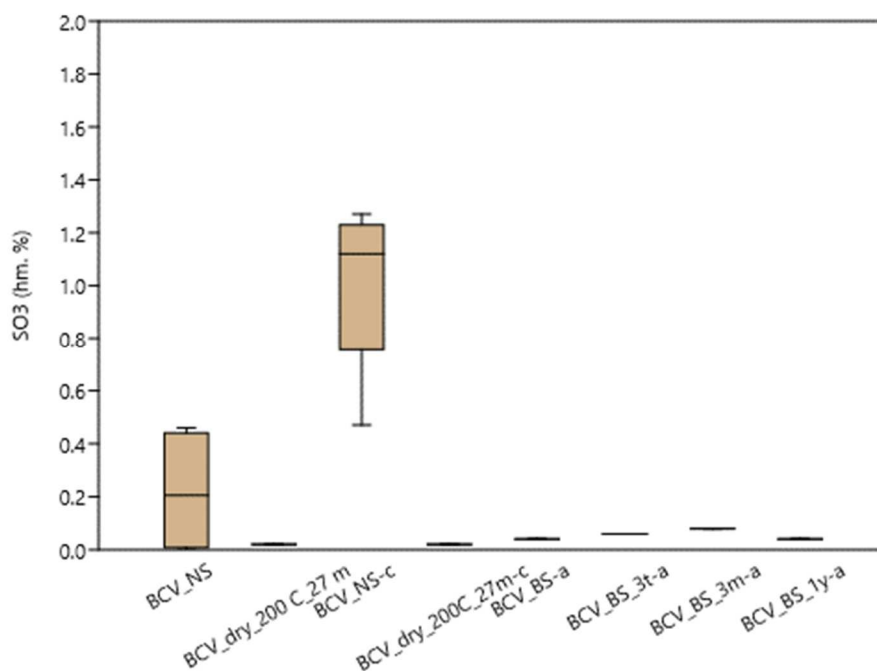
Obr. 10 Porovnání obsahu CaO BCV_NS a BCV teplotně zatěžovaného za teploty 200 °C po dobu 27 měsíců (BCV_dry_200C_27m) a bentonitu kontaktovaného s deionizovanou vodou po dobu 3 týdnů (BCV_BS_3t), 3 měsíců (BCV_BS_3m) a jednoho roku (BCV_BS_1y). c – hodnoty přepočtené na 0,00 hm. % LOI, a – hodnoty analyzované bez LOI.



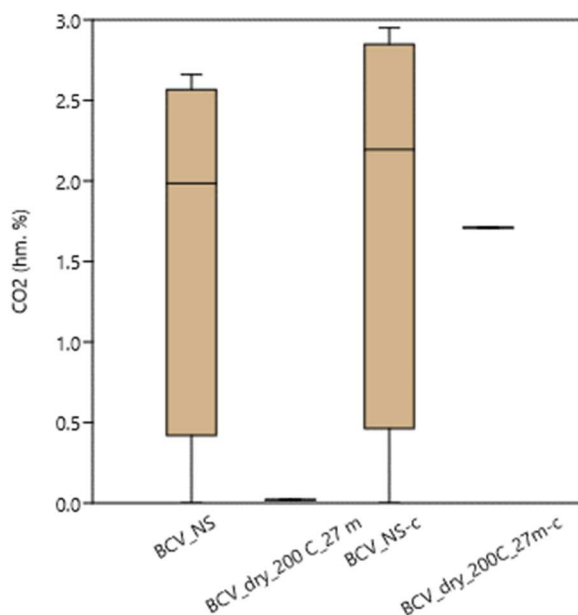
Obr. 11 Porovnání obsahu Na₂O BCV_NS a BCV teplotně zatěžovaného za teploty 200 °C po dobu 27 měsíců (BCV_dry_200C_27m) a bentonitu kontaktovaného s deionizovanou vodou po dobu 3 týdnů (BCV_BS_3t), 3 měsíců (BCV_BS_3m) a jednoho roku (BCV_BS_1y). c – hodnoty přepočtené na 0,00 hm. % LOI, a – hodnoty analyzované bez LOI.



Obr. 12 Porovnání obsahu K₂O BCV_NS a BCV teplotně zatěžovaného za teploty 200 °C po dobu 27 měsíců (BCV_dry_200C_27m) a bentonitu kontaktovaného s deionizovanou vodou po dobu 3 týdnů (BCV_BS_3t), 3 měsíců (BCV_BS_3m) a jednoho roku (BCV_BS_1y). c – hodnoty přepočtené na 0,00 hm. % LOI, a – hodnoty analyzované bez LOI.



Obr. 13 Porovnání obsahu SO_3 BCV_NS a BCV teplotně zatěžovaného za teploty $200\text{ }^\circ\text{C}$ po dobu 27 měsíců (BCV_dry_200C_27m) a bentonitu kontaktovaného s deionizovanou vodou po dobu 3 týdnů (BCV_BS_3t), 3 měsíců (BCV_BS_3m) a jednoho roku (BCV_BS_1y). c – hodnoty přepočtené na 0,00 hm. % LOI, a – hodnoty analyzované bez LOI.



Obr. 14 Porovnání obsahu CO_2 BCV_NS a BCV teplotně zatěžovaného za teploty $200\text{ }^\circ\text{C}$ po dobu 27 měsíců (BCV_dry_200C_27m). c – hodnoty přepočtené na 0,00 hm. % LOI.

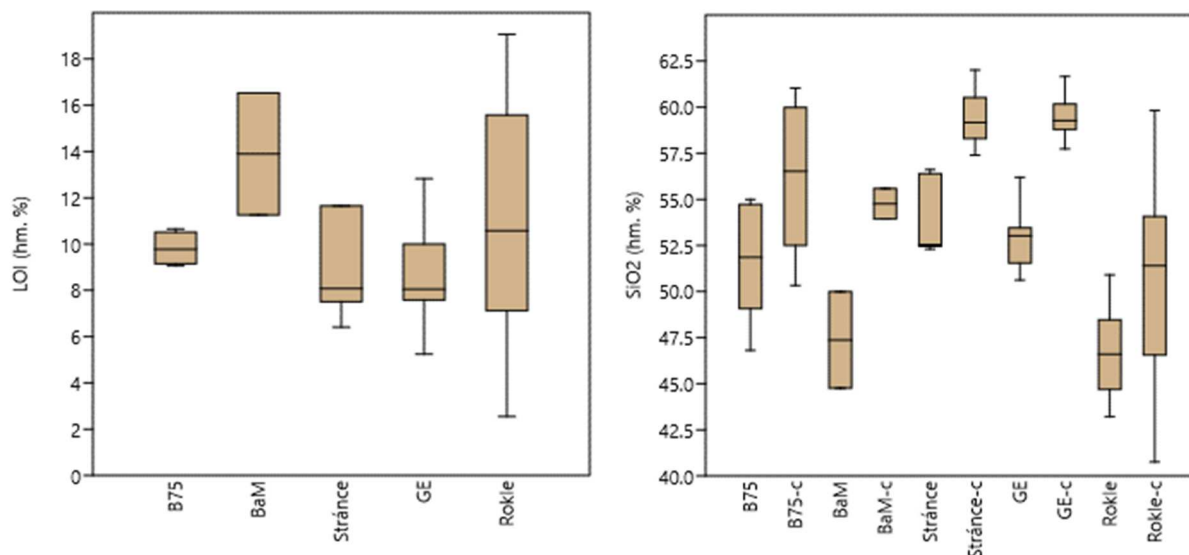
2.1.2 CC – B75, BaM, Rokle, Stránce a Zelený jíl.

Pro CC bentonitů B75, BaM, Rokle, Stránce a Zelený jíl (GE) byly vyhodnoceny statistické parametry pro NS bentonit (Příloha 1, Obr. 15-Obr. 20). Data CC zatěžovaných bentonitů B75, BaM, Stránce a Zelený jíl (GE) nejsou k dispozici. Data CC bentonitu Rokle zatěžovaného vodami Josef a SGW-K (Křížová et al. 2010; Pacovský et al. 2010b) neodpovídají čistému zatěžovanému

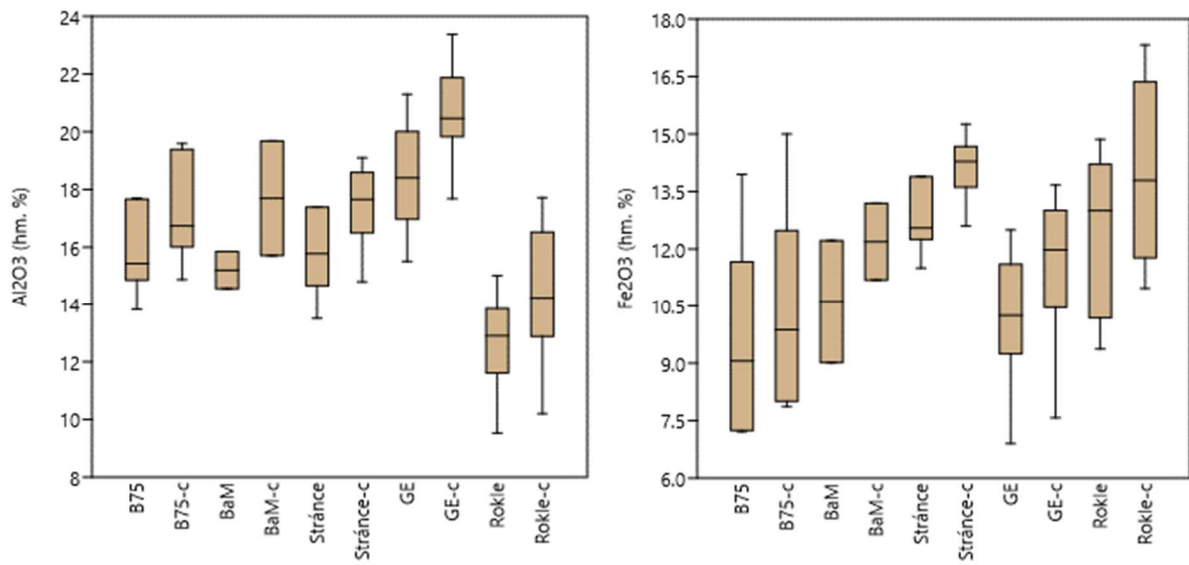
bentonitu Rokle ale zatěžovanému substrátu (směs bentonitu, křemenného písku a grafitu). Z důvodu charakteru dat je nelze porovnat s CC bentonitu Rokle_NS.

Vysoká variabilita chemického složení bentonitů Stránce_NS, Rokle_NS a Zelený jí (GE_NS) souvisí s absencí homogenizace bentonitů před jejich analýzou. Bentonity byly odebrány formou kopaných vzorků. V analýzách tak mohou hrát roli velká zrna křemene, slíd a dalších minerálů, která se v bentonitech běžně vyskytují a která mohou výrazně ovlivnit CC bentonitu. Bentonit BaM byl uměle nabohacený smektitem. Bentonit B75 byl částečně natrifikovaný (SURA0, osobní diskuze, 15.9.2022).

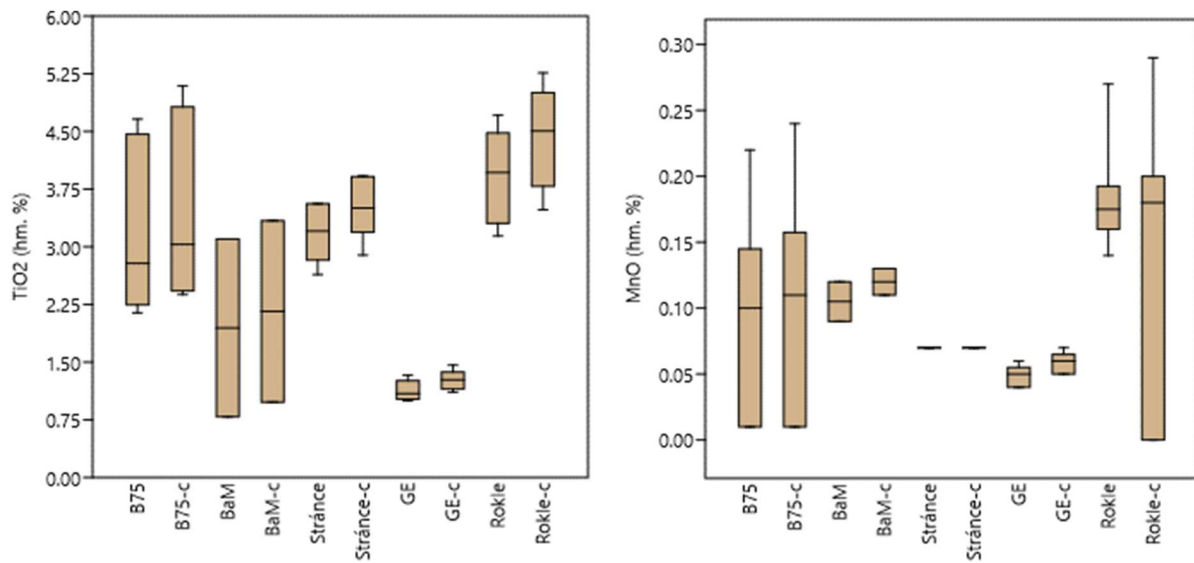
U bentonitu BaM_NS existují pouze 2 údaje k CC, mezi kterými je velký rozdíl v obsahu LOI CC (Červinka a Gondolli 2015, Dobrev et al. 2020). Po přepočtu analýzy na 0,00 hm. % LOI se odchylka v obsahu většiny oxidů zmenšila (Obr. 15-Obr. 20). Bentonit B75_NS (Vokál et al. 2010, Gondolli et al. 2013, Červinka et al. 2015) jasně ukazuje zvýšený obsah Na₂O oproti ostatním bentonitům. U některých analýz je obsah Na₂O u B75_NS až o řád vyšší. Navýšení obsahu Na₂O je důkazem částečné natrifikace bentonitu (Gondolli et al. 2013).



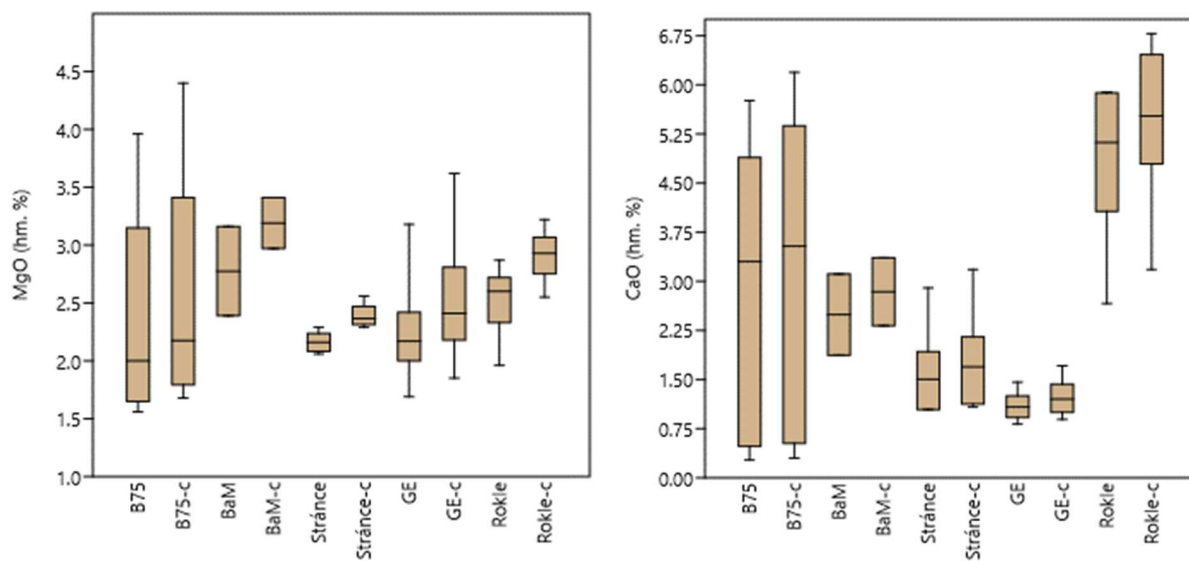
Obr. 15 Ztráta žiháním (LOI) a obsah SiO₂ bentonitů B75, BaM, Stránce, Zelený jí (GE) a Rokle v NS. c – hodnoty přepočtené na 0,00 hm. % LOI.



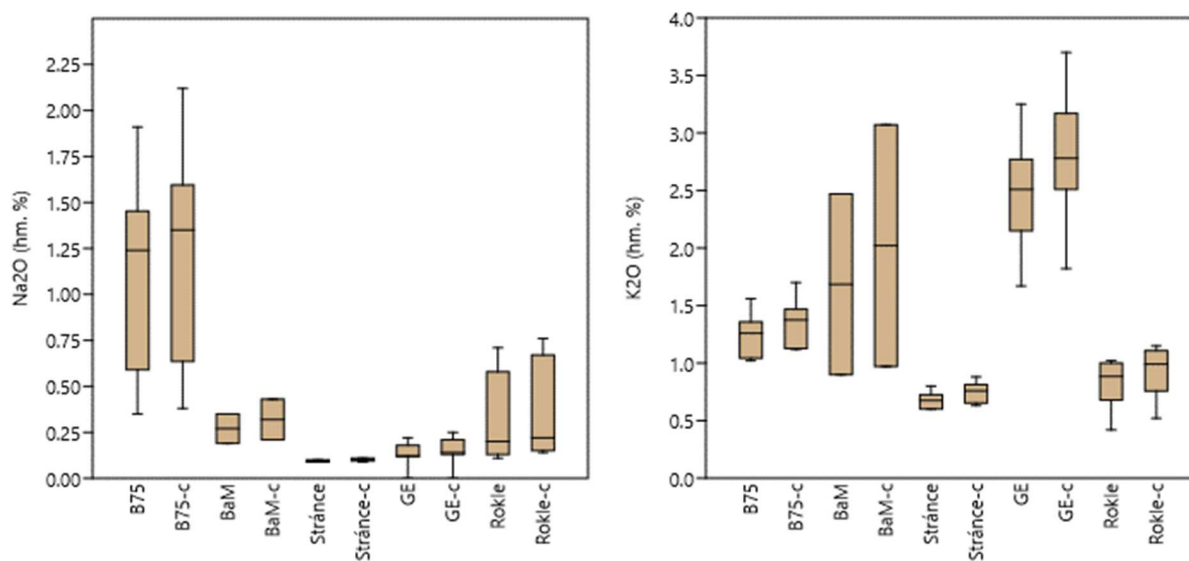
Obr. 16 Obsah Al_2O_3 a Fe_2O_3 bentonitů B75, BaM, Stránce, Zelený jíł (GE) a Rokle v NS. c – hodnoty přepočtené na 0,00 hm. % LOI.



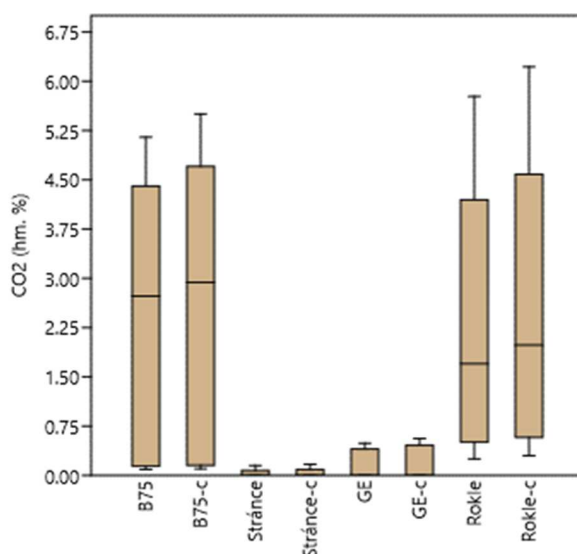
Obr. 17 Obsah TiO_2 a MnO bentonitů B75, BaM, Stránce, Zelený jíł (GE) a Rokle v NS. c – hodnoty přepočtené na 0,00 hm. % LOI.



Obr. 18 Obsah MgO a CaO bentonitů B75, BaM, Stránce, Zelený jíł (GE) a Rokle v NS. c – hodnoty přepočtené na 0,00 hm. % LOI.



Obr. 19 Obsah Na₂O a K₂O bentonitů B75, BaM, Stránce, Zelený jíł (GE) a Rokle v NS. c – hodnoty přepočtené na 0,00 hm. % LOI.



Obr. 20 Obsah CO₂ bentonitů B75, BaM, Stránce, Zelený jíł (GE) a Rokle v NS. c – hodnoty přepočtené na 0,00 hm. % LOI.

2.1.3 CC – metodické a statistické zhodnocení

CC pevného vzorku je jedním ze základních parametrů bentonitu. Hlavní limitující faktory pro statistické zpracování CC českých bentonitů jsou:

- malý počet dat (41 pro NS, 5 pro OS);
- použití různých metod stanovení (SILA, XRF, ICP-MS, ICP-OES) v různých laboratořích;
- chybějící stanovení LOI u některých analýz způsobující výrazné odchylky – vyřešeno přepočtem analýz na 0,00 hm. % LOI;
- heterogenita dat pro NS napříč českými bentonity (Tab. 2).

Výše uvedené faktory způsobují v kombinaci s možnou heterogenitou materiálu široké intervaly spolehlivosti, které znemožňují jejich další použití.

Tab. 2 Porovnání CC českých bentonitů v NS. Data v hm. %, přepočtena na 0,00 hm. % LOI. ¹ Karnland et al. (2006), ² ENRESA (2000). Červeně – interval spolehlivosti převyšující 10 % hodnoty obsahu oxidu.

	B75_N S	± L	BaM_N S	± L	Stránce NS	± L	GE_NS	± L
Al ₂ O ₃	17,28	1,92	17,70	25,22	17,45	1,58	20,63	1,07
CaO	3,21	2,65	2,84	6,61	1,77	0,80	1,23	0,18
CO ₂	2,53	2,92	na		0,04	0,07	0,21	0,17
Fe ₂ O ₃	10,39	2,79	12,19	12,71	14,14	0,92	11,49	1,28
FeO	2,34	1,45	3,43	22,17	0,36		0,56	0,21
K ₂ O	1,35	0,22	2,02	13,34	0,75	0,10	2,77	0,38
MgO	2,56	1,08	3,19	2,80	2,39	0,10	2,48	0,34
MnO	0,10	0,09	0,12	0,13	0,07		0,06	0,01
Na ₂ O	1,22	0,64	0,32	1,40	0,10	0,01	0,15	0,05
SiO ₂	56,21	4,22	54,77	10,48	59,40	1,65	59,42	0,80
TiO ₂	3,45	1,23	2,16	14,99	3,50	0,43	1,26	0,08
SO ₃	na		na		0,01		0,08	

Ctot	na		na		0,13	0,05	0,12	0,06
Stot	na		na		0,00		0,04	0,04

	Rokle_ NS	± L	BCV_N S	± L	MX-80 ¹	FEBEX ²	Deponit -Can ¹
Al ₂ O ₃	14,08	1,27	18,47	3,19	21,44	20,20	19,43
CaO	5,41	0,78	3,03	0,83	1,51	2,02	6,68
CO ₂	2,53	2,44	2,45	0,89	na	na	na
Fe ₂ O ₃	13,92	1,23	13,21	1,03	4,17	3,48	5,69
FeO	0,32	0,27	0,15		na	na	na
K ₂ O	0,94	0,11	1,02	0,39	0,58	1,12	0,99
MgO	2,90	0,16	3,05	0,31	2,67	4,71	3,59
MnO	0,14	0,06	0,23		na	na	na
Na ₂ O	0,34	0,13	0,35	0,08	2,32	1,46	0,87
SiO ₂	50,58	3,00	54,31	2,42	66,40	65,88	59,78
TiO ₂	4,40	0,37	3,24	0,72	0,23	0,22	0,87
SO ₃	0,02	0,01	0,29	0,36	na	na	na
Ctot	2,87	2,36	0,47	0,33	0,35	0,67	1,24
Stot	0,02	0,02	0,01	0,13	0,35	0,22	0,87

2.2 Stanovení mineralogického složení (PXRD)

Data pro mineralogické složení vycházejí z metody práškové rentgenové difrakce (PXRD). Do statistického zpracování byla zahrnuta pouze data ze semikvantitativních analýz uvedená v literatuře číselnými údaji. Z celkového počtu 178 záznamů PXRD bylo do dalšího zpracování zahrnuto 35 záznamů NS a 4 záznamy OS. Z důvodu malého počtu a velkého rozptylu dat nebylo možné použít Dixonův test pro vyloučení odlehlých hodnot a interval spolehlivosti.

Součástí semikvantitativních analýz bylo stanovení amorfního podílu pouze u některých analýz BCV_NS (Červinka et al. 2018a; Svoboda et al. 2019b; Černá et al. 2020). U ostatních typů bentonitu a u zatěžovaných bentonitů stanovení amorfního podílu chybí. Omezení spojená se semikvantitativní analýzou mineralogického složení metodou PXRD zahrnující amorfni fáze vnášejí do stanovení řadu nejistot (Ufer et al. 2008). V kombinaci s variabilním složením a strukturou smektitu zvyšuje stanovení amorfního podílu odchylku stanovení. To je pravděpodobně důvod, proč stanovení amorfního podílu v analýzách chybí.

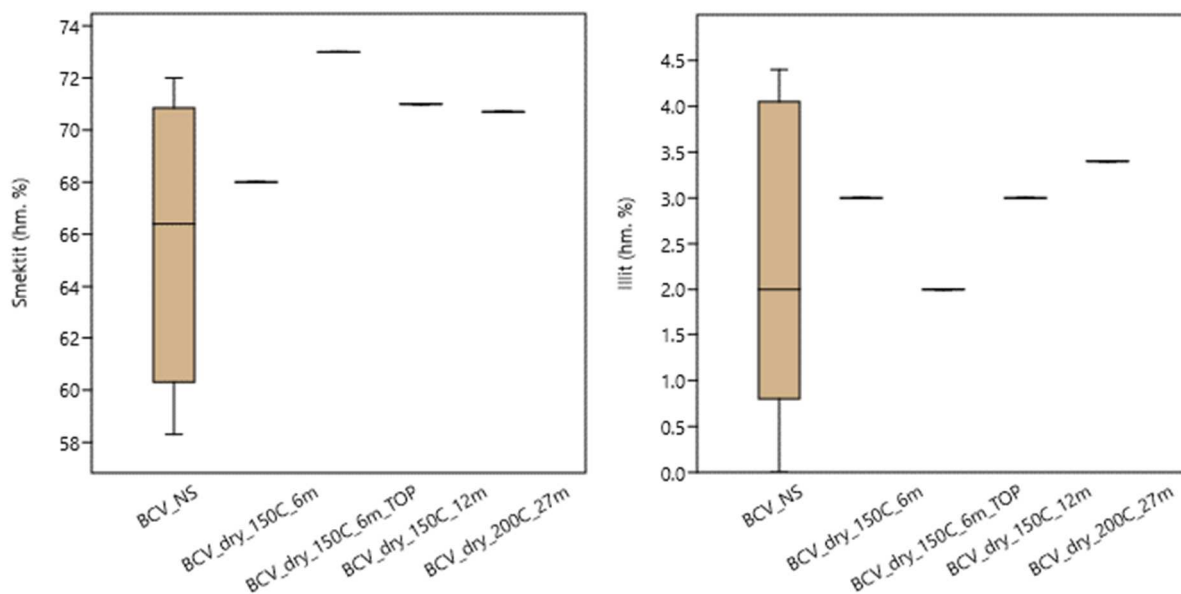
2.2.1 PXRD – BCV

Hlavním minerálem BCV_NS je smektit ($65,7 \text{ V} \pm 6,9 \text{ hm. \%}$, Příloha 3). Vysoký rozptyl dat v obsahu smektitu v BCV_NS (Obr. 21) souvisí se stanovením amorfního podílu, které bylo provedeno pouze u části analýz a které systematicky snižuje obsah smektitu. Obsah amorfních fází v BCV_NS je $7,8 \pm 3,3 \text{ hm. \%}$ (Příloha 2). Celkový obsah vedlejších a akcesorických minerálů tvoří v BCV_NS $34,3 \pm 6,9 \text{ hm. \%}$. Patří sem kaolinit ($6,6 \pm 4,4 \text{ hm. \%}$), křemen ($8,4 \pm 3,9 \text{ hm. \%}$), goethit ($4,6 \pm 4,0 \text{ hm. \%}$), kalcit ($1,2 \pm 1,0 \text{ hm. \%}$) a siderit ($0,5 \pm 0,6 \text{ hm. \%}$). Interval spolehlivosti jsou u většiny analyzovaných minerálů vyšší než průměr (resp. medián). To je způsobeno malým

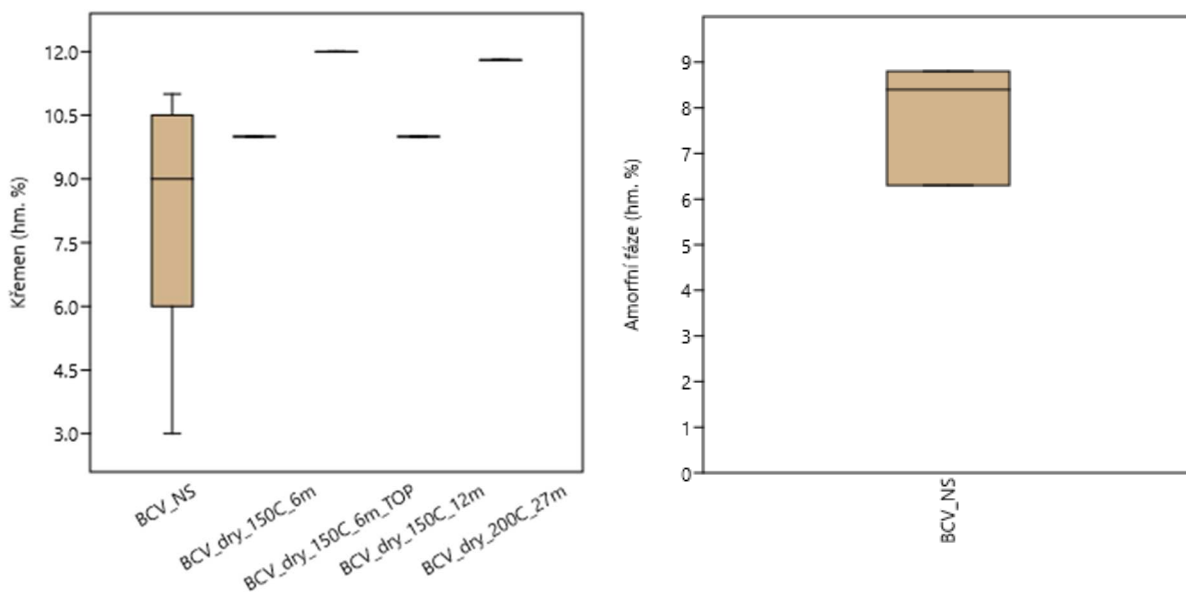
počtem dat a jejich velkou variabilitou. Široký interval spolehlivosti u goethitu může souviset s velikostí částic goethitu, které mohou dosahovat až několika mm (Červinka et al. 2018). V případě nabohacení bentonitu těmito částicemi a jeho nedostatečné homogenizaci může dojít ke zkreslení výsledků smektitu.

Statistické parametry byly stanoveny pro NS bentonitu BCV (Příloha 2). Data pro NS jsou porovnána s BCV teplotně zatěžovaným na 150 a 200 °C po dobu 6, 12 a 27 měsíců (Obr. 21-Obr. 24), Kašpar et al. 2021; Laufek et al. 2021). Interval spolehlivosti lze použít u obsahu smektitu v BCV_NS ($65,74 \pm 6,87$ hm. %). Hodnotu intervalu spolehlivosti přesahuje BCV_dry_150C_6m_TOP pocházející se povrchové vrstvy teplotně zatěžované bentonitu. Navýšení obsahu smektitu je v důsledku teplotního zatěžování velmi nepravděpodobné. Obsahy smektitu ostatních teplotně zatěžovaných vzorků spadají do intervalu spolehlivosti BCV_NS.

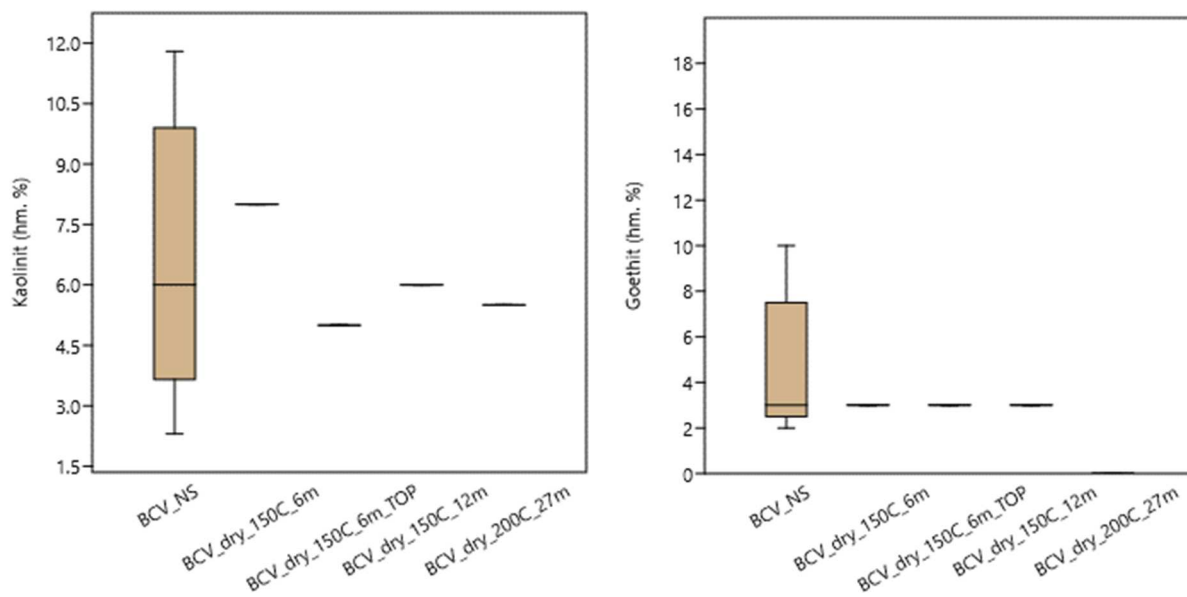
Obsahy ostatních detekovaných minerálů v teplotně zatěžovaných stavech jsou srovnatelné s BCV_NS. Velmi vysoké rozpětí obsahu jednotlivých minerálů u BCV_NS ukazuje na variabilitu v jednotlivých analýzách a tím i na obtížné porovnání hodnot, pokud pocházejí z různých laboratoří. BCV_dry_150C_6m_TOP ukazuje nižší obsah kaolinitu a illitu. BCV_dry_200C_27m ukazuje výrazný pokles goethitu, který Laufek et al. (2021) vysvětluje transformací goethitu na hematit, který ve stejném vzorku tvoří 1,7 hm. %. V BCV_NS hematit nebyl detekován (Příloha 2).



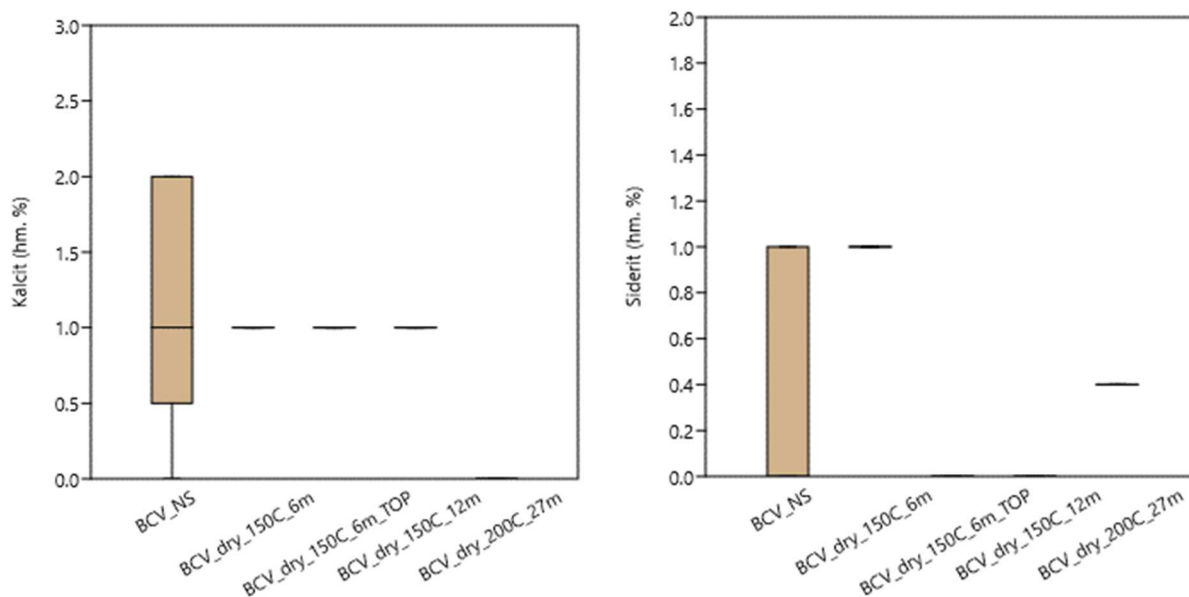
Obr. 21 Porovnání obsahu smektitu a illitu BCV_NS a BCV teplotně zatěžovaným na 150 a 200 °C po dobu 6, 12 a 27 měsíců bez účinků vody (dry). TOP – několik mm silná vrstva na povrchu bentonitu.



Obr. 22. Porovnání obsahu křemene a amorfní fáze BCV_NS a BCV teplotně zatěžovaným na 150 a 200 °C po dobu 6, 12 a 27 měsíců bez účinků vody (dry). TOP – několik mm silná vrstva na povrchu bentonitu.



Obr. 23 Porovnání obsahu kaolinitu a goethitu BCV_NS a BCV teplotně zatěžovaným na 150 a 200 °C po dobu 6, 12 a 27 měsíců bez účinků vody (dry). TOP – několik mm silná vrstva na povrchu bentonitu.



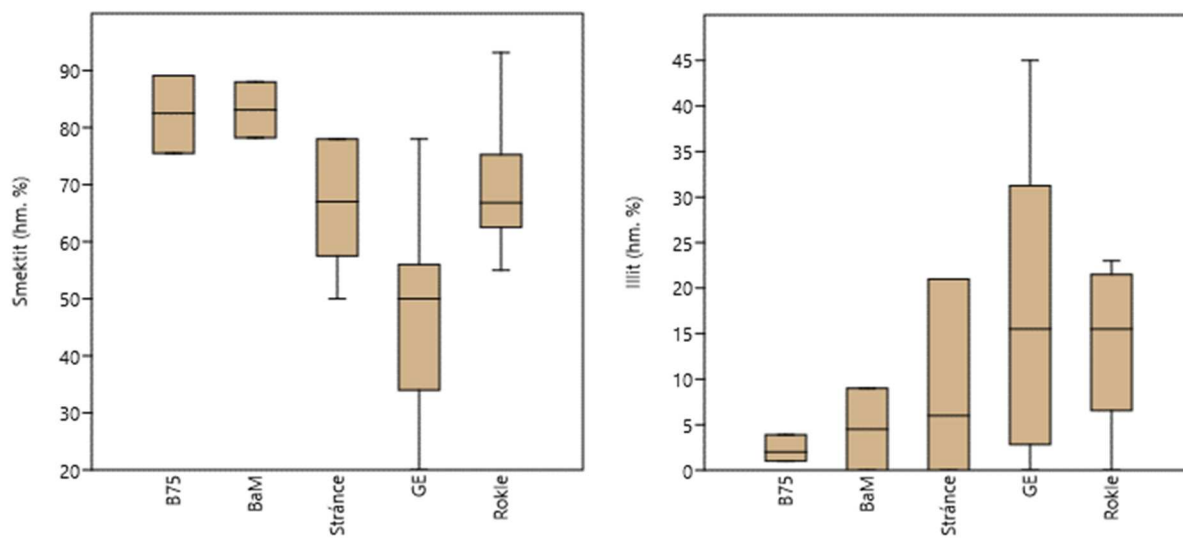
Obr. 24 Porovnání obsahu kalcitu a sideritu BCV_NS a BCV teplotně zatěžovaným na 150 a 200 °C po dobu 6, 12 a 27 měsíců bez účinků vody (dry). TOP – několik mm silná vrstva na povrchu bentonitu.

2.2.2 PXRD – B75, BaM, Rokle, Stránce a Zelený jíł

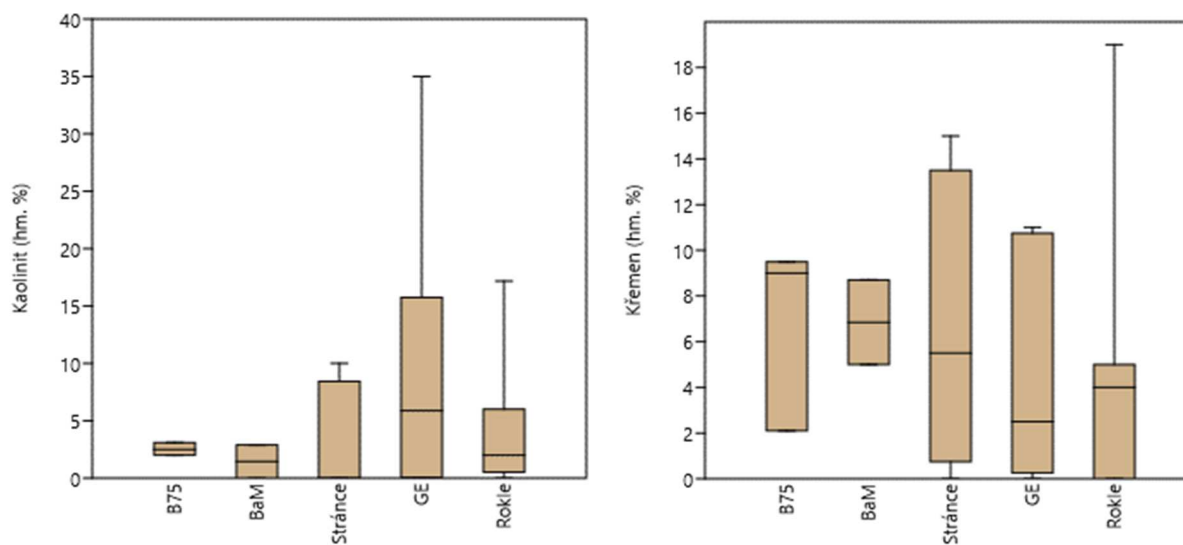
Mineralogické složení pro bentonity B75, BaM, Rokle, Stránce a Zelený jíł bylo možné statisticky zpracovat pouze pro NS (Příloha 2, Obr. 25-Obr. 28). Semikvantitativní data pro ovlivněný stav pro tyto bentonity chybí. Z krabicových grafů je patrný výrazný rozptyl dat, především pro bentonity Stránce a Zelený jíł. Rozptyl dat (i široké intervaly spolehlivosti) ukazují na možné odchylky vznikající při analyzování metodou PXRD v různých laboratořích a na heterogenitu některých bentonitů.

Nadhodnocení obsahu smektitu (např. u bentonitů B75_NS a BaM_NS, Obr. 25) může být důsledkem chybějícího stanovení obsahu amorfních fází, nebo použití metody výpočtu semikvantitativního mineralogického složení kombinací PXRD záznamů a SILA (CQPA metoda, např. Šťástka et al., 2022). U bentonitů Stránce_NS, Rokle_NS a zelený jíł (GE_NS) data z PXRD potvrzují vysokou heterogenitu bentonitů a možné zkreslení semikvantitativní analýzy v důsledku použití CQPA metody, případně použitím výpočtu pomocí korundového čísla (SURAO, osobní diskuze, 15.9.2022).

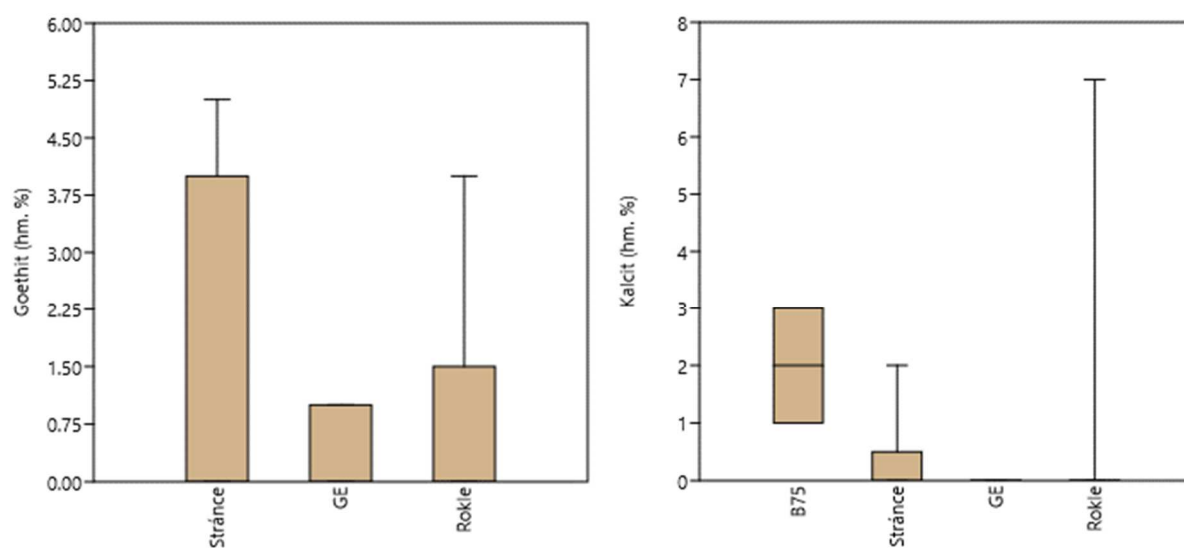
Rozpětí obsahu většiny minerálů je nejvyšší u bentonitů Rokle_NS, Stránce_NS a Zelený jíł (GE_NS). Zde se opět projevuje vedle vlivu použité metody i vliv heterogenity minerálu. Stejně jako v případě CC je PXRD kovaných vzorků výrazně ovlivněno přítomností velkých monominerálních úlomků (např. křemen, goethit). při nedostatečné homogenizaci dochází u těchto bentonitů ke zkreslení PXRD analýzy (SURAO, osobní diskuze, 15.9.2022).



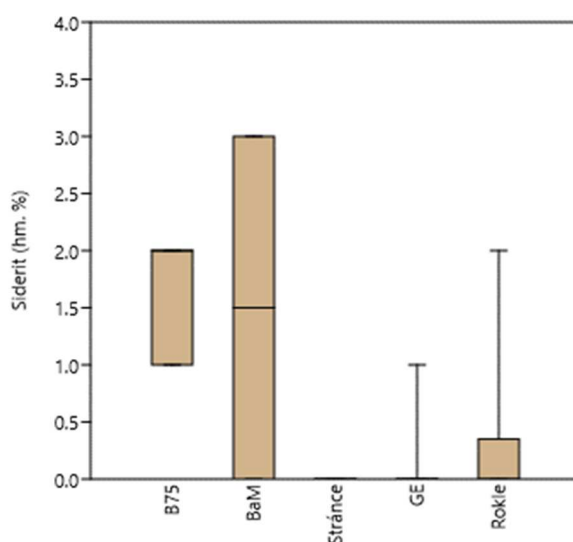
Obr. 25 Obsah smektitu a illitu v bentonitu B75, BaM, Rokle, Stránce a Zelený jííl (GE) v NS.



Obr. 26 Obsah kaolinitu a křemene v bentonitu B75, BaM, Rokle, Stránce a Zelený jííl (GE) v NS.



Obr. 27 Obsah goethitu a kalcitu v bentonitu B75, BaM, Rokle, Stránce a Zelený jíł (GE) v NS.



Obr. 28 Obsah sideritu v bentonitu B75, BaM, Rokle, Stránce a Zelený jíł (GE) v NS.

2.2.3 PXRD – metodické a statistické zhodnocení

PXRD je základní analýzou používanou k určení mineralogického složení bentonitu. Hlavní limitující faktory pro statistické zpracování PXRD českých bentonitů jsou:

- malý počet dat (35 pro NS, 4 pro OS);
- zpracování analýz v různých laboratořích;
- použití různých metod výpočtu semikvantitativního složení (Rietveldovo vyhodnocení, přepočítání kombinací PXRD a SILA, použití korundového čísla);
- problematika stanovení amorfního podílu, která vnáší nejistotu do semikvantitativní PXRD analýzy;
- heterogenita dat pro NS napříč českými bentonity (Tab. 3).

Hlavním důvodem, proč nebylo možné zahrnout převažující množství PXRD dat (109 pro NS, 30 pro OS) je jejich kvalitativní charakter. V minulosti dříve používaná metoda výpočtu semikvantitativního mineralogického složení kombinací PXRD záznamů a SILA může nadhodnotit obsah smektitu na úkor obsahu křemene. Toto je důvodem vysokého obsahu smektitu u bentonitů B75_NS a BaM_NS. Obsahy smektitu u českých bentonitů v rozpětí 80-90 hm. % jsou nereálné. Skutečnému složení českých Ca-Mg bentonitů se více blíží obsah smektitu vyhodnocený pomocí Rietveldova vyhodnocení u bentonitu BCV_NS:

- 69-72 hm. % v případě analýzy bez stanovení amorfního podílu;
- 58-66 hm. % v případě analýzy zahrnující stanovení amorfního podílu.

U bentonitů Stránce_NS, Rokle_NS a zelený jíł (GE_NS) data z PXRD potvrzují vysokou heterogenitu bentonitů a možné zkreslení semikvantitativní analýzy v důsledku použití metod výpočtu semikvantitativního mineralogického složení kombinací PXRD záznamů a SILA, případně použitím výpočtu pomocí korundového čísla.

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 nemožné.

Tab. 3 Porovnání mineralogického složení českých bentonitů v NS. Data v hm. %. ¹ Karnland et al. (2006). ² Fernández et al. 2000, AVG – průměr, f. – fáze, L – interval spolehlivosti, n.d. – nedetekováno, n.a. – neanalyzováno. Červeně – interval spolehlivosti převyšující 10 % obsahu minerálu.

Minerál	B75_NS		BaM_NS		Stránce_NS		GE_NS	
	AVG	± L	AVG	± L	AVG	± L	AVG	± L
Smektit	82,37	16,89	83,10	62,26	66,67	11,32	46,86	17,53
Illit	2,30	3,66	4,50	57,18	9,00	10,17	17,79	13,13
Kaolinit	2,53	1,37	1,45	18,42	2,98	4,90	9,74	10,36
Křemen	6,87	10,27	6,85	23,51	6,67	7,11	4,75	4,19
Amorfní f.	n.a.		n.a.		n.a.		n.a.	
Kalcit	2,00	2,48	n.d.		0,33	0,86	n.d.	
Siderit	1,67	1,43	1,50	19,06	0,00	0,00	0,14	0,35
Goethit	n.d.		n.d.		1,60	2,86	0,33	0,54
Sádrovec	n.d.		n.d.		0,50	1,64	0,15	0,64
Muskovit	n.d.		n.d.		2,00		8,00	
Plagioklas	n.d.		n.d.		0,10		0,10	
Ostatní	2,03		2,55		3,84		2,24	

Minerál	BCV_NS		Rokle_NS		MX-80 ¹		FEBEX ²	
	AVG	± L	AVG	± L	AVG	± L	AVG	± L
Smektit	65,74	6,87	69,03	6,30	83,5	2,4	92	3
Illit	2,34	2,17	13,68	6,78	0,7	0,1	n.d.	
Kaolinit	6,62	4,41	4,42	3,64	n.a.		n.d.	
Křemen	8,40	3,89	4,45	3,57	2,8	0,8	2	1
Amorfní f.	7,83	3,34	n.a.		n.a.		0,038	0,005
Kalcit	1,20	1,04	1,09	1,66	0,2	0,3	0,60	0,13
Siderit	0,48	0,56	0,30	0,52	n.d.		n.d.	
Goethit	4,60	3,98	0,75	1,24	0,2	0,4	n.d.	
Sádrovec	n.d.		0,35	1,20	0,9	0,4	0,14	0,01
Muskovit	n.d.		2,80		2,8	1,3	n.d.	
Plagioklas	n.d.		2,73	6,67	2,9	1,3	2	1
Ostatní	5,94		8,29		6,00		2,62	

Porovnání BCV_NS a BCV teplotně zatěžovaného indikuje mírný nárůst obsahu smektitu, illitu i křemene. Lze předpokládat, že se jedná o odchylky způsobené metodickým zpracováním a samotnou analytickou metodou, nikoliv odchylky způsobené vlastním zatěžováním.

Kašpar et al. (2021) poukázal na malou citlivost semikvantitativního stanovení PXRD na změny v bentonitu způsobené teplotou. Jako možné řešení se jeví postup zahrnující separaci smektitu a analýza difrakčních píků smektitu propojená s hodnotami CEC a SSA (Kaufhold et al. 2012; Fernández et al. 2014, Dietel et al. 2019).

Semikvantitativní data pro bentonit teplotně zatěžovaný za současného působení vody chybí. Vliv teplotního zatěžování za současného působení několika druhů vod na bentonit Rokle popsala Křížová et al. (2006a, 2006b, 2008a, 2008b). Z porovnání difrakčních záznamů včetně hodnot d_{001} montmorillonitu vyplynul velmi podobný charakter difraktogramů pro OS i NS. Složení studovaných vzorků bylo téměř identické. Hodnoty d_{001} se pohybovaly od 15.08 Å do 15.46 Å. Odchylky v hodnotách byly vysvětleny různým stupněm hydratace vzorků. Hodnoty d_{001} se u illitu pohybovaly od 9.99 Å do 10.1 Å a u kaolinitu od 7.00 Å do 7.01 Å. U jednoho vzorku byly identifikovány nově vzniklé fáze v podobě několikamilimetrových vyrostlic tvořených čistým illitem (Křížová et al. 2008a),

Mineralogické změny na bentonitu Rokle testovaném v experimentu Mock-Up-CZ vzniklé v důsledku teplotního zatěžování za současného vlivu vody dokumentovala Kolaříková et al. (2010). Teplotní zatěžování způsobilo tvorbu smíšených illit-smektitových struktur v okrajových částech experimentu odpovídajícím teplotám zatížení 50-60 °C. Během zahřívání docházelo ke tvorbě sádrovice v důsledku oxidace pyritu pocházejícího z bentonitu. Proces illitizace lze očekávat především tam, kde podzemní vody mohou být nabohacený K^+ .

2.3 Kationtová výměnná kapacita

Z celkového počtu 196 záznamů pro kationtovou výměnnou kapacitu (CEC) bylo do statistického zpracování zahrnuto 53 záznamů pro NS a 167 záznamů pro OS.

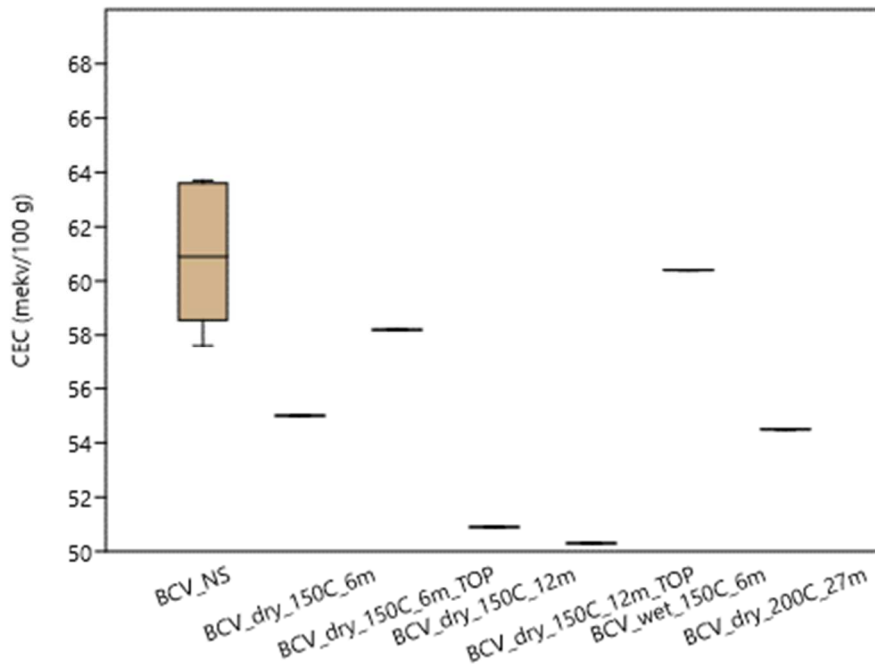
2.3.1 CEC – BCV

Statistické parametry pro soubory dat BCV bentonitu CEC a CEC_sum jsou shrnuty v Příloze 3. Data pro OS BCV pocházejí ze čtyř různých experimentů:

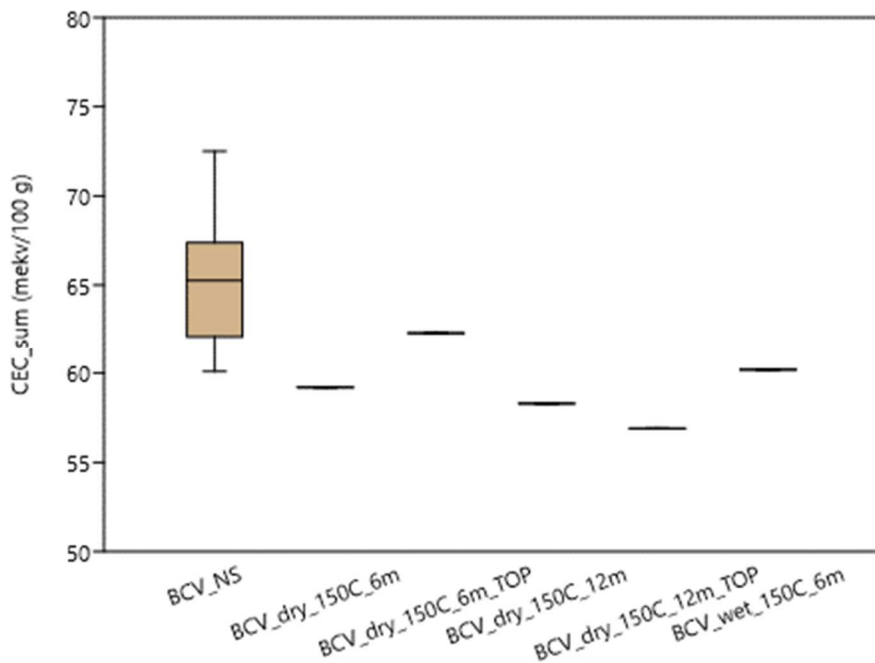
- BCV teplotně zatěžovaný za sucha i za mokra na 150 °C po dobu 6-12 měsíců (Kašpar et al. 2021).
- BCV teplotně zatěžovaný za sucha na 200 °C po dobu 27 měsíců (Laufek et al. 2021).
- BCV kontaktovaný s deionizovanou vodou (BCV_BS) po dobu 0,5 hodin až jednoho roku (Černá et al. 2021).
- BCV kontaktovaný s PGM médiem po dobu 6 měsíců sušený za aerobních a anaerobních podmínek (Černá et al. 2021).

Vliv teplotního zatěžování je možné pozorovat na hodnotách CEC (Obr. 29A), CEC_sum (Obr. 29B) i na podílu některých vyměnitelných kationtů (Obr. 31). Mimo interval spolehlivosti BCV_NS jsou hodnoty CEC i CEC_sum všech teplotně zatěžovaných bentonitů. Nejvýraznější pokles se projevil u hodnot CEC pro BCV_dry_150C_12m_TOP (CEC - 50,30 mekv/100 g; CEC_sum - 56,90 mekv/100 g). Z vyměnitelných kationtů byl v souvislosti s teplotním zatěžováním pozorován pokles Mg^{2+} a nárůst Ca^{2+} . Obsahy Na^+ a K^+ zůstávají téměř neměnné.

A



B



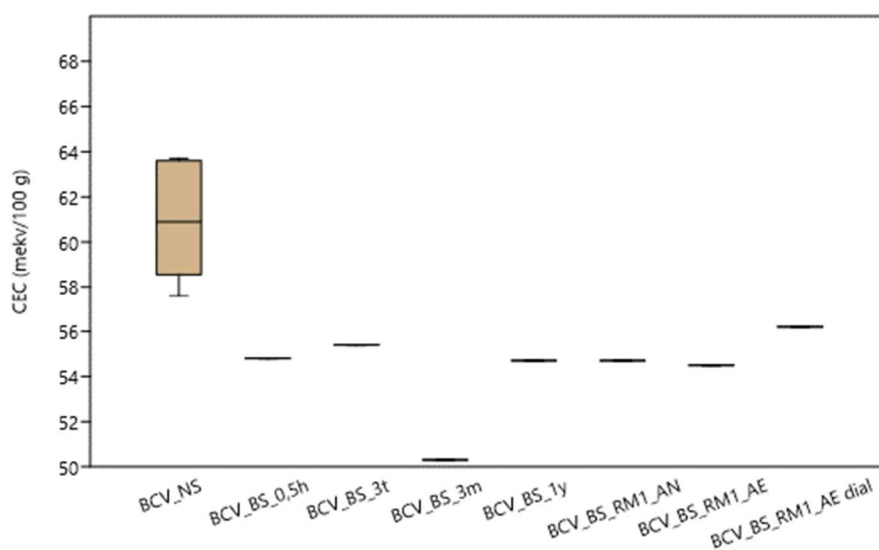
Obr. 29 Porovnání CEC (A) a CEC_sum (B) NS bentonitu BCV (BCV_NS) a BCV teplotně zatěžovaného za teploty 150-200 °C po dobu 6-27 měsíců za sucha a za mokra.

Vliv kontaktování s deionizovanou vodou a s PGM mediem (Obr. 30A) se projevil poklesem hodnot CEC mimo interval spolehlivosti BCV_NS u všech vzorků. Hodnoty CEC_sum (Obr. 30B) poklesly při kontaktování s deionizovanou vodou po dobu 3 týdnů až 3 měsíců. Hodnoty CEC_sum vzrostly při kontaktování s deionizovanou vodou po dobu 1 roku. Poměr vyměnitelných kationtů zůstává u vzorků kontaktovaných s deionizovanou vodou po dobu 3 týdnů až 3 měsíců

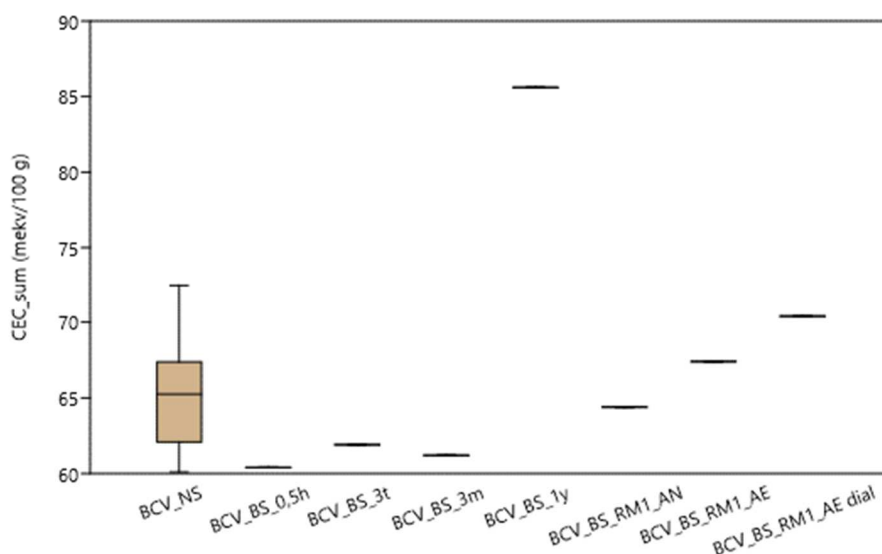
neměnný. U vzorku kontaktovaného po dobu jednoho roku narostl obsah Ca^{2+} a poklesl obsah Mg^{2+} . Obsahy Na^+ a K^+ zůstávají téměř neměnné (Obr. 31).

Hodnoty CEC_sum u bentonitu kontaktovaného s PGM mediem se výrazně liší v souvislosti s tím, zda byl bentonit sušený za anaerobních nebo aerobních podmínek, případně zda byl před sušením dialyzován (Obr. 30A). Zatím nevysvětlená zůstává vysoká hodnota CEC_sum pro dialyzovaný vzorek (Obr. 30B). U vzorku kontaktovaného s PGM mediem poklesl obsah vyměnitelného Na^+ . Jedná se o jednotlivá data a není možné odlišit, zda jde o vliv kontaktování s PGM mediem (resp. s deionizovanou vodou) nebo odchylky měření.

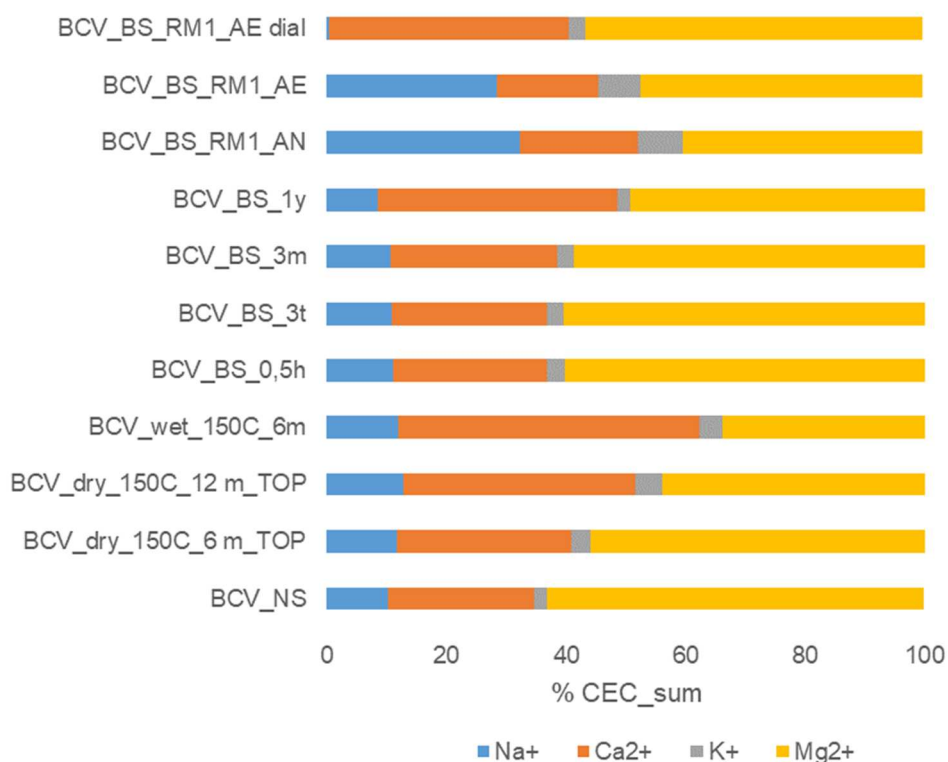
A



B



Obr. 30 Porovnání CEC (A) a CEC_sum (B) NS bentonitu BCV (BCV_NS) a BCV kontaktovaného s deionizovanou vodou (BS) po dobu 0,5 hodin (0,5h) až 1 roku (1y); a se PGM mediem po dobu 6 měsíců (RM1) sušeného za anaerobních podmínek (AN), aerobních podmínek (AE) a dialyzovaného (dial).

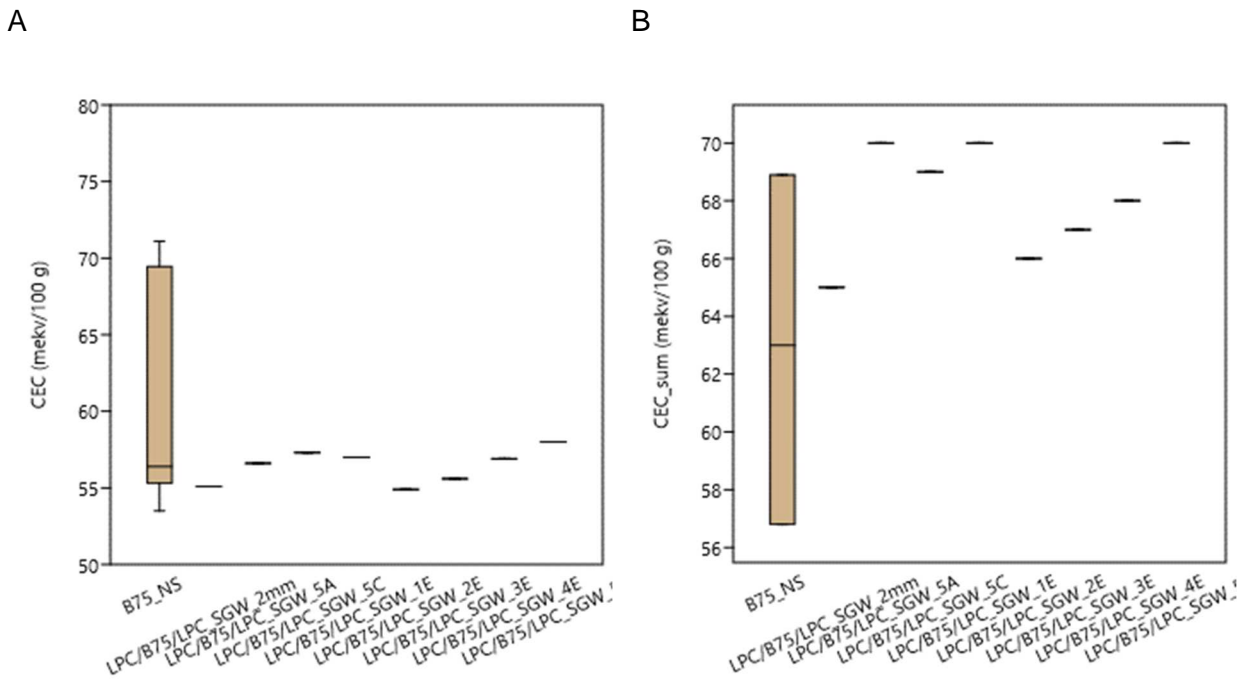


Obr. 31 Poměr vyměnitelných kationtů NS bentonitu BCV (BCV_NS) a teplotně zatěžovaného za teploty 150-200 °C po dobu 6-27 měsíců (m), BCV kontaktovaného s deionizovanou vodou (BS) po dobu 0,5 hodin (0,5h) až 1 roku (1y) a kontaktovaného se SRB médiem po dobu 6 měsíců (RM1) sušeného za anaerobních podmínek (AN), aerobních podmínek (AE) a dialyzovaného (dial).

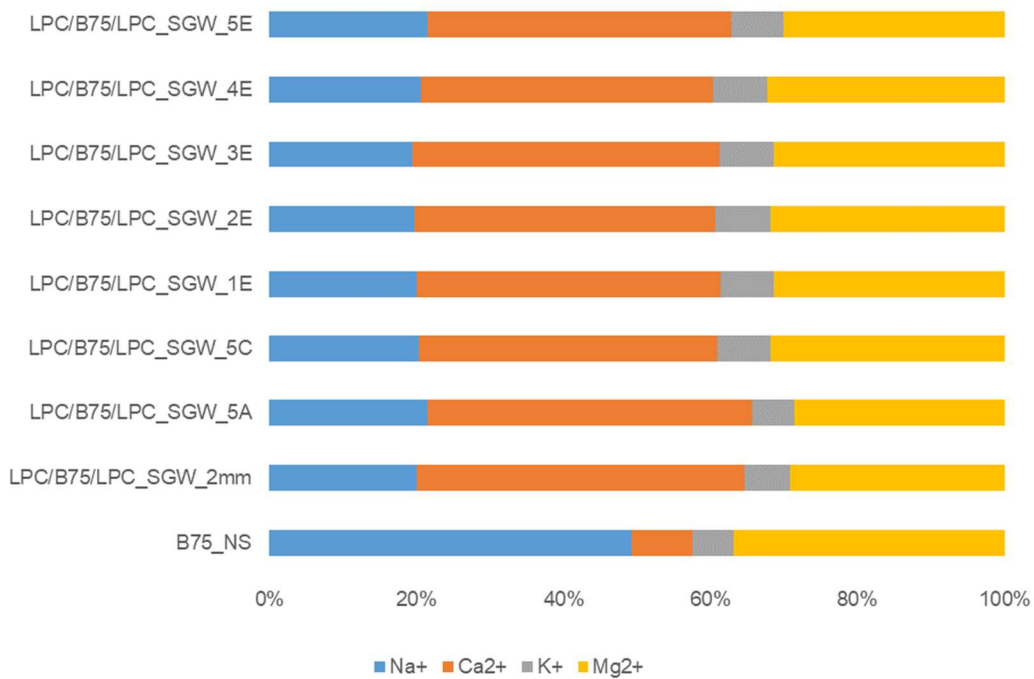
2.3.2 CEC – B75

Statistické parametry pro soubory dat B75 bentonitu CEC a CEC_sum jsou v Příloze 3. Data pro OS pocházejí z experimentu, při kterém byl bentonit kontaktován s LPC a sycen SGW vodou (Vašíček et al. 2016). Porovnání B75_NS oproti bentonitu kontaktovanému LPC a sycenému SGW vodou po dobu delší, než jeden rok je uvedeno na Obr. Obr. 32A-B. Hodnoty CEC spadají do intervalu spolehlivosti B75_NS.

Hodnoty CEC_sum není možné v tomto případě pomocí intervalu spolehlivosti hodnotit. Interval spolehlivosti byl počítán pouze ze 3 hodnot a je velice široký ($62,90 \pm 15,03$). Z Obr. Obr. 32B vyplývá výrazný posun v hodnotách CEC_sum oproti B75_NS. Z vyměnitelných kationtů byl v souvislosti s kontaktováním s LPC a sycením SGW vodou pozorován výrazný pokles Na^+ , nárůst Ca^{2+} a mírný pokles Mg^{2+} (Obr. 33).



Obr. 32 Porovnání CEC_VIS (A) a CEC_sum (B) B75_NS a B75 kontaktovaného s LPC a syceného SGW vodou po dobu delší jak jeden rok.



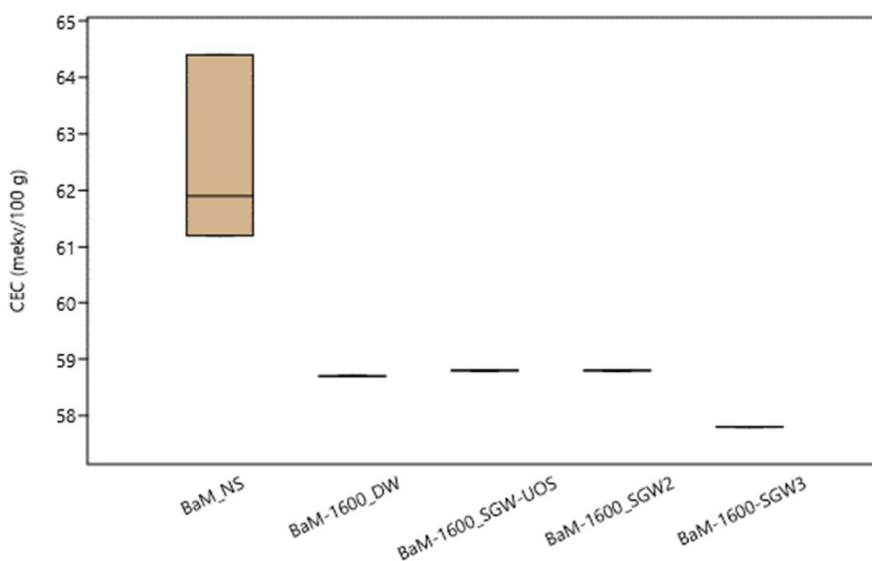
Obr. 33 Poměr vyměnitelných kationtů B75_NS a B75 kontaktovaného s LPC a syceného SGW vodou po dobu delší jak jeden rok.

2.3.3 CEC – BaM

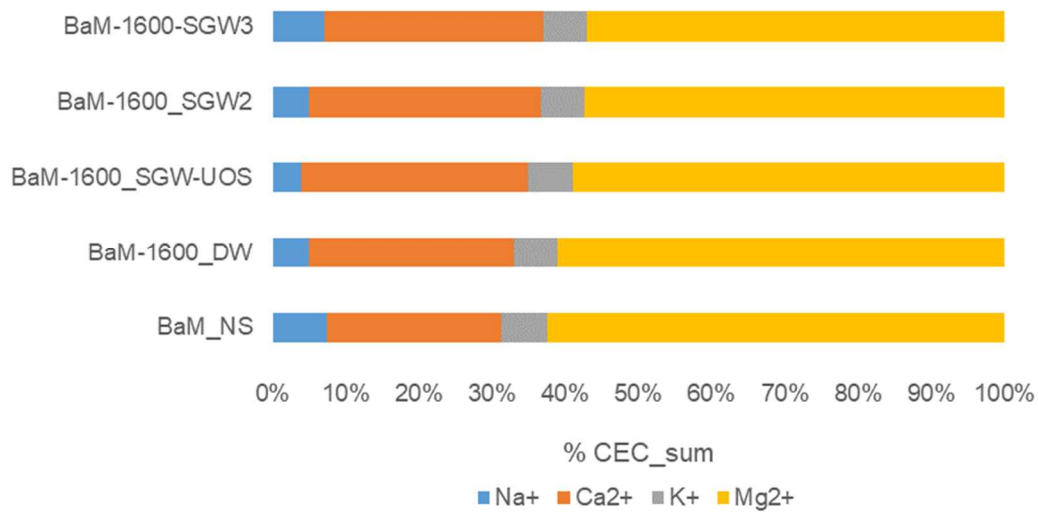
Statistické parametry pro NS bentonitu BaM hodnot CEC a CEC_sum jsou uvedeny v Příloze 3. Data pro OS BaM pocházejí ze čtyř různých experimentů:

- BaM kompaktný na objemovou hmotnost 1600 kg/m^3 a sycený různými druhy vod (DW, SGW-UOS, SGW2, SGW3) za laboratorní teploty po dobu 8 týdnů (Červinka et al. 2019).
- BaM kontaktovaný YCW vodou za laboratorní teploty po dobu 6 a 23 týdnů (Červinka et al. 2019).
- BaM kompaktný na objemovou hmotnost 1600 kg/m^3 sycený SGW-UOS vodou při $70 \text{ }^\circ\text{C}$ a kontaktovaný s ocelí 422707.9 po dobu 0,25 – 1,25 roku (Dobrev et al. 2017).
- BaM kompaktný na objemovou hmotnost 1600 kg/m^3 sycený SGW-UOS vodou při laboratorní teplotě (resp. 40 nebo $70 \text{ }^\circ\text{C}$) a kontaktovaný s ocelí a práškovým Fe po dobu 0,25 – 1,25 roku (Gondolli et al. 2018a, 2018b).

K poklesu hodnot CEC mimo interval spolehlivosti BaM_NS ($62,50 \pm 4,18$) došlo při zatěžování vodou SGW3 (Obr. 34). Je na zvážení, zda interval spolehlivosti BaM_NS je dostatečný, protože vychází pouze ze 3 měření. Z podílu vyměnitelných kationtů je patrný mírný nárůst Ca^{2+} a pokles Mg^{2+} oproti bentonitu BaM_NS (Obr. 35).

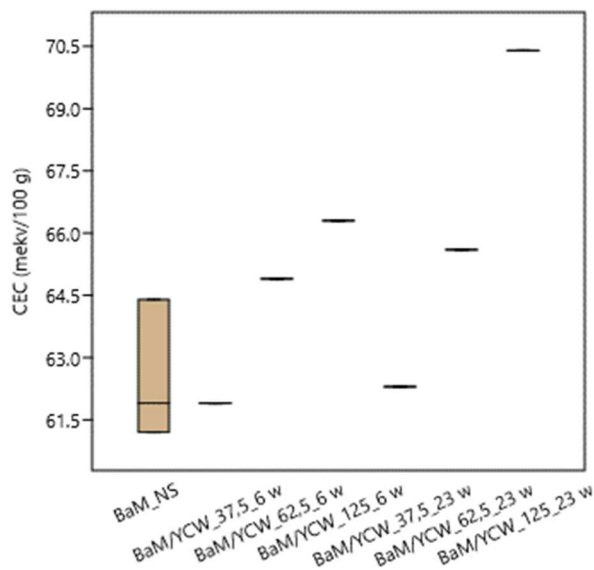


Obr. 34 Porovnání CEC BaM_NS a BaM kompaktný na 1600 kg/m^3 sycený vodami DW, SGW-UOS, SGW2 a SGW3 při laboratorní teplotě po dobu 8 týdnů.

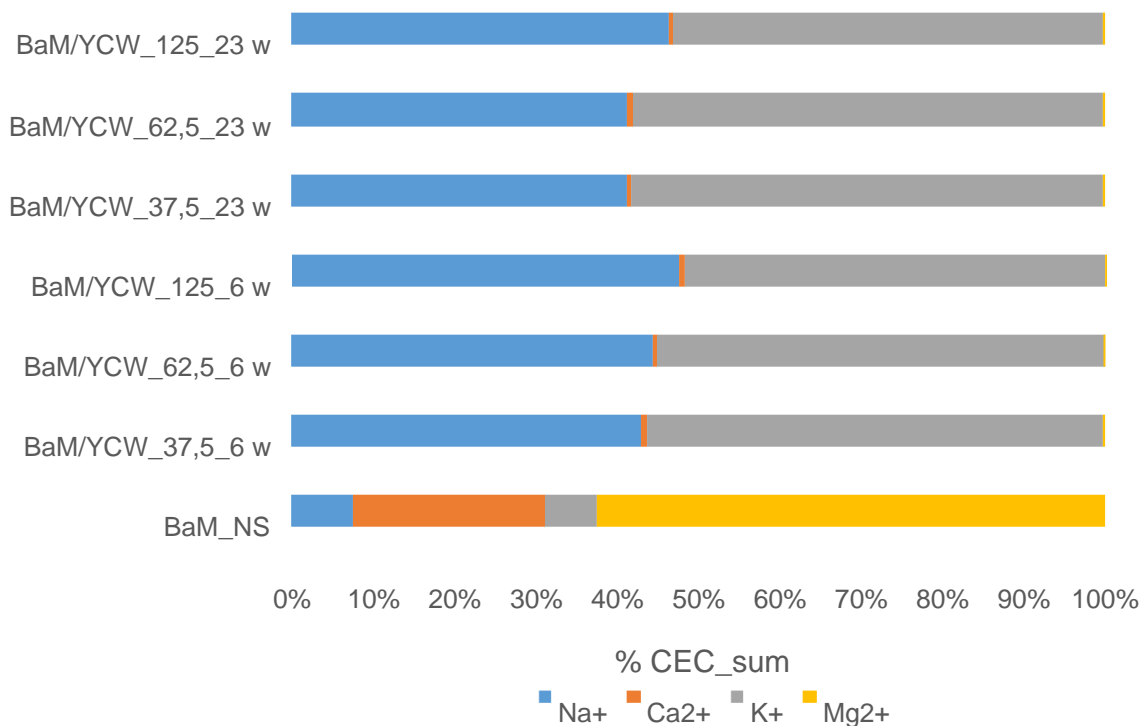


Obr. 35 Podíl vyměnitelných kationtů u bentonitu BaM kontaktovaného s destilovanou vodou (DW) a vodami SGW-UOS, SGW2 a SGW3 při laboratorní teplotě po dobu 8 týdnů.

Výrazný nárůst CEC se projevil u bentonitu syceného YCW vodou v poměru 62,5 a 125 g/L po 6 i 23 týdnech (Obr. 36). U poměru 125 g/L tento nárůst překročil interval spolehlivosti BaM_NS. Výrazně se změnil poměr vyměnitelných kationtů: poklesl obsah Ca²⁺ a Mg²⁺ a stoupl obsah Na⁺ a K⁺. Převažujícím kationtem se stal K⁺ (Obr. 37).

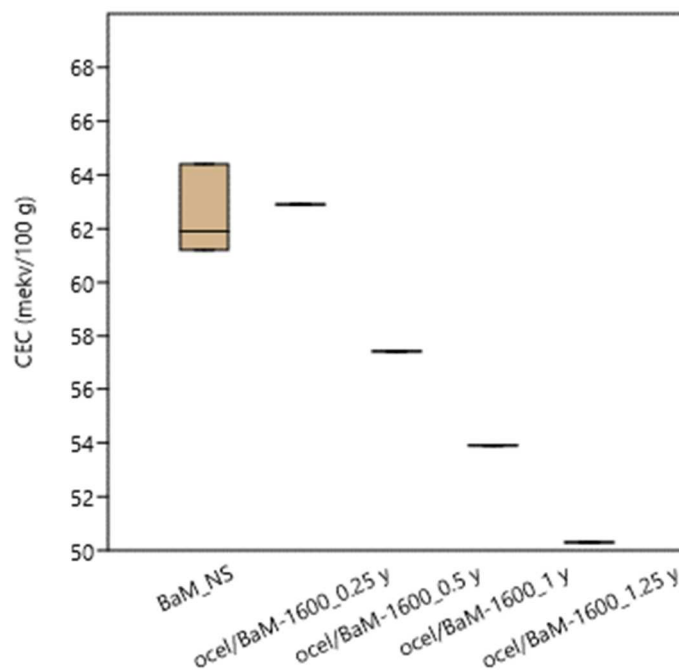


Obr. 36 Porovnání CEC BaM_NS a BaM kontaktovaného YCW vodou v poměru s:l 37,5, 62,5 a 125 g/l po dobu 6 a 23 týdnů.



Obr. 37 Podíl vyměnitelných kationtů u bentonitu BaM kompaktovaného na 1600 kg/m³ kontaktovaného YCW vodou v poměru s:l 37,5, 62,5 a 125 g/l při laboratorní teplotě po dobu 6 a 23 týdnů.

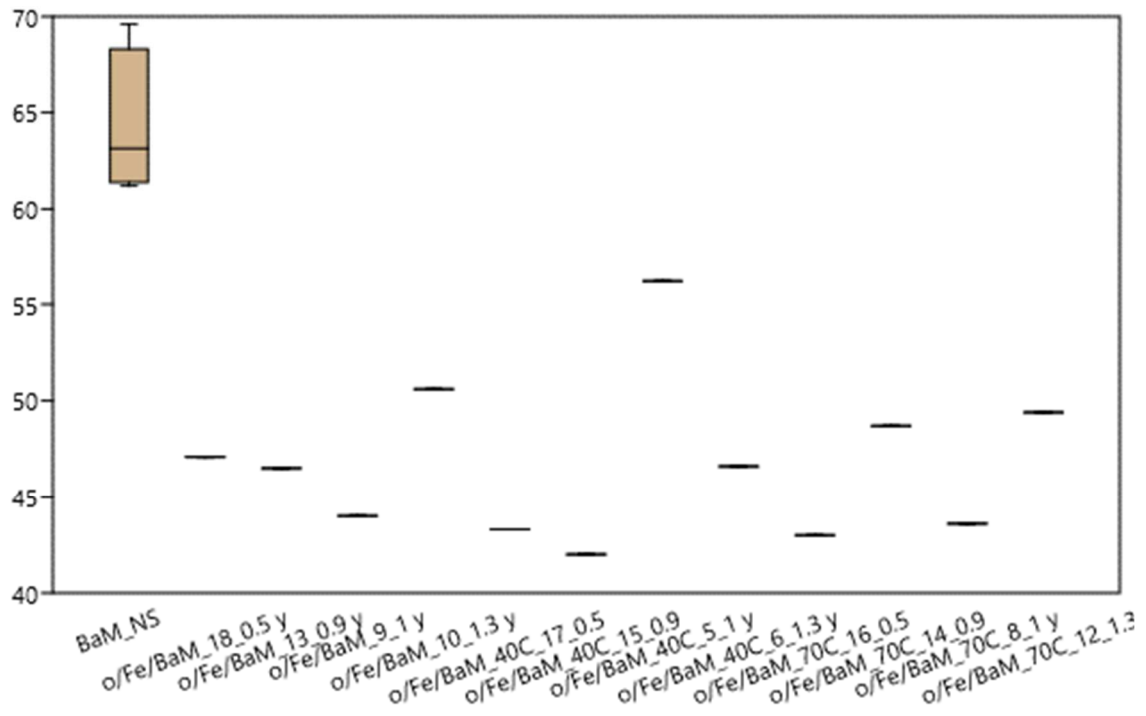
Pokles hodnot CEC mimo interval spolehlivosti BaM_NS se projevil u bentonitu kompaktovaného na 1600 kg/m³ kontaktovaného s ocelí a SGW-UOS vodou po dobu 0,5 až 1,25 roku (Obr. 38). Hodnoty CEC_sum a podíl vyměnitelných kationtů pro tento experiment chybí.



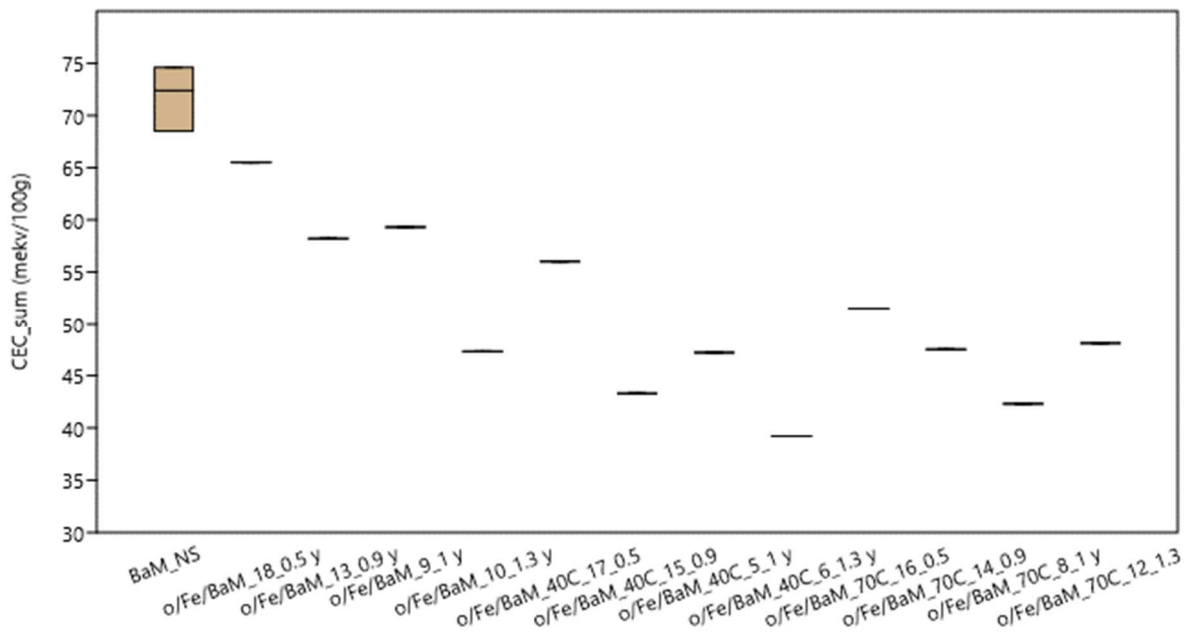
Obr. 38 Porovnání CEC BaM_NS a BaM kompakovaný na 1600 kg/m³ sycený SGW-UOS vodou při teplotě 70 °C po dobu 0,25-1,25 roku kontaktovaný s ocelí 422707.9.

Hodnoty CEC a CEC_sum se výrazně snížily u BaM kompakovaného na objemovou hmotnost 1600 kg/m³ syceného SGW-UOS vodou při laboratorní teplotě (resp. 40 nebo 70 °C) a kontaktovaného s práškovým Fe po dobu 0,25 – 1,25 roku (Obr. 39). Všechny tyto hodnoty klesly pod interval spolehlivosti CEC a CEC_sum BaM_NS. Z vyměnitelných kationtů byl u zatěžovaného BaM pozorován pokles Mg²⁺, nárůst K⁺ a nárůst Ca²⁺ při zatěžování za laboratorní teploty i při 40 i 70 °C (Obr. 40). Výše uvedené trendy jsou ne jvýraznější po dobu prvního roku zatěžování. Poté dochází k jejich ustálení.

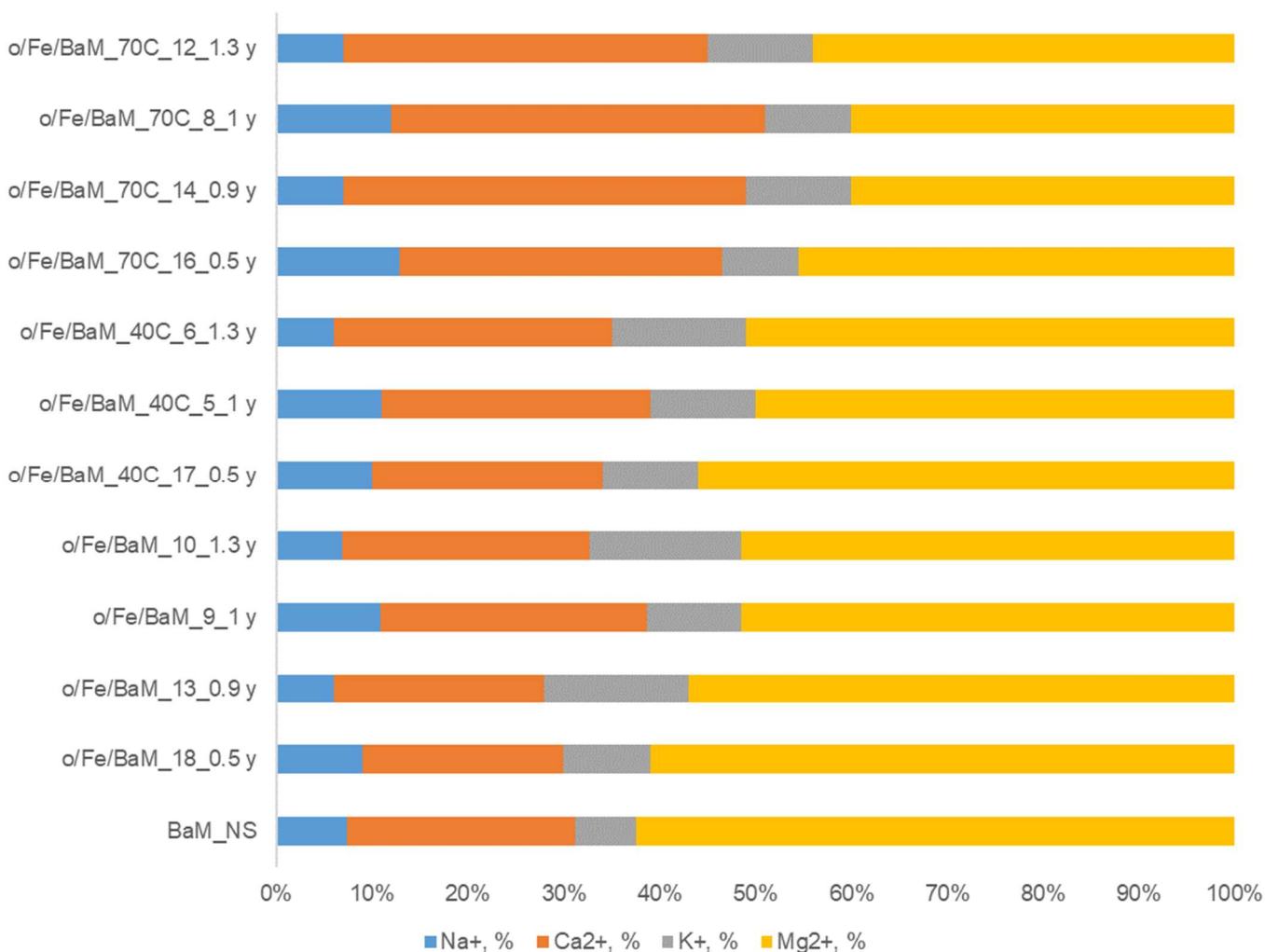
A



B



Obr. 39 Porovnání CEC (A) a CEC_sum (B) BaM_NS a BaM kompaktovaného na 1600 kg/m³, kontaktovaného s práškovým Fe a syceného SGW-UOS vodou při laboratorní teplotě a při teplotě 40 °C (40C) a 70 °C (70C) po dobu 0,25-1,25 roku (y).



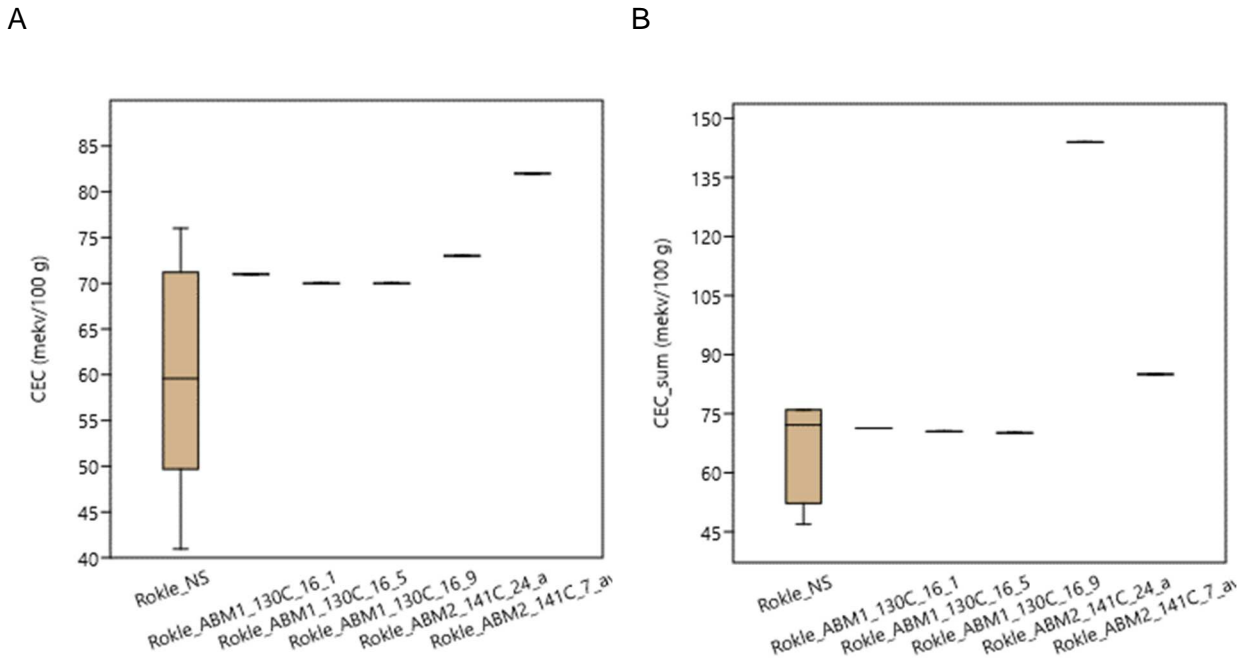
Obr. 40 Poměr vyměnitelných kationtů NS bentonitu BaM (BaM_NS) BaM kompaktovaného na 1600 kg/m³, kontaktovaného s práškovým Fe a syceného SGW-UOS vodou při laboratorní teplotě a při teplotě 40 °C (40C) a 70 °C (70C) po dobu 0,25-1,25 roku (y).

2.3.4 CEC – Rokle

Statistické parametry pro NS bentonitu Rokle hodnot CEC jsou uvedeny v Příloze 3. Data pro OS Rokle pocházejí ze čtyř různých experimentů:

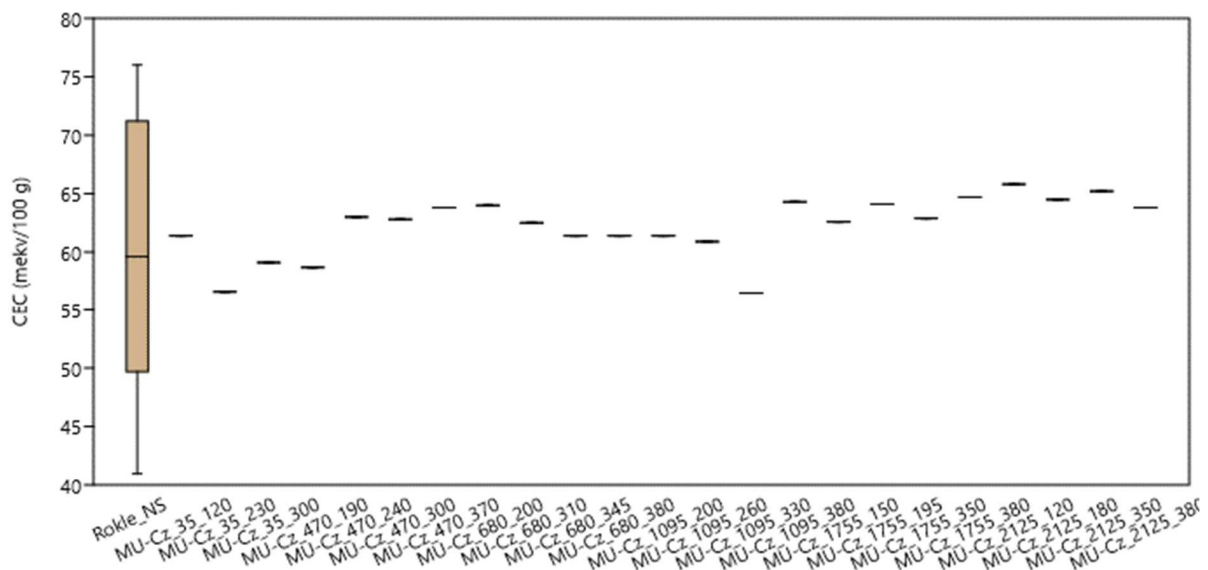
- Experiment Aspö – bentonit kontaktovaný s Na-Ca-Cl vodou po dobu 28 měsíců a teplotně zatěžovaný při 130 °C po dobu 1 roku (Svensson et al. 2011).
- Experimentu Aspö – bentonit kontaktovaný s Na-Ca-Cl vodou po dobu 30 měsíců a teplotně zatěžovaný při 141 °C po dobu 4 let (Dohrmann a Kaufhold 2017).
- Substrát Mock-Up-CZ (směs bentonitu, křemenného písku a grafitu) zatěžovaný při teplotě do 100 °C vodou SGW po dobu 37 měsíců (Křížová et al. 2006a, 2006b, 2008b).
- Substrát Mock-Up-CZ (směs bentonitu, křemenného písku a grafitu) zatěžovaný po dobu 4 let na teplotu 60-70 °C a následně zatěžovaný vodou Josef po dobu 13 dnů při 95 °C + 1 den při 25 °C (Křížová et al. 2010; Pacovský et al. 2010b).

Mimo interval spolehlivosti CEC Rokle_NS ($59,63 \pm 6,73$ mekv/100 g) jsou hodnoty z experimentu Aspö zatěžovaného při teplotě 130 i 141 °C (Příloha 3, Obr. 41). Tyto hodnoty převyšují CEC a CEC_sum bentonitu Rokle-NS. Interval spolehlivosti pro CEC_sum Rokle NS není vhodné použít. Vychází pouze ze 4 hodnot a je široký ($66,8 \pm 21,89$ mekv/100 g).



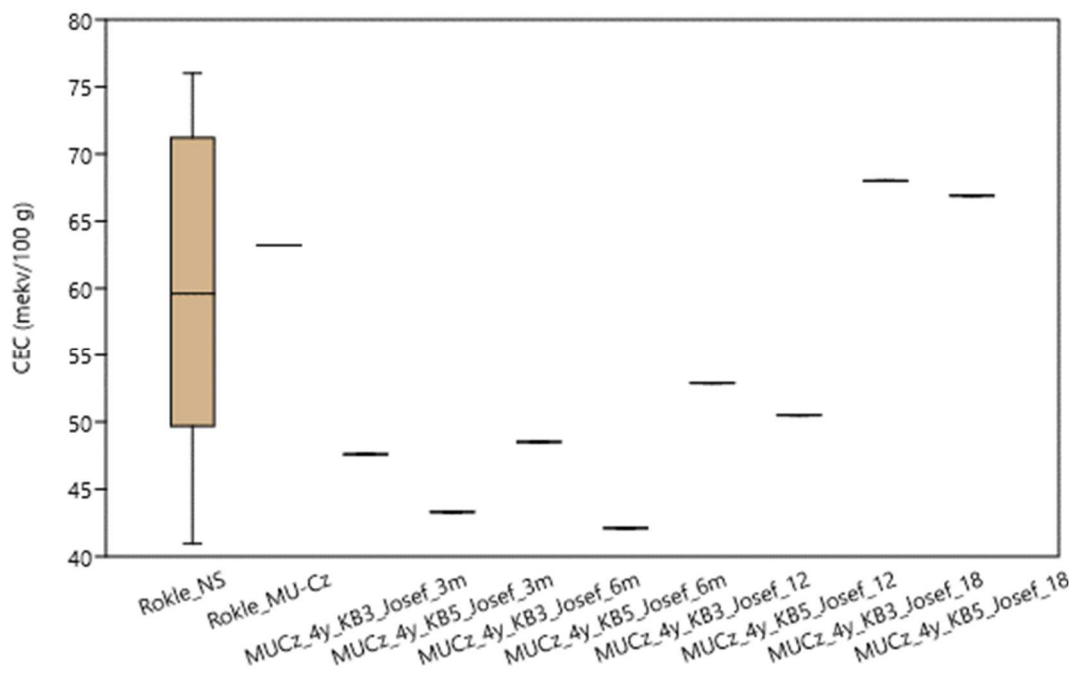
Obr. 41 Porovnání CEC (A) a CEC_sum (B) Rokle_NS a Rokle z experimentu Aspö zatěžovaného Na-Ca-Cl vodou při 130 °C po dobu 1 roku (130C) a při 141 °C po dobu 4 let (141C).

Uvnitř intervalu spolehlivosti CEC Rokle_NS se pohybují hodnoty z experimentu Mock-Up-CZ kontaktované vodou SGW po dobu 37 měsíců (Obr. 42).



Obr. 42 Porovnání hodnot CEC pro Rokle_NS a substrát z experimentu Mock-Up-CZ (MU-CZ) zatěžovaný při teplotě do 100 °C vodou SGW po dobu 37 měsíců. Číselné údaje v názvech vzorků udávají hloubku odběru a vzdálenost od středu patry v mm.

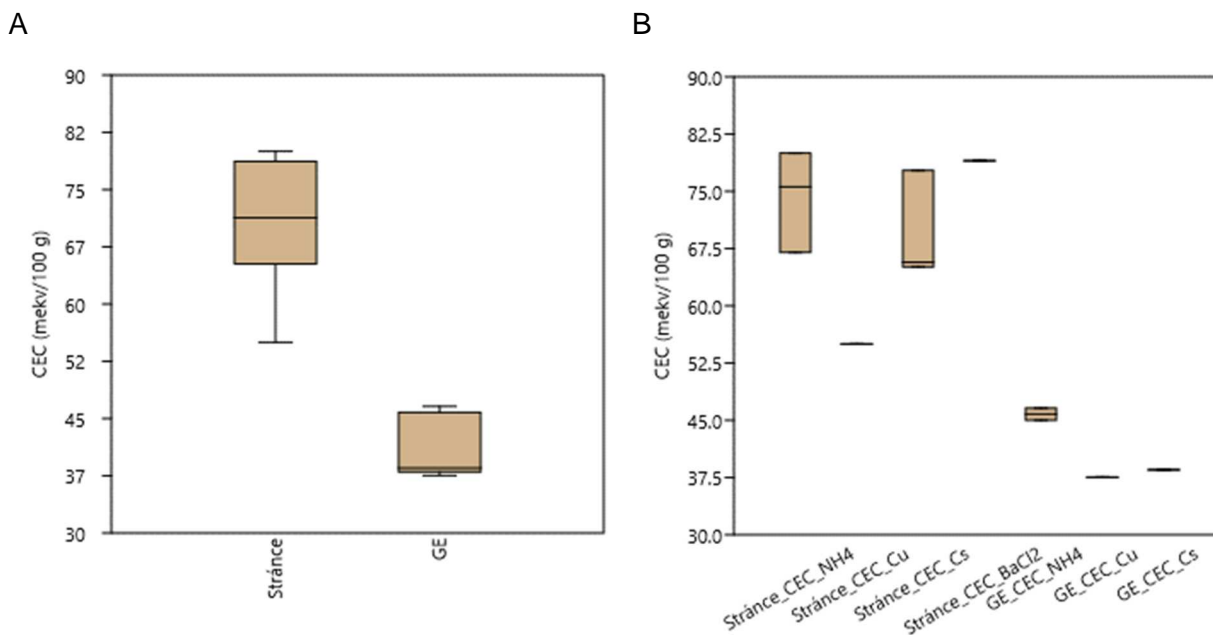
Mimo interval spolehlivosti CEC Rokle_NS jsou i hodnoty z experimentu Mock-Up-CZ (Obr. 43). U vzorků odebraných po 3-12 měsících došlo k poklesu CEC, u odběru po 18 měsících došlo k výraznému nárůstu (Obr. 43).



Obr. 43 Porovnání hodnot CEC pro Rokle_NS a substrát z experimentu Mock-Up-CZ (MUCZ) zatěžovaný po dobu 4 let (4y) na teplotu 60-70 °C a následně zatěžovaný vodou Josef po dobu 13 dnů při 95 °C + 1 den při 25 °C – odběry byly provedeny po 3-18 měsících.

2.3.5 CEC – Stránce a Zelený jíł

Statistické parametry pro NS bentonitu Stránce a Zelený jíł hodnot CEC jsou uvedeny v Příloze 3. U bentonitu Stránce je patrný výrazný rozptyl hodnot (Obr. 44A). Při odlišení CEC dle typu použité metody (Obr. 44B) je patrné možné nadhodnocení CEC při stanovení CEC výměnou na NH_4^+ (CEC- NH_4), výměnou za Ba^{2+} (CEC- BaCl_2) a výměnou za Cs^+ (CEC-Cs) oproti stanovení pomocí Cu(II)triethylentetraminu (CEC-Cu). Pro bentonit Stránce a Zelený jíł nejsou k dispozici hodnoty pro OS.



Obr. 44 CEC bentonitu Stráňce a Zelený jíl v NS celkové (A) a odlišené dle typu použité metody (B). CEC-NH₄ – CEC stanovená výměnou na NH₄⁺, CEC-Cu – CEC stanovená pomocí Cu(II)triethylentetraminu, CEC-BaCl₂ – CEC stanovená výměnou za Ba²⁺, CEC-Cs – CEC stanovená výměnou za Cs⁺.

2.3.6 CEC – metodické a statistické zhodnocení

Mezi hlavní výhody metody CEC patří:

- obvyklý postup stanovení CEC v triplikátu u jednotlivých stanovení;
- počet dat ≥ 3 u většiny NS umožňující použití Dean-Dixonova testu pro odlehle hodnoty;
- data pro OS dostupná pro bentonity BCV, B75, BaM a Rokle.

Hlavní limitující faktory pro statistické zpracování CEC českých bentonitů jsou:

- využití čtyř různých postupů stanovení – CEC-Cu, CEC-NH₄, CEC-Co, CEC-BaCl₂. Vliv použití různých metod je patrný z šířky intervalu spolehlivosti:
 - BCV_NS – $60,92 \pm 1,82$ mekv/100 g – analyzováno jednou metodou (CEC-Cu);
 - BaM_NS – $62,50 \pm 4,18$ mekv/100 g – analyzováno jednou metodou (CEC-Cu);
 - B75_NS – $60,37 \pm 7,95$ mekv/100 g – analyzováno 3 metodami (CEC-Cu, CEC-NH₄, CEC-Cs);
 - Rokle_NS – $59,63 \pm 6,73$ mekv/100 g – analyzováno 4 metodami (CEC-Cu, CEC-NH₄, CEC-Cs, CEC-BaCl₂);
 - Stráňce – $70,64 \pm 7,38$ mekv/100 g – analyzováno 4 metodami (CEC-Cu, CEC-NH₄, CEC-Cs, CEC-BaCl₂).
- zpracování analýz v různých laboratořích.

Z porovnání CEC dle typu použité metody (Obr. 44B) je patrné možné nadhodnocení CEC při stanovení CEC výměnou na NH₄⁺ (CEC-NH₄) a výměnou za Ba²⁺ (CEC-BaCl₂) oproti stanovení pomocí Cu(II)triethylentetraminu (CEC-Cu).

Stejně tak je tomu u hodnot vyměnitelných kationtů. V případě, že vyměnitelné kationty byly analyzovány různými laboratořemi a různými metodami, intervaly spolehlivosti jsou velmi široké, často převyšující obsah kationtu (Tab. 4).

Z metodického pohledu by pro budoucí stanovení CEC mělo platit:

- omezení stanovení CEC pouze na jednu metodu;
- minimální počet stanovení na vzorek = 6;
- omezení stanovení na jednu laboratoř, nebo minimální počet stanovení na vzorek pro každou laboratoř = 6.

Z porovnání CEC a CEC-sum pro NS vyplývá podobný charakter většiny českých bentonitů. Výrazně nižší jsou CEC i CEC_sum pro GE_NS odpovídající faktu, že se jedná o montmorillonitický jíl s nižším obsahem smektitu (Tab. 3). Výrazně vyšší hodnota CEC pro Stránce_NS může souviset s přednostním použitím CEC-NH₄ a CEC-Cs, které mohou hodnotu CEC nadhodnotit.

U většiny bentonitů byl potvrzen jejich Mg-Ca charakter. U bentonitu Rokle_NS je dominantním kationtem Ca²⁺, u B75_NS a GE_NS je dominantním kationtem Na⁺. Nabohacení B75 o Na⁺ je pravděpodobně důsledkem jeho průmyslového zpracování a jeho aktivací uhlíčanem sodným (Hausmannová et al. 2018).

Tab. 4 CEC, CEC_sum a zastoupení vyměnitelných kationtů v NS bentonitu. AVG – průměr, CEC-BaCl₂ – kationtová výměnná kapacita stanovená výměnou za Ba²⁺, CEC-Cs – kationtová výměnná kapacita stanovená výměnou za Cs⁺, CEC-Cu – Kationtová výměnná kapacita pomocí Cu(II)triethyltetraminu, CEC-NH₄ – kationtová výměnná kapacita stanovená výměnou na NH₄⁺, CEC_sum – suma vyměnitelných kationtů, L – interval spolehlivosti, n – počet analýz, ¹ Muurinen a Carlsson (2013), ² Fernández a Villar (2010), ³ 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	60,37	7,95	CEC-Cu > CEC-NH ₄ = CEC-Cs	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	1 6	59,63	6,73	CEC-Cs > CEC-NH ₄ > CEC-Cu >> CEC-BaCl ₂	4	66,80	21,89
Stránce_NS	8	70,64	7,38	CEC-Cs = CEC-NH ₄ > CEC-Cu	4	65,16	8,18
GE_NS	5	41,23	5,25	CEC-Cs = CEC-NH ₄ > CEC-Cu > CEC-BaCl ₂	2	45,28	22,91
MX-80		88 ¹				105 ³	
FEBEX ²		102	4	CEC-Cu		95,8	0,2

Název bentonitu	n	Na ⁺		Ca ²⁺		K ⁺		Mg ²⁺	
		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
BaM_NS	3	7,37	2,36	23,77	4,62	6,33	4,49	62,24	8,03
BCV_NS	8	10,29	3,20	24,33	5,79	2,22	1,39	63,03	6,11
Rokle_NS	4	1,08	0,50	74,50	7,58	2,56	2,11	21,74	4,80
Stránce_NS	4	1,99	2,10	43,19	12,64	2,10	2,86	53,05	6,96
GE_NS	2	76,74	4,70	6,50	9,04	15,90	16,16	na	
MX-80 ¹		69		22		2		7	
FEBEX ²		28,2		36,5		2,71		32,4	

U BCV bentonitu způsobilo teplotní zatěžování bez vody posun hodnot CEC i CEC_sum mimo interval spolehlivosti BCV_NS. Pokles hodnot CEC i CEC_sum byl pozorován při zatěžování za 150 i 200 °C po dobu 6-27 měsíců. Výrazně se pokles hodnot projevil zejména u vzorků zatěžovaných při 150 °C po dobu 12 měsíců. Kolaříková et al. (2010) poukázala na vliv formování illit-smektitových vrstev na pokles CEC.

U BCV bentonitu spadají hodnoty CEC i CEC_sum bentonitu teplotně zatěžovaného za 150 °C za současného působení destilované vody do intervalu spolehlivosti BCV_NS. Je zde výrazný rozdíl oproti BCV bentonitu zatěžovanému bez vody. Z důvodu malého množství dat není možné jednoznačně říci, zda se jedná o vliv zatěžování či nikoliv.

Nestabilní hodnoty CEC ukázala směs Mock-Up-CZ původně zatěžovaná po dobu 4 let na teplotu 60-70 °C a následně zatěžovaná vodou Josef po dobu 13 dnů při 95 °C + 1 den při 25 °C. U odběrů po 3-12 měsících došlo k poklesu CEC, u odběru po 18 měsících došlo k nárůstu CEC (Křížová et al. 2010; Pacovský et al. 2010b). Kolísání hodnot CEC u bentonitu Rokle může souviset s jeho heterogenitou související s charakterem vzorku (kopaný vzorek).

Křížová et al. (2010) zkoumala vývoj poměru kationů v substrátu z bentonitu Rokle v závislosti na složení vody, kterou byl substrát zatěžovaný. Z důvodu charakteru dat nebylo možné data zahrnout do DÚ02 a DÚ03. Na vývoji zastoupení vyměnitelných kationtů byly potvrzeny stejné závěry jako z CC. Hlavní změny byly pozorovány v průběhu prvních tří měsíců s výjimkou substrátu Mock-Up-Cz, kdy, kde se poměr Mg/Ca stabilizoval po šesti měsících. U substrátů Rokle a Mock-Up-Cz došlo k výraznému snížení poměru Mg/Ca jak proti poměru v původních vodách, tak i ve srovnání s jejich poměrem v substrátech. Pozorování indikovalo v substrátu přednostní vazbu hořčíku ve srovnání s vápníkem (Křížová et al. 2010). Z poměru Ca/Na vyplývá jeho výrazné snížení, což ukazuje na přednostní vazbu vápníku do substrátu a uvolňování sodíku do vody. U poměru K/Na dochází k poklesu bez ohledu na to, zda dochází k uvolňování draslíku ze substrátu, nebo se draslík z vody do substrátu váže. Draslík se tedy ve srovnání se sodíkem přednostně váže v substrátu. Celkově byl potvrzen nulový vliv složení vody a převažující vliv složení substrátu. Limitujícím pro závěry ze zprávy Křížová et al. (2010) je fakt, že poměry mezi sledovanými substráty a vodami byly velmi odlišné a nebyl zachováván stejný poměr substrátem a vodou.

Při experimentu v podzemní laboratoři Aspö došlo u bentonitu Rokle k nárůstu CEC i CEC_sum při zatěžování při teplotě 130 i 141 °C (Svensson et al. 2011; Dohrmann a Kaufhold 2017).

Kontaktování BaM bentonitu s různými druhy vod (destilovaná voda, SGW2, SGW3, SGW-UOS) při laboratorní teplotě po dobu 8 týdnů nemělo na hodnoty CEC žádný vliv (Červinka et al. 2019).

Kolaříková et al. (2010) poukázala na vliv formování illit-smektitových vrstev na pokles CEC při teplotním zatěžování už při teplotách 50-80 °C v experimentu Mock-Up-Cz obsahujícím bentonit Roke. Velmi výrazný pokles CEC-NH₄ (71,8 ± 14,4 mekv/100 g → 37,5 ± 7,5 mekv/100 g) zaznamenala i Kolaříková et al. (2010) u podobného typu experimentu.

K poklesu hodnot CEC mimo interval spolehlivosti BaM_NS došlo u bentonitu kompaktovaného na 1600 kg/m³ kontaktovaného s ocelí a SGW-UOS vodou po dobu 0,5 až 1,25 roku (Dobrev et al. 2017). Hodnoty CEC_sum a podíl vyměnitelných kationtů pro tento experiment chybí.

Výsledky předchozí studie jsou v souladu s trendy pozorovanými u BaM kompaktovaného na objemovou hmotnost 1600 kg/m³ syceného SGW-UOS vodou při laboratorní teplotě (resp. 40 nebo 70 °C) a kontaktovaného s práškovým Fe po dobu 0,25 – 1,25 roku. Hodnoty CEC a CEC_sum se výrazně snížily u všech analyzovaných vzorků. Všechny tyto hodnoty klesly pod interval spolehlivosti CEC a CEC_sum BaM_NS. Z vyměnitelných kationtů byl u zatěžovaného BaM pozorován pokles Mg²⁺, nárůst K⁺ a nárůst Ca²⁺ při zatěžování za laboratorní teploty i při 40 i 70 °C. Výše uvedené trendy jsou nejvýraznější po dobu prvního roku zatěžování. Poté dochází k jejich ustálení (Gondolli et al. 2018a, 2018b).

V souvislosti s kontaktováním s LPC a sycením SGW vodou došlo u bentonitu B75 k výraznému nárůstu hodnot CEC_sum. Naproti tomu CEC zůstaly v intervalu spolehlivosti B75_NS (Vašíček et al. 2016). Z poměru kationtů byl pozorován výrazný pokles Na⁺, nárůst Ca²⁺ a mírný pokles Mg²⁺. U stejného experimentu zatěžování nemělo vliv na SSA_EGME

Červinka et al. (2019b) zkoumal vliv kontaktování bentonitu BaM YCW vodou. Kontaktování bentonitu YCW vodou se projevilo u zvýšením hodnot CEC bentonitu především u poměru bentonit : voda 62,5 a 125 g/l. Z pohledu vyměnitelných kationtů došlo k výraznému poklesu Ca²⁺ a Mg²⁺ a nárůstu Na⁺ a K⁺. Převažujícím kationtem se stal K⁺.

2.4 Specifický povrch (SSA)

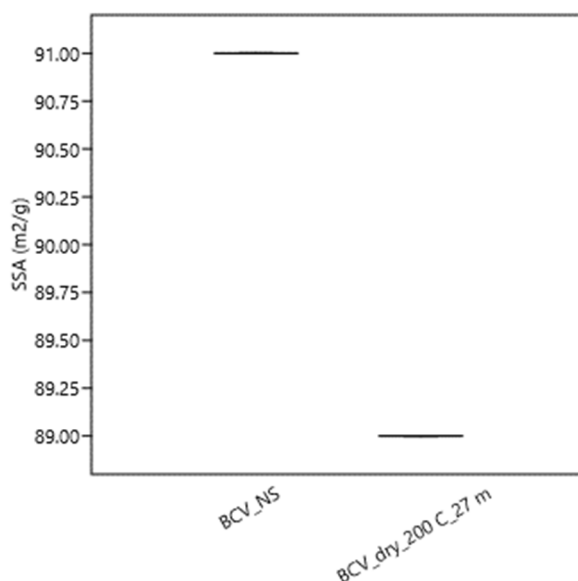
Specifický povrch (SSA) českých bentonitů shrnutých v etapě „02 Rešeršní práce českého výzkumu“ byl analyzováno dvěma typy metod:

- adsorpcí nepolárního plynu (N₂) pomocí metody Brunauer-Emmett-Teller (BET) – dále označované jako SSA_BET;
- adsorpcí polární kapaliny (ethylen glykol monoethyl ether, EGME) – dále označované jako SSA_EGME.

2.4.1 SSA_BET

2.4.1.1 SSA_BET – BCV

Pro NS BCV bentonit existuje vždy jen jeden údaj SSA_BET (Obr. 45). Statistické parametry SSA_BET bentonitu BCV nebyly z důvodu malého počtu dat stanoveny. Pro zatěžovaný bentonit existuje pouze jeden údaj pro zatěžování za sucha při teplotě 200 °C po dobu 27 měsíců (Laufek et al. 2021, Obr. 45).



Obr. 45 SSA stanovený metodou BET pro NS BCV (BCV_NS) a zatížený při teplotě 200 °C po dobu 27 měsíců.

2.4.1.2 SSA_BET – Rokle

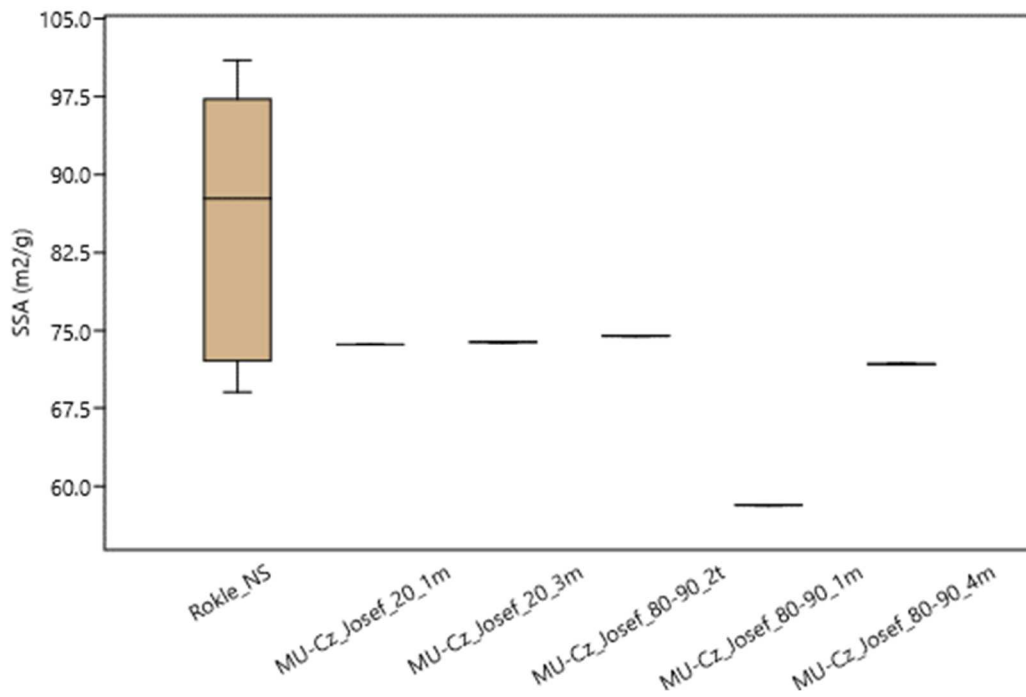
Statistické parametry SSA_BET pro NS bentonitu Rokle jsou shrnuty v Příloze 4. Pro zatěžovaný bentonit existují data SSA_BET odlišená dle typu experimentu:

- Substrát Mock-Up-CZ (směs bentonitu, křemenného písku a grafitu) zatěžovaný po dobu 4 let na teplotu 60-70 °C a následně zatěžovaný vodami Josef, SGW-K a SGW-Mg při teplotě 20 a 80-90 °C po dobu 1-4 měsíců. (Křížová et al. 2010; Pacovský et al. 2010b).
- Substrát Mock-Up-CZ (směs bentonitu, křemenného písku a grafitu) zatěžovaný při teplotě do 100 °C vodou SGW po dobu 37 měsíců (Křížová et al. 2006a, 2006b, 2008b).

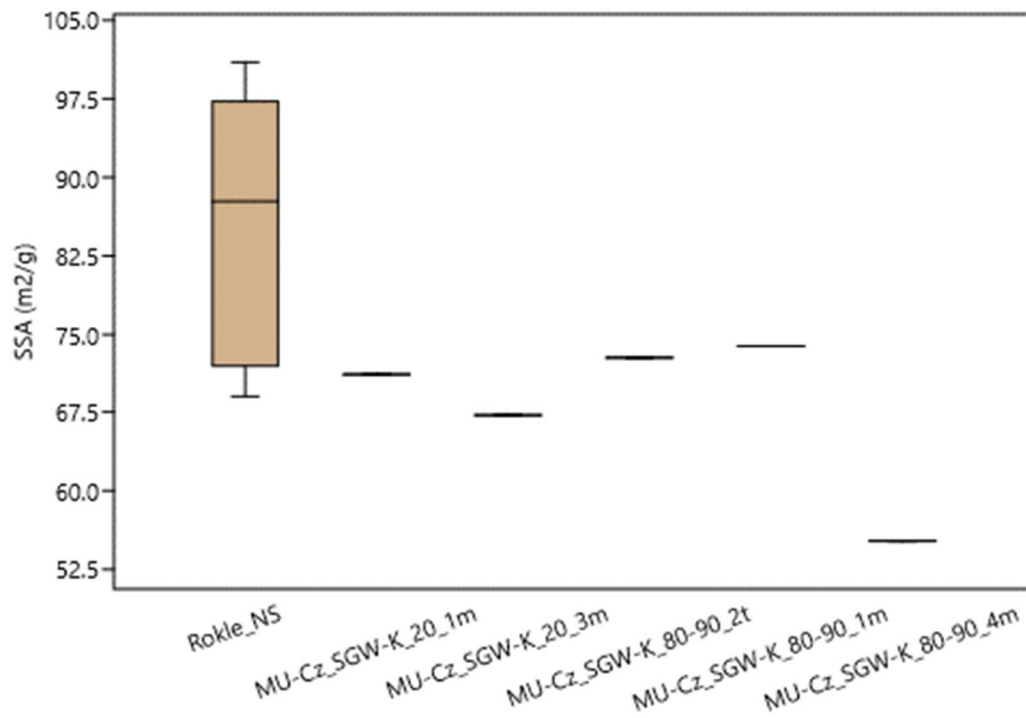
Mimo rozsah hodnot SSA_BET pro Rokle_NS se dostaly vzorky sycené vodami:

- Josef – 80-90 °C – 1 měsíc (Obr. 46);
- SGW-K – 20 °C – 3 měsíce (Obr. 47);
- SGW-K – 80-90 °C – 4 měsíce (Obr. 48);
- SGW – experiment MU-CZ – vzorek z hloubky 680 mm (Obr. 49).

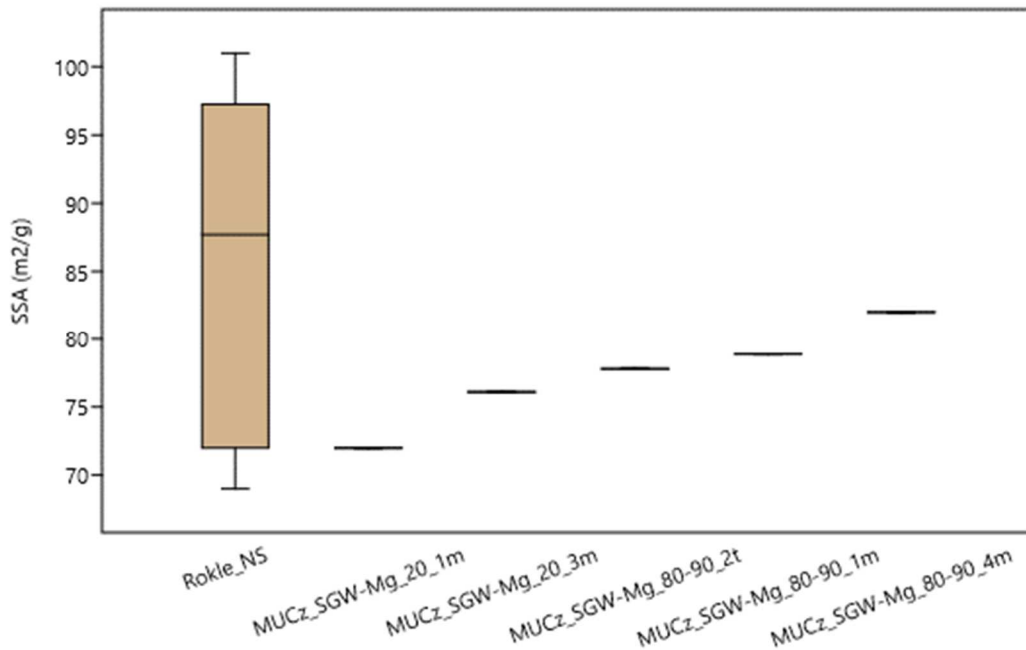
U všech výše uvedených vzorků došlo k poklesu SSA.



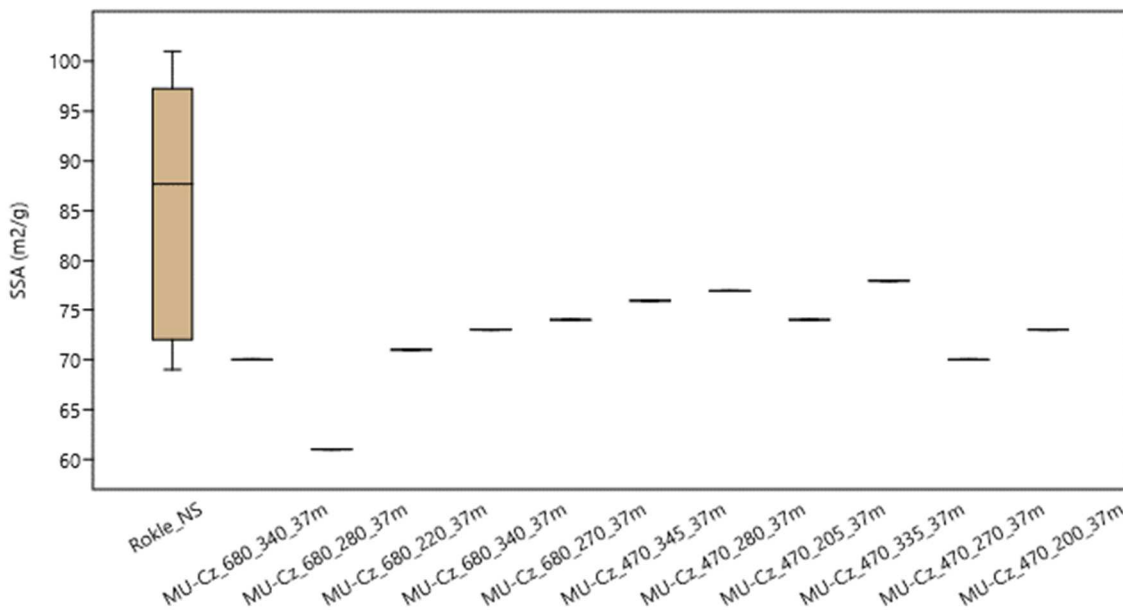
Obr. 46 Porovnání SSA_BET Rokle_NS se substrátem Mock-Up-CZ (MU-Cz) obsahujícím bentonit Rokle kontaktovaným s vodou Josef při teplotě 20 a 80-90 °C po dobu 1-4 m ěsíců.



Obr. 47 Porovnání SSA_BET Rokle_NS se substrátem Mock-Up-CZ (MU-Cz) obsahujícím bentonit Rokle kontaktovaným s vodou SGW-K při teplotě 20 a 80-90 °C po dobu 1-4 m ěsíců.



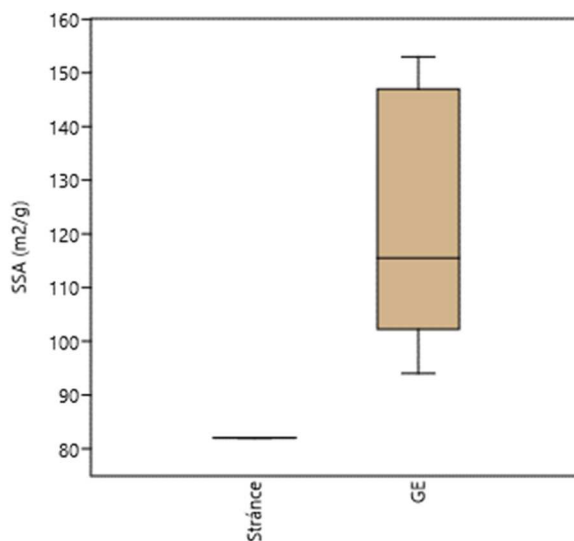
Obr. 48 SSA stanovený metodou BET pro NS bentonit Rokle (Rokle_NS) a kontaktovaný vodou SGW-Mg při teplotě 20 a 80-90 °C po dobu 1-4 měsíců.



Obr. 49 SSA stanovený metodou BET pro NS bentonit Rokle (Rokle_NS) a zatěžovaný po dobu 37 měsíců. Název zatěžovaných vzorků: název experimentu (MU-CZ) – hloubka odběru (mm) – vzdálenost od topidla (mm) – doba zatěžování (37m).

2.4.1.3 SSA_BET – Stránce a Zelený jíł

Bentonity Stránce a Zelený jíł byly testovány metodou BET pouze v NS (Přikryl et al. 2004). Statistické parametry SSA_BET pro NS bentonit Zelený jíł jsou shrnuty v Příloze 4. Statistické parametry bentonitu Stránce nebyly z důvodu malého počtu dat stanoveny. Z Obr. 50 vyplývá velká variabilita hodnot SSA_EGME pro bentonit Zelený jíł.

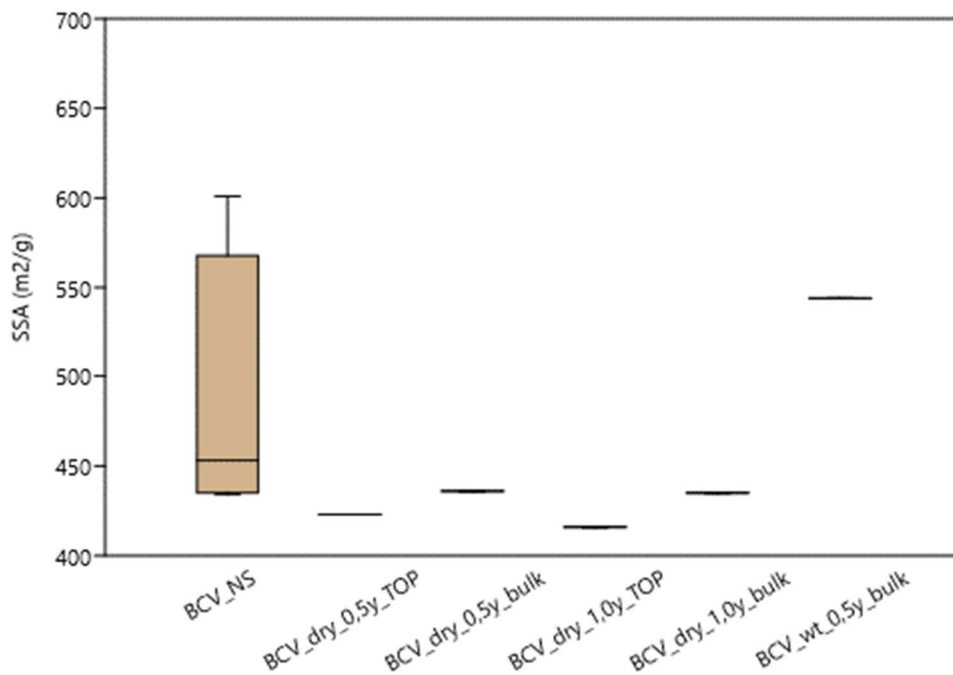


Obr. 50 SSA stanovený metodou BET pro bentonity Stránce a Zelený jííl v NS.

2.4.2 SSA_EGME

2.4.2.1 SSA_EGME – BCV

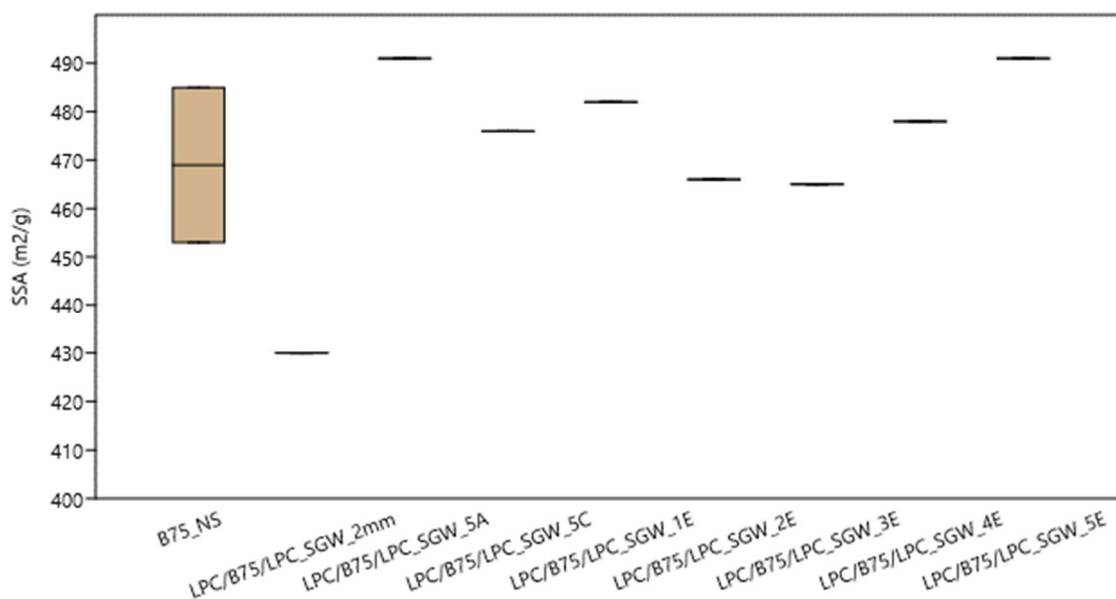
Hodnoty SSA_EGME pro NS bentonit BCV jsou uvedeny v Příloze 4. Pro zatěžovaný bentonit existují data SSA_EGME odlišená dle teploty (150 °C) a délky zatěžování (6-12 měsíců, Černochová et al. 2021; Kašpar et al. 2021, Obr. 51). K poklesu hodnot SSA_EGME mimo rozsah NS bentonitu došlo u vzorků zatěžovaných za sucha odebraných ze svrchní vrstvy nádoby (vzorky označené „TOP“). Vzorky označené „BULK“ jsou na hranici datového souboru pro NS bentonit.



Obr. 51 SSA stanovený metodou EGME pro NS bentonit BCV (BCV_NS) a teplotně zatěžovaný za mokra (wt) a za sucha (dry) po dobu 6-12 měsíců. TOP – svrchní X mm silná vrstva bentonitu.

2.4.2.2 SSA_EGME – B75

Hodnoty SSA_EGME pro NS bentonit B75 jsou uvedeny v Příloze 4. Pro zatěžovaný bentonit existují data SSA_EGME bentonitu kontaktovaného s cementem o nízkém pH (LPC) a syceného SGW-LPC vodou při laboratorní teplotě po dobu delší než 1 rok (Vašíček et al. 2016, Obr. 52). Pro hodnocení nelze použít interval spolehlivosti B75_NS. Pro SSA_EGME B75_NS existují pouze dva údaje a jejich rozpětí je příliš široké. Hodnoty SSA_EGME B75 kontaktovaného s LPC a YCW vodou se pohybují v rozpětí SSA_EGME B75_NS.



Obr. 52 SSA stanovený metodou EGME pro NS bentonit B75 (B75_NS) a kontaktovaný s cementem o různém pH (LPC) a syčený vodou LPC-SGW.

2.4.3 Statistické a metodické zhodnocení

Pro specifický povrch (SSA) českých bentonitů existují dva zcela odlišné parametry: SSA_BET charakterizující tzv. vnější povrch a SSA_EGME charakterizující celkový specifický povrch. Pro oba parametry existuje velmi malý počet dat (SSA_BET – NS 16, OS 26; SSA_EGME NS 7, OS 13), Tab. 5. Oba parametry byly změřeny pouze u BCV_NS. Velmi malý počet dat a data pocházející z různých laboratoří způsobují široké intervaly spolehlivosti i obtížné porovnání napříč bentonity.

Široké intervaly spolehlivosti u nezátížených bentonitů souvisí v případě SSA_EGME i SSA_BET s obtížnou opakovatelností v čase u obou metod a v případě vzorků Rokle_NS a GE_NS i s heterogenitou vzorku související se způsobem jejich odběru (kopané vzorky).

U SSA_BET existují pochybnosti o vhodnosti tohoto parametru pro bentonity. SSA_BET neodráží celkový specifický povrch a označení „vnější specifický povrch“ je z hlediska bentonitů nevhodné. V závěrečné zprávě DÚ 01 (Vašíček et al. 2022) byla tato metoda označena za nevhodnou.

Tab. 5 SSA_EGME a SSA_BET. 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)			SSA_BET (m ² /g)		
	n	AVG	± L	n	AVG	± L
B75_NS	2	469	203		na	
BaM_NS	1	516			na	
BCV_NS	4	485	125	1	91	
Rokle_NS		na		8	85,55	10,69
Stránce_NS		na		1	82,00	
GE_NS		na		6	121,30	24,32
MX-80		635 ¹	19		31,8 ²	
FEBEX		544 ¹	4		56,4 ³	

Pro vyhodnocení vlivů externích faktorů na SSA_EGME se jeví jako zásadní přítomnost vody. U BCV teplotně zatěžovaného za sucha došlo k poklesu hodnot SSA_EGME. Naproti tomu u vzorků zatěžovaných za současného působení vody došlo k nárůstu SSA_EGME.

2.5 Swell index

Swell index byl určen dohromady na 32 vzorcích neovlivněného bentonitu a na 37 vzorcích ovlivněného bentonitu. Do tohoto celkového počtu vztáženého k neovlivněnému bentonitu jsou zahrnuty i analýzy provedené na různých uměle vytvořených formách bentonitu. To se týká bentonitu BCV, BaM a Rokle, kde byly testovány bobtnací schopnosti homoionních jíílů (BCV, BaM), bentonitu s přidavkem práškového železa (BCV) a různé směsi s jiným materiálem (Rokle). Tyto bentonity nebyly ovlivněny ve smyslu vystavení extrémním podmínkám, jakým je zatížení teplem, nebo kombinací teplo/voda, ale bylo s nimi manipulováno za účelem změny vlastností. Případně podléhaly jinému zatížení jako například u bentonitu BVC s přidavkem železa je možné mluvit o zatížení bentonitu časem a vodou. V tomto případě nefigurovala teplota,

ale sledovaly se změny bobtnání různě starých bentonitových suspenzí (Černá 2021). Modifikované bentonity jsou v následujících grafech uvedeny v samostatné skupině.

Celkový počet vzorků neovlivněného a nijak neupravovaného bentonitu napříč všemi druhy je tedy pouze 15. Na bentonitu ovlivněném teplem, nebo současně teplem a vodou bylo provedeno dohromady 37 analýz. Pro jednotlivé druhy bentonitů o specifickém zatížení byla stanovena téměř ve všech případech pouze jedna hodnota swell indexu. Je nutno podotknout, že tato hodnota pochází z měření provedeného současně na 4-5 vzorcích a následného statistického vyhodnocení, které spočívá ve stanovení průměrné hodnoty.

Odečet swell indexu je dle normy (ASTM D 5890–11) po 24 a 48 hodinách po vsypání celého množství 2 g bentonitu do destilované vody. Na základě metodik, které vznikly v DÚ01 (Vašíček et al. 2022) je nutné přihlížet ke skutečnosti, že swell index bentonitu odečtený po 48 hodinách není konečný a vyvíjí se i po dobu několika dní až měsíců (Birgersson et al. 2009). Hodnocení swell indexu bentonitu tedy musí být provedeno pro stejnou dobu odečtu. Tím je do způsobu zařazení bentonitu do skupiny a jeho hodnocení zahrnut další parametr a tím je doba odečtu.

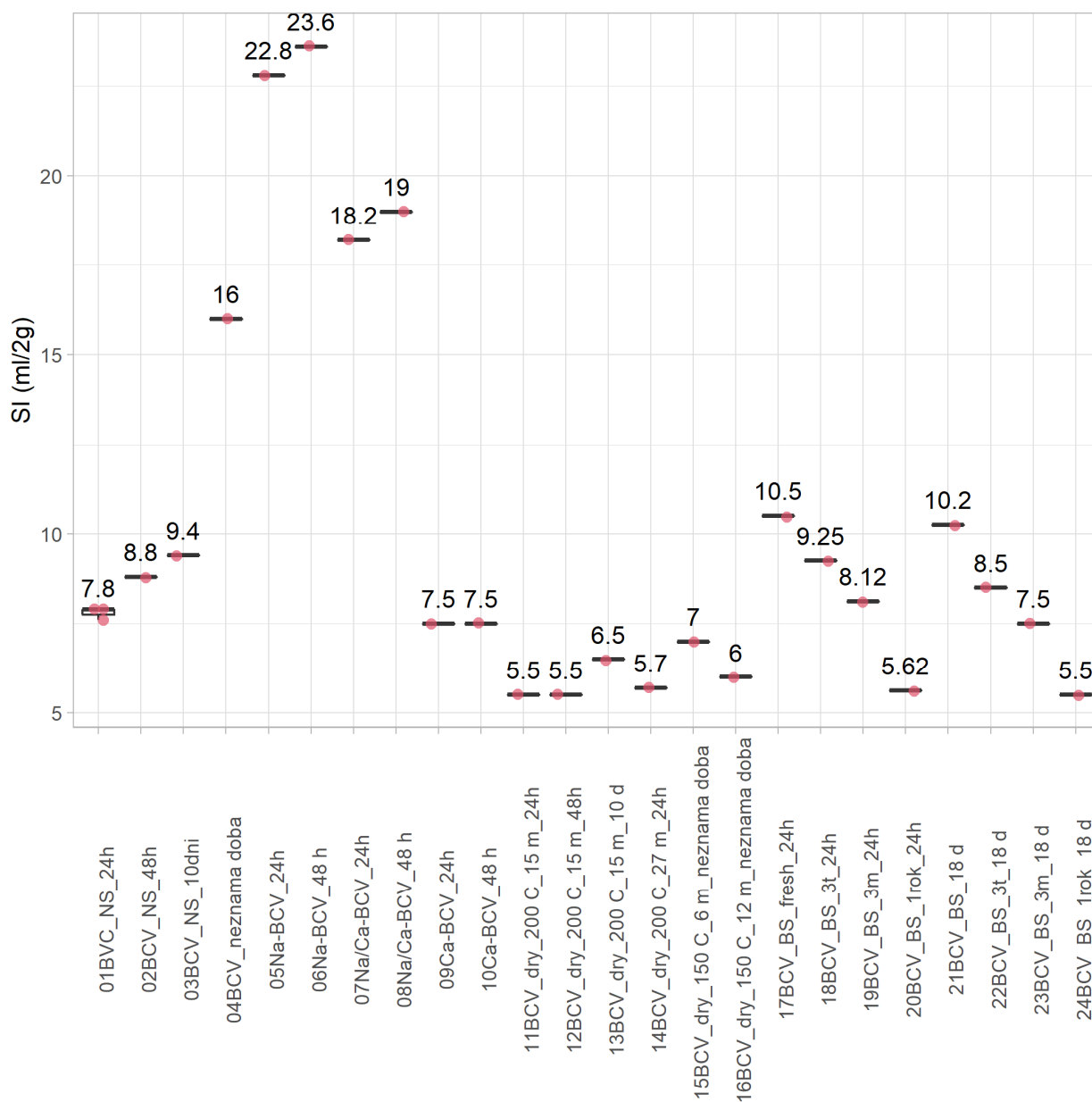
Při vyhodnocování je také nutné přihlídnout k velikosti navážky, která se také může lišit napříč laboratořemi. Přepočtení objemu suspenze při použití významně odlišné navážky na objem suspenze, který odpovídá normou doporučené navážce 2 g vykazuje nezanedbatelnou nepřesnost a výsledky při použití různých navážek není možné porovnávat. Významně odlišná navážka (4g) byla použita v laboratoři TUL na BCV (Černá et al. 2021). Tyto výsledky nelze porovnávat se swell indexem získaným při použití standardní navážky 2g. Do vyhodnocení byla tato měření zahrnuta, jelikož demonstrují vývoj swell indexu v závislosti na stáří suspenze bez zatížení teplotou.

2.5.1 SI – BCV

Data pro určení swell indexu (SI) bentonitu BCV pochází z pěti zdrojů:

- Projekt Geotechnická charakterizace homoionních forem bentonitu BCV 2017 byl zaměřen na charakterizaci různých forem BCV bentonitu (Na-BCV, Ca-BCV, Na/Ca-BCV). Bentonit nebyl tepelně ovlivněn (Vašíček et al. 2019).
- V článku (Kašpar et al. 2021) jsou uvedeny hodnoty swell indexu BCV po tepelném zatížení teplotou 150 °C v suchém stavu po dobu 6 a 12 měsíců.
- V článku (Laufek et al. 2021) je uveden swell index BCV po tepelném zatížení teplotou 200 °C v suchém stavu po dobu 15 a 27 měsíců. Experiment popsáný v článku je zaměřen na sledování vývoje swell indexu v čase. Odečet byl prováděn po 24 hod, 48 hod a 10 dnech.
- V projektu zaměřeném na laboratorní zkoušky bentonitu BCV za zvýšené teploty byla stanovena hodnota swell indexu neovlivněného BCV (Najser 2021).
- V rámci projektu BioBen byly určeny hodnoty swell indexu z různě starých suspenzí bentonitu BCV ve sterilní deionizované vodě kultivovaných v TUL anaerobním boxu obsahující vodík. SI byl odečten po 24 hod a po 18 dnech (Černá et al. 2021). Při analýze těchto vzorků byla použita vyšší navážka, než v případě všech ostatních vzorků a objem vybobtnalé suspenze bylo nutné přepočítat na normou doporučenou navážku 2 g. Takto získané swell indexy nelze porovnávat s hodnotami tohoto parametru získaného za použití normou doporučené navážky

Na bentonitu BCV_NS bylo provedeno 12 analýz swell indexu (Vašíček et al. 2019, Kašpar et al. 2021, Laufek et al. 2021, Černá et al. 2021). Odečet byl prováděn po různých dobách po vsypání bentonitu. Z těchto 12 měření u 4 není uvedena doba odečtu po vsypání. Tato informace je uvedena v grafu na obrázku Obr. 53 v popisku typu bentonitu s upřesněním „_neznámá doba“. V opačném případě je u každého typu bentonitu uvedena doba odečtu od vsypání bentonitu jako poslední časový údaj u názvu za podtržítkem.. Pro neovlivněný a neupravovaný bentonit BCV byly stanoveny pouze 3 hodnoty SI po 24 hod a po jedné hodnotě po 48 hod a po 10 dnech. Na ovlivněném bentonitu byla provedena vždy jen jedna analýza pro každý jednotlivý druh zatížení.



Obr. 53 Swell index bentonitu BCV_NS, homoionních forem bentonitu BCV, zatíženého teplotou 200 a 150 °C o r různých dobách vystavení teplotě. Různě stará bentonitová suspenze bez zatížení teplotou (fresh, 3t – 3 týdny, 3m – 3 měsíce, 1 rok) dvě doby odečtu : po 24 hod a po 18 dnech.

V grafu je vyhodnocení swell indexu bentonitu BCV_NS a jeho modifikovaných forem (homoionní jíly – Na-BCV, Na/Ca BCV, Ca-BCV) každá modifikovaná forma byla odečtena po 24hod a po 48 hod. BCV_NS byl odečten po 24 hodinách a po 48 hodinách. Swell index se vyvíjí v čase a

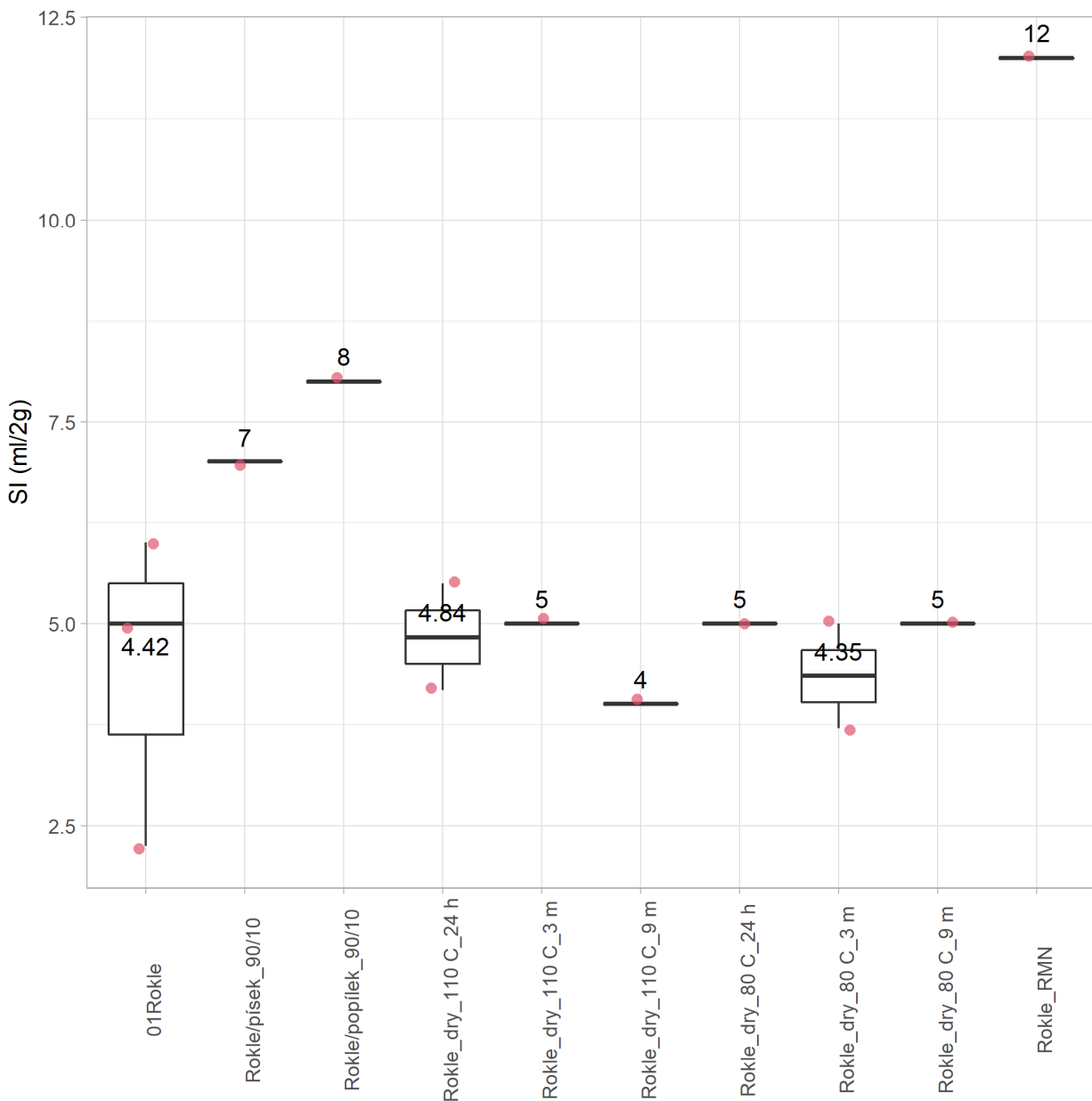
z tohoto důvodu je nutné tento parametr rozlišit dle doby odečtu. Různé doby odečtu jsou zaznamenány i u bentonitu BCV zatěžovaného v suchém stavu teplotou 200 °C po dobu 15 a 27 měsíců (BCV_dry_200 C_15 m a BCV_dry_150 C_12 m). Bentonit zatěžovaný teplotou 150°C v suchém stavu po dobu 6 a 12 měsíců (BCV_dry_150 C_6 m a BCV_dry_150 C_12 m) byl odečten po 24 hodinách. Do vyhodnocení je zařazen swell index stanovený na různě starých suspenzích odečtený po 24 hodinách a po 18 dnech (BCV_BS_fresh – čerstvá suspenze, BCV_BS_3t – 3 týdny stará suspenze, BCV_BS_3m – 3 měsíce stará suspenze, BCV_BS_1rok – 1 rok stará suspenze). V případě různě starých suspenzí je znatelný sestupný trend, kdy swell index klesá se stářím suspenze. Hodnoty swell indexu různě starých suspenzí nelze porovnávat s ostatními hodnotami swell indexu uvedenými v grafu, jelikož při jeho stanovení byla použita významně odlišná navážka (4 g). Přepočtení objemu vybobtnalého bentonitu při použití významně odlišné navážky na objem vybobtnalého bentonitu při použití standardní navážky 2g není spolehlivý. Z grafu je patrný pokles swell indexu bentonitu BCV po tepelném zatížení v suchém stavu.

2.5.2 SI – Rokle

Data pro analýzu swell indexu bentonitu Rokle pochází ze tří zdrojů:

- V projektu *Ověřování nahraditelnosti bentonitů montmorillonitickými jíly* (Pacovský et al. 2004a, 2004b) byl bentonit Rokle krátkodobě (24 h) a dlouhodobě (3, 6 a 9 měsíců) zatěžován zvýšenou teplotou (80 °C a 110 °C) v suchém stavu.
- V projektu zaměřeném na fyzikální modelování (Pacovský et al. 2007a, 2007b) bylo zkoumáno chování čistého bentonitu Rokle ve variantě RMN, bentonitu Rokle RMN s příměsí 10 % písku a s příměsí 10 % popílku. Směs nebyla žádným způsobem zatěžována.
- V rámci výzkumu alternativních materiálů pro buffer byla pro SKB testována Rokle v neovlivněném stavu (Svensson et al. 2011).

Hodnoty swell indexu neovlivněného bentonitu také pochází z výše uvedených zdrojů.



Obr. 54 Swell index bentonitu Rokle (neovlivněný) a Rokle_OS po krátkodobém (24 h) a dlouhodobém (3, 6, 9 měsíců) vystavení zvýšené teplotě (80 °C a 110 °C) v suchém stavu a swell index neovlivněné Rokle ve variantě RMN smíchané v poměru 90/10 s pískem a 90/10 s popílkem a Rokle ve variantě RMN Rokle_RMN.

Z grafu na Obr. 54 je patrna heterogenita Rokle, která je charakterizována velkým rozptylem swell indexu neovlivněné Rokle. Tato heterogenita je způsobena původem bentonitu. Jedná se o kopaný a nehomogenizovaný bentonit. Rokle_RMN je Rokle mletá neaktivovaná, jedná se již o homogenizovaný bentonit. Na swell indexu je patrný efekt homogenizace, kdy je jeho hodnota 4x vyšší než swell index Rokle kopané. Efekt tepelného zatížení na swell index kopaného bentonitu Rokle není z dat patrný.

2.5.3 SI – BaM

Na bentonitu BaM proběhla jen jedna sada měření swell indexu, a to na homoionních jílech (BaM-Na⁺, BaM-K⁺, BaM-Mg²⁺, BaM-Ca²⁺). Ve zdroji jsou výsledky prezentovány jen v grafické podobě a nejsou uvedeny hodnoty (Červinka et al. 2016). Pro BaM není dostupná ani jedna hodnota swell indexu.

2.5.4 SI – B75

Na B75 byly provedeny analýzy pouze na nezátíženém bentonitu. Jedna hodnota pochází z projektu FR-TI1/362 (Vašíček et al. 2013). Naměřený swell index je roven 22 ml/2 g po 24 hodinách.

Další hodnota měřená na neovlivněném bentonitu B75 pochází z projektu Mock-up-Josef a je uvedena v (Šťástka et al. 2018). Naměřená hodnota v rámci tohoto projektu je 22,13 ml/2 g po 24 hodinách.

Průměrná hodnota stanovená z těchto dvou měření je uvedena v Tab. 6.

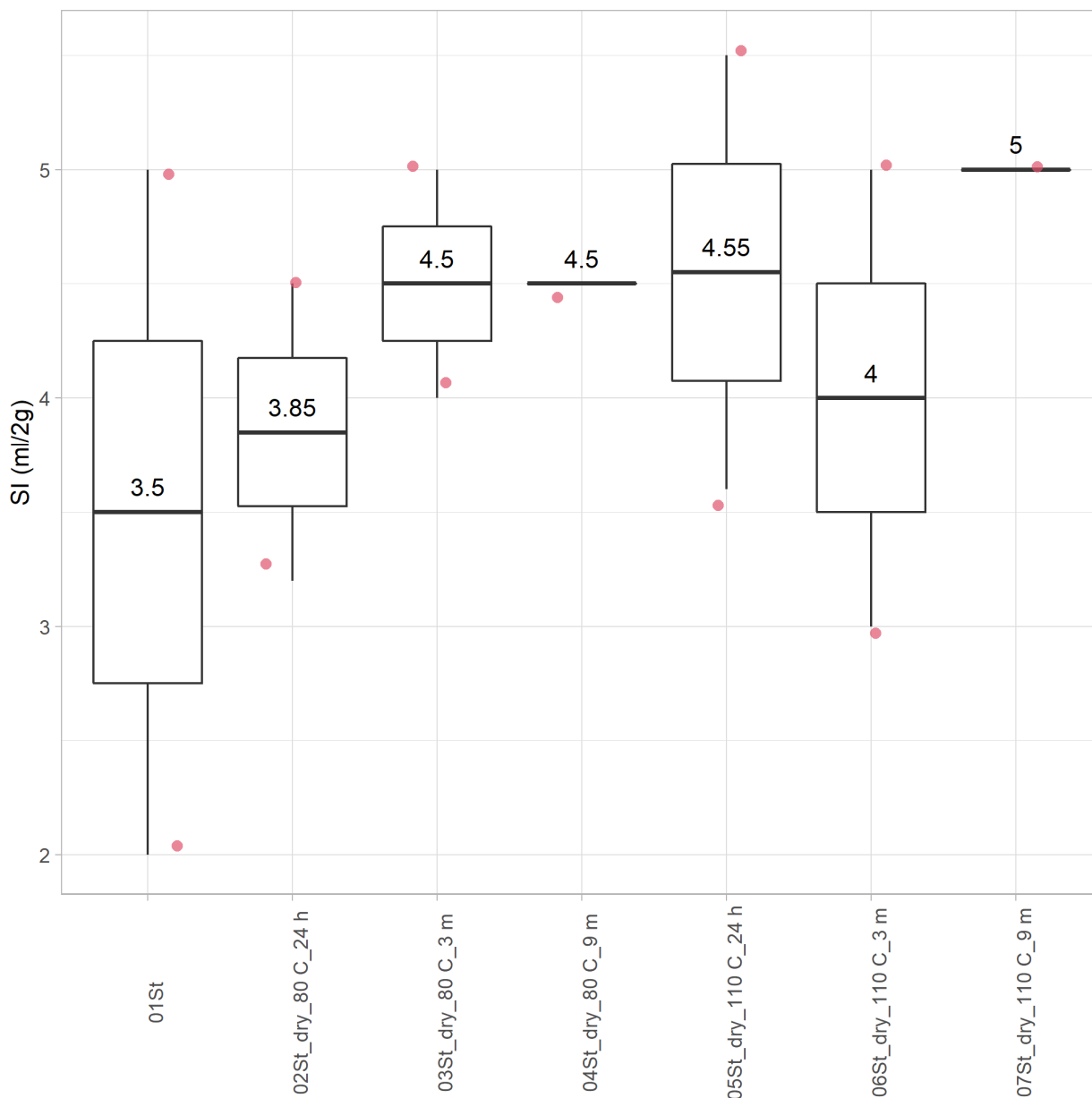
Tab. 6 Swell index B75.

	AVG SI_24 h, ml/2 g
B75_NS	22

2.5.5 SI – Stránce

Data pro analýzu swell indexu bentonitu Stránce pochází z jednoho zdroje:

- V projektu Ověřování nahraditelnosti bentonitů montmorillonitickými jíly (Pacovský et al. 2004a, 2004b) byl bentonit Stránce krátkodobě (24 h) a dlouhodobě (3, 6 a 9 měsíců) zatěžován zvýšenou teplotou (80 °C a 110 °C) v suchém s tavu. V tomto projektu byla také stanovena hodnota SI neovlivněného bentonitu Stránce.



Obr. 55 Swell index bentonitu Stránce (neovlivněný) a Stránce_OS po krátkodobém (24 h) a dlouhodobém (3, 6, 9 měsíců) vystavení zvýšené teplotě (80 °C a 110 °C) v suchém stavu.

Z grafu je patrná heterogenita bentonitu Stránce, která je dána jeho původem. Jedná se o kopaný a nehomogenizovaný bentonit. Rozptyly swell indexu neovlivněného i ovlivněného bentonitu jsou značné a vyhodnocení vlivu tepelného zatížení na swell index bentonitu Stránce není možný. V případě bentonitu Stránce má větší vliv na swell index heterogenita bentonitu, než tepelné zatížení.

2.5.6 SI - Zelený jíl

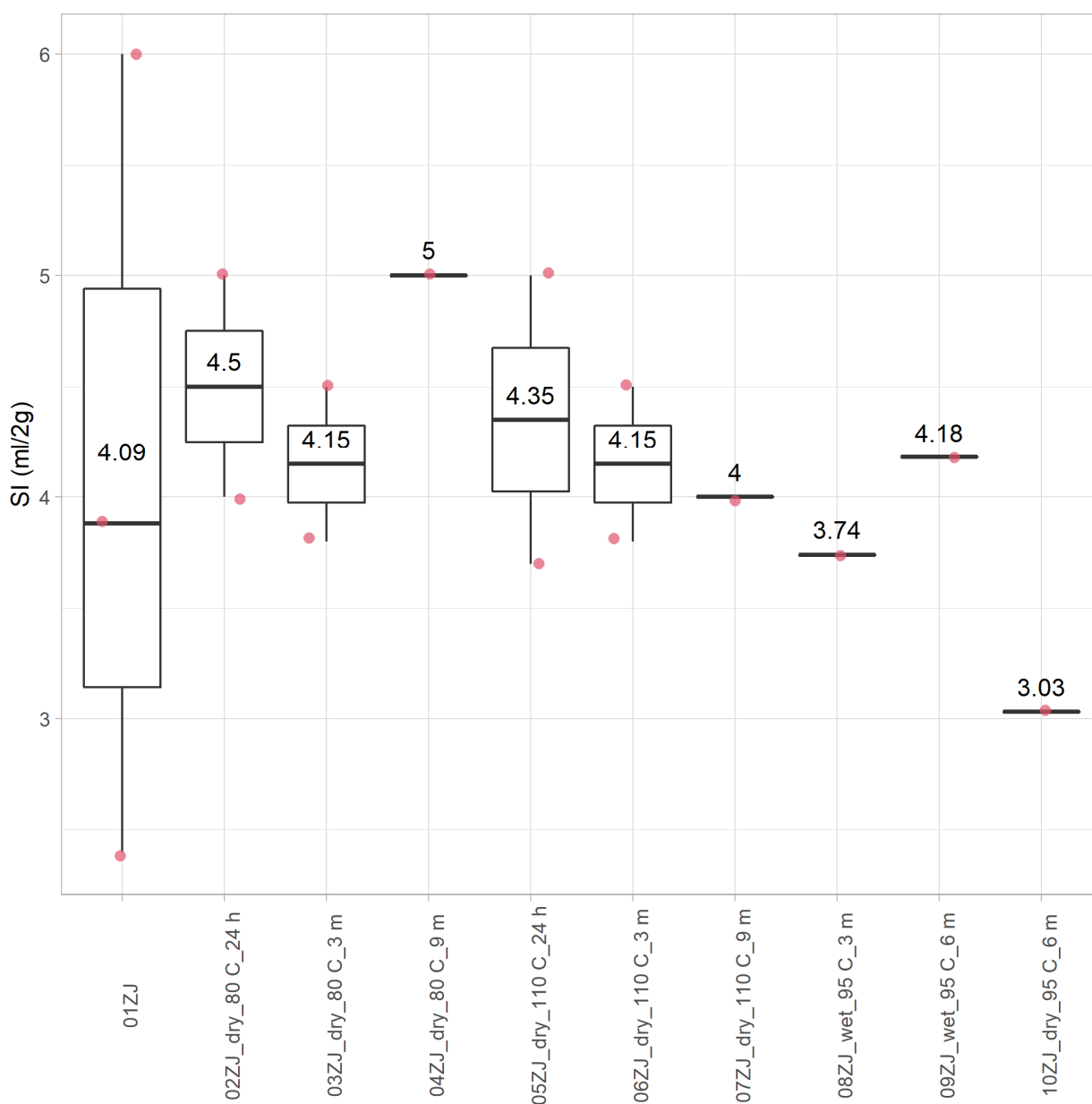
Data pro analýzu swell indexu bentonitu Rokle pochází ze dvou zdrojů.

- V projektu Ověřování nahraditelnosti bentonitů montmorillonitickými jíly (Pacovský et al. 2004a, 2004b) byl bentonit Rokle krátkodobě (24 h) a dlouhodobě (3, 6 a 9 měsíců)

zatěžován zvýšenou teplotou (80 °C a 110 °C) v suchém s tavu. V tomto projektu byla také stanovena hodnota SI neovlivněného bentonitu Zelený jíł (značen jako ZJ).

- V projektu zaměřeném na geotechnický výzkum přírodních zelených jíłů byl bentonit tepelně zatěžován teplotou 95 °C v suchém a vlhkém stavu. Tepel ně zatěžovaný bentonit ve vlhkém stavu byl vystaven podzemní vodě „Josef“, odebrané z vrtů podzemní laboratoře Josef. Bentonitová suspenze byla zalita vodou a poté vystavena zvýšené teplotě 95 °C. Odb ěry vzorků probíhaly v časových intervalech 3 a 6 měsíců (Pacovský et al. 2011).

V rámci těchto dvou projektů byl stanoven SI také pro neovlivněný Zelený jíł.



Obr. 56 Swell index bentonitu Zelený jíł (neovlivněný) a Zelený jíł_OS po krátkodobém (24 h) a dlouhodobém (3, 6, 9 měsíců) vystavení zvýšené teplotě (80 °C a 110 °C) v suchém stavu a swell index bentonitu dlouhodobě (3 a 6 měsíců) vystaveného teplotě 95 °C v suchém a vlhkém stavu.

2.5.7 Metodické a statistické zhodnocení

Při vyhodnocení swell indexu je nutné vzít v potaz, že se bobtnací schopnost bentonitu vyvíjí v čase. Při vyhodnocování výsledků z jednotlivých zkoušek bylo nutné kromě parametrů ovlivnění zohlednit také dobu odečtu swell indexu.

Prakticky u všech neovlivněných bentonitů s výjimkou BCV je pozorován velký rozptyl hodnot. Na ovlivněném bentonitu je zpravidla měřena jen jedna hodnota, rozptyl a spolehlivost tedy nelze určit. Velký rozptyl u neovlivněného bentonitu má za následek velký interval spolehlivosti, který zahrne prakticky všechny hodnoty měřené na ovlivněném bentonitu. Určit vliv zatížení poté není možné.

Swell index po zatížení bentonitu teplotou v suchém stavu, ať už krátkodobě (24 hod), nebo dlouhodobě (>3 měsíce) byl měřen na bentonitu BCV, Rokle, Zelený jííl a Stránce. Swell index po zatížení teplotou ve vlhkém stavu nebyl dosud stanoven na žádném bentonitu. Na B75 byly stanoveny pouze dvě hodnoty pro neovlivněný stav a pro BaM nebyla stanovena žádná hodnota swell indexu.

Data měřená na neovlivněném BCV jsou konzistentní a vykazují malý rozptyl (Příloha 8). Efekt tepelného zatížení v podobě nižšího swell indexu je možný pozorovat u všech vzorků BCV po tepelném zatížení bez ohledu na teplotu, kterou byl bentonit zatížen.

Vliv tepelného zatěžování na swell index bentonitu Rokle, Stránce a Zelený jííl nelze hodnotit z důvodu velkého rozptylu dat měřených na neovlivněném bentonitu a malého množství měřených dat (zpravidla 2 hodnoty pro každý typ ovlivnění). Velký rozptyl dat měřených na ovlivněném i neovlivněném bentonitu je způsoben heterogenitou bentonitu, jelikož se jedná o kopaný a nehomogenizovaný bentonit.

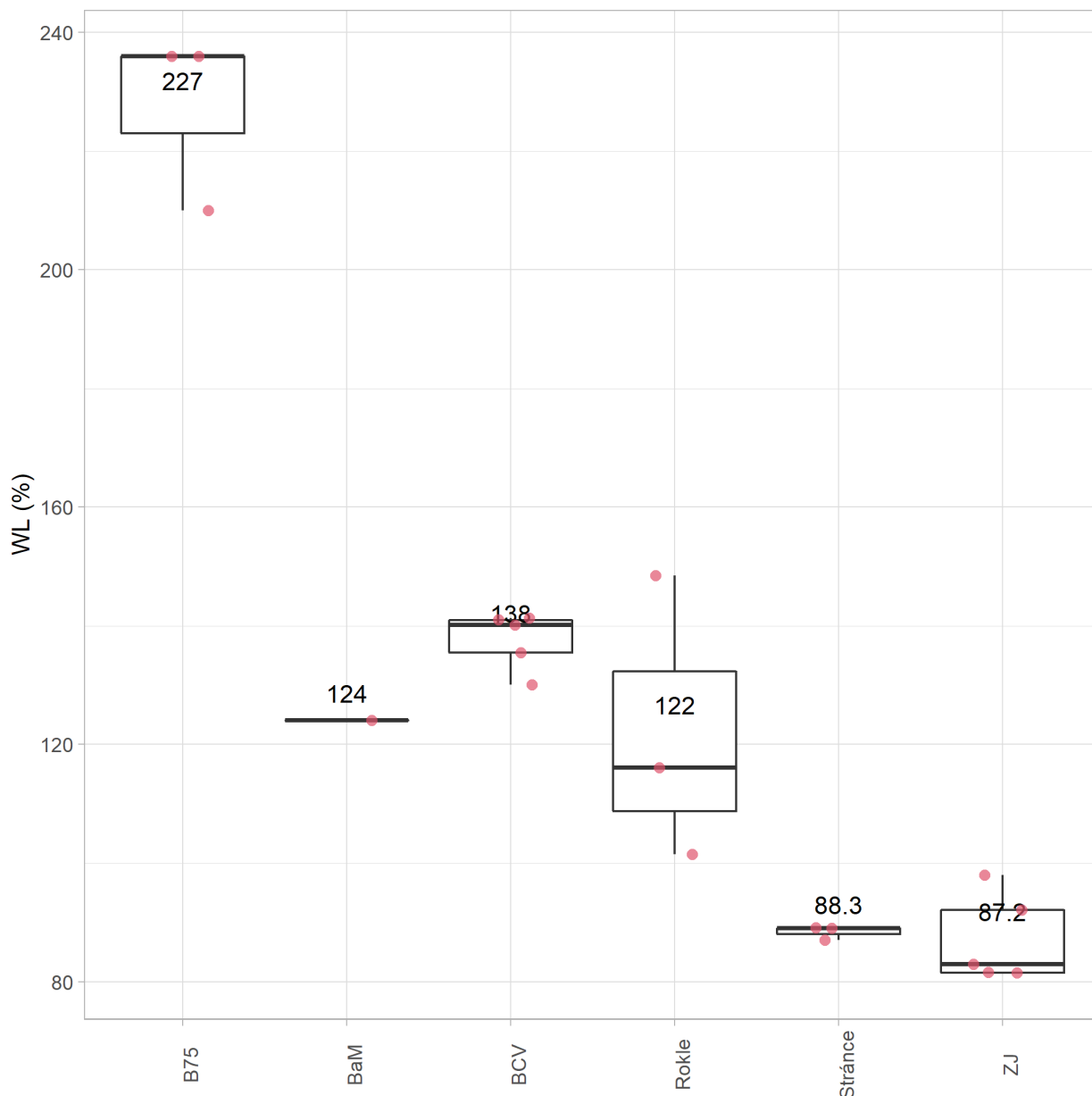
Jediný použitelný soubor dat měřený na neovlivněném bentonitu, který je vhodný pro hodnocení vlivu na SI byl měřen na BCV. Naopak na ovlivněném bentonitu je vždy měřena pouze jedna hodnota SI. Swell index bentonitu BCV se vlivem tepelného zatížení snížil.

2.6 Mez tekutosti (WL)

Mez tekutosti slouží jako indikátor změn v geotechnických vlastnostech bentonitu vlivem zatížení, nebo umělé úpravy vlastností bentonitu. Mez tekutosti je dána vlhkostí, při které bentonit přechází z plastického stavu do tekutého a ztrácí smykovou pevnost. Tento parametr vyjadřuje schopnost bentonitu přijímat vodu a současně si udržet plasticitu. Vlivem tepelného zatížení může být tato schopnost změněna ať už v pozitivním či negativním smyslu. Dosud nebylo prokázáno, zda se jedná o změny trvalé, či vratné a závislé na době máčení. Dle normy pro zeminy je zkouška prováděna po 24 hodinách máčení, bentonit je však zkoušen i po jiných dobách máčení. Dle tohoto kritéria byl také bentonit rozdělen do kategorií pro hodnocení, jelikož hodnoty po jednotlivých dobách máčení se mohou lišit.

Pro neovlivněný bentonit bylo analyzováno vždy po 2-5 vzorcích, nejvíce hodnot dostupných pro NS je pro BCV a to 5 měření, na bentonitu Rokle_NS byly provedeny 4 analýzy, v ostatních případech bylo měřeno do třech vzorků. Na ovlivněném bentonitu bylo měřeno vždy po jednom vzorku.

V grafu na Obr. 57 je přehled měřených WL na všech předmětných bentonitech v neovlivněném stavu. V následujících kapitolách je porovnáván každý typ bentonitu zvlášť v neovlivněném a ovlivněném stavu. Ovlivněný bentonit je rozdělený do skupin dle teploty zatížení, doby zatěžování, vlhkostní formy, ve které byl zatěžován, zrnitosti bentonitu, dle umělé úpravy bentonitu, doby máčení před zkouškou a podle metody provedení zkoušky (kuželová, nebo Cassagrandeho metoda).



Obr. 57 Mez tekutosti měřena na všech předmětných bentonitech v neovlivněném stavu.

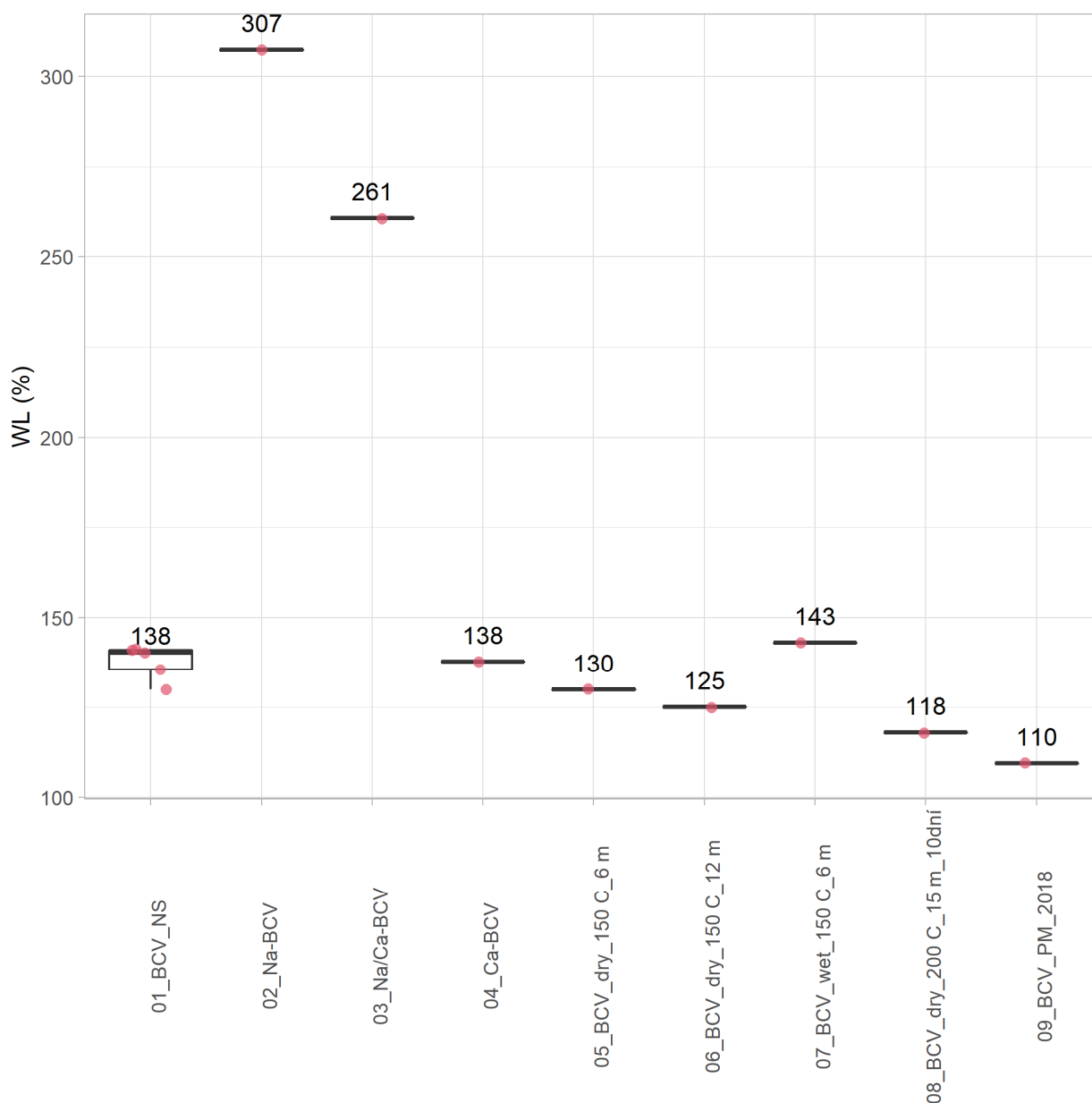
V grafu na Obr. 57 je vyobrazen mez tekutosti bentonitu v neovlivněném stavu. Z grafu je patrný vliv natrifikace bentonitu B75, jehož mez tekutosti významně převyšuje hodnoty všech ostatních bentonitů. Za velkým rozptylem u bentonitu Rokle stojí její původ, jelikož se jedná o kopaný nehomogenizovaný bentonit. Stejným procesem byly získány i bentonity Stránce a Zelený jííl, ty však v rámci tohoto parametru významných rozptylů nenabývají, ale patří k těm s nejnižší mezí

tekutosti. Nejvíce vzorků bylo analyzováno pro bentonit BCV a data měřena na tomto bentonitu jsou konzistentní.

2.6.1 WL – BCV

Data pro vyhodnocení meze tekutosti (WL) bentonitu BCV pochází ze šesti zdrojů.

- V rámci projektu zaměřeném na kompletní charakterizaci bentonitu BCV 2017 byla určena jedna mez BCV_NS (Červinka et al. 2018).
- Projekt Geotechnická charakterizace homoionních forem bentonitu BCV 2017 byl zaměřen na charakterizaci různých forem BCV bentonitu (Na – BCV, Ca-BCV, Na/Ca-BCV). Bentonit nebyl tepelně ovlivněn. Byla určena vždy jedna mez tekutosti pro každou formu (Vašíček et al. 2019).
- V rámci projektu EURAD HITEC jsou určovány hydraulické a geotechnické charakteristiky bentonitu BCV po 6, 12 a 24 měsících tepelného zatížení teplotou 150 °C. Bentonit je zatěžován ve vlhkém stavu, kdy je zalit destilovanou vodou a v suchém stavu. Z tohoto projektu pochází data pro vyhodnocení BCV_NS a po jedné hodnotě meze tekutosti po 6 a 12 měsících zahřívání v suchém stavu a po 6 měsících zahřívání ve vlhkém stavu (Černochová et al. 2021).
- V článku (Laufek et al. 2021) je uvedena hodnota meze tekutosti pro BCV_NS a pro bentonit BCV zatěžovaný 15 měsíců teplotou 200 °C v suchém stavu.
- V projektu zaměřeném na laboratorní zkoušky bentonitu BCV za zvýšené teploty byla stanovena hodnota meze tekutosti neovlivněného BCV (Najser et al. 2021).
- Mez tekutosti BCV_NS a peletizovaného BCV byla určena také v rámci projektu Interakční experiment (Svoboda et al. 2019b).



Obr. 58 Mez tekutosti bentonitu BCV_NS včetně forem Na-BCV, Ca-BCV, Na/Ca-BCV a bentonitu ovlivněného teplotou 150 °C v suchém stavu po 6 a 12 měsících a ve vlhkém stavu po 6 měsících a bentonitu ovlivněného teplotou 200 °C v suchém stavu po 15 měsících a mez tekutosti peletizovaného bentonitu BCV.

Na grafu Obr. 58 jsou zobrazeny meze tekutosti bentonitu BCV_NS a jeho homoionní formy (Na-BCV, Na/Ca-BCV, Ca-BCV) a meze tekutosti bentonitu BCV po tepelném zatížení v suchém stavu teplotou 150 °C po dobu 6 měsíců, respektive 12 měsíců (BCV_dry_150 C_6m, BCV_dry_150 C_12m) a mez tekutosti bentonitu BCV po zatížení teplotou 150°C ve vlhkém stavu po dobu 6 měsíců (BCV_wet_150 C_6m). Další hodnota byla měřena pro bentonit BCV zatěžovaný teplotou 200°C po dobu 15 měsíců v suchém stavu (BCV_dry_200 C_15m_10dnhí). Pro tento bentonit je dostupná pouze hodnota meze tekutosti stanovena po 10 dnech máčení. S dobou máčení se zvyšuje mez tekutosti, z tohoto důvodu je nutné toto hledisko zahrnout do klasifikace bentonitů. Pro každý ovlivněný stav je dostupná pouze jedna hodnota. V grafu na Obr. 58 je patrný mírný pokles meze tekutosti u bentonitu zatěžovaného teplotou 200 °C v suchém

stavu. Avšak není možné posoudit významnost teploty zatížení na pokles meze tekutosti na základě jedné hodnoty.

Mez tekutosti peletizovaného bentonitu BCV_PM_2018 je nižší, než BCV_NS. V případě této formy nedojde patrně vlivem peletizace k dokonalému zvlhčení a homogenizaci materiálu.

2.6.2 WL – BaM

Pro bentonit BaM byla stanovena jedna hodnota meze tekutosti. Tato hodnota byla stanovena pro BaM_NS kuželovou metodou (Vašíček 2017) po jednom dni máčení. Výsledná hodnota je 124 %.

2.6.3 WL – Rokle

Data pro OS Rokle pocházejí z laboratorních a in-situ experimentů. Data pochází ze dvou zdrojů, jedním je projekt Ověřování nahraditelnosti bentonitu montmorillonitickými jíly (Pacovský et al. 2003) a Experimentální výzkum materiálu na bázi bentonitu při dlouhodobém působení teploty a saturačního media s extrémními účinky (Pacovský et al. 2010a).

V projektu zaměřeném na ověřování nahraditelnosti (Pacovský et al. 2003) byl bentonit Rokle vystavován krátkodobě (24 h) a dlouhodobě (3 a 6 měsíců) zvýšené teplotě (80 °C a 110 °C) a poté byl testován při laboratorní teplotě.

V projektu zaměřeném na saturační media (Pacovský et al. 2010a) byl bentonit v obou případech vystavován kombinovaným zatížením teplem a dvěma typům saturačního media. Přirozené podzemní vodě „Josef“ a syntetické „SGW-K“. Testovány byly dva typy bentonitů založené na bentonitu Rokle.

- Čistá Rokle.
- Substrát Mock-Up-CZ (směs bentonitu Rokle - RMN, křemenného písku a grafitu) po zatížení teplotou 60-70 °C po dobu 4 let.

Laboratorní experimenty

Vzorky bentonitů byly umístěny v tlakových nádobách a zality saturačním médiem (vodou „Josef“ či „SGW-K“). Procedura spočívala v zahřívání (zatěžování) tlakových nádob teplotou 95 °C po dobu 13 dnů a následném vystavení nádob běžné laboratorní teplotě (1 den). Odběry byly poté provedeny po 3, 6, 12 a 18 měsících (Pacovský et al. 2010a).

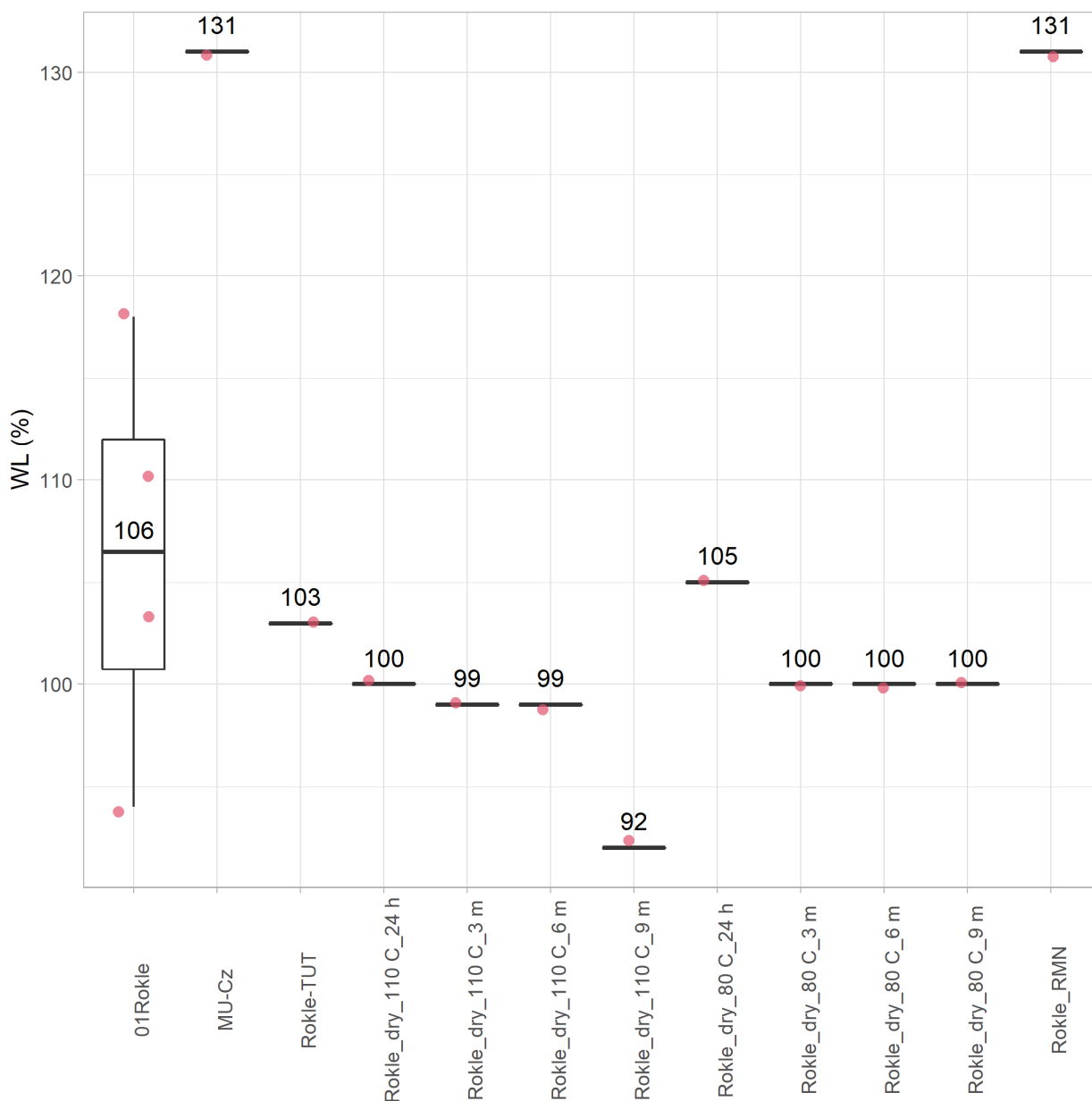
In-situ experimenty

Do vrtu v podzemí v blízkosti tepelného zdroje byly umístěny perforované patrony s bentonitovou náplní (Rokle, Mock-Up CZ). Bentonit byl vystavován přirozeném podzemnímu prostředí. Saturačním médiem byla přirozená voda „Josef“. Náplň patron byla zatěžována teplotou do 100°C. Odběry byly poté provedeny po 3, 6, 12 a 18 měsících (Pacovský et al. 2010a).

Meze tekutosti z jednotlivých patron z in situ experimentu po stejné době zatížení teplotou se téměř neliší, a proto byly sloučeny a vyhodnocovány společně. Týká se to bentonitu Rokle, kde byly společně vyhodnocovány hodnoty meze tekutosti z patron 2 a 4 a MU-Cz_4y, kde byly společně vyhodnocovány meze tekutosti z patron 3 a 5. V databázi je bentonit pocházející z jednotlivých patron rozlišován pomocí označení „KB#“. Ve statistickém vyhodnocení je v názvu

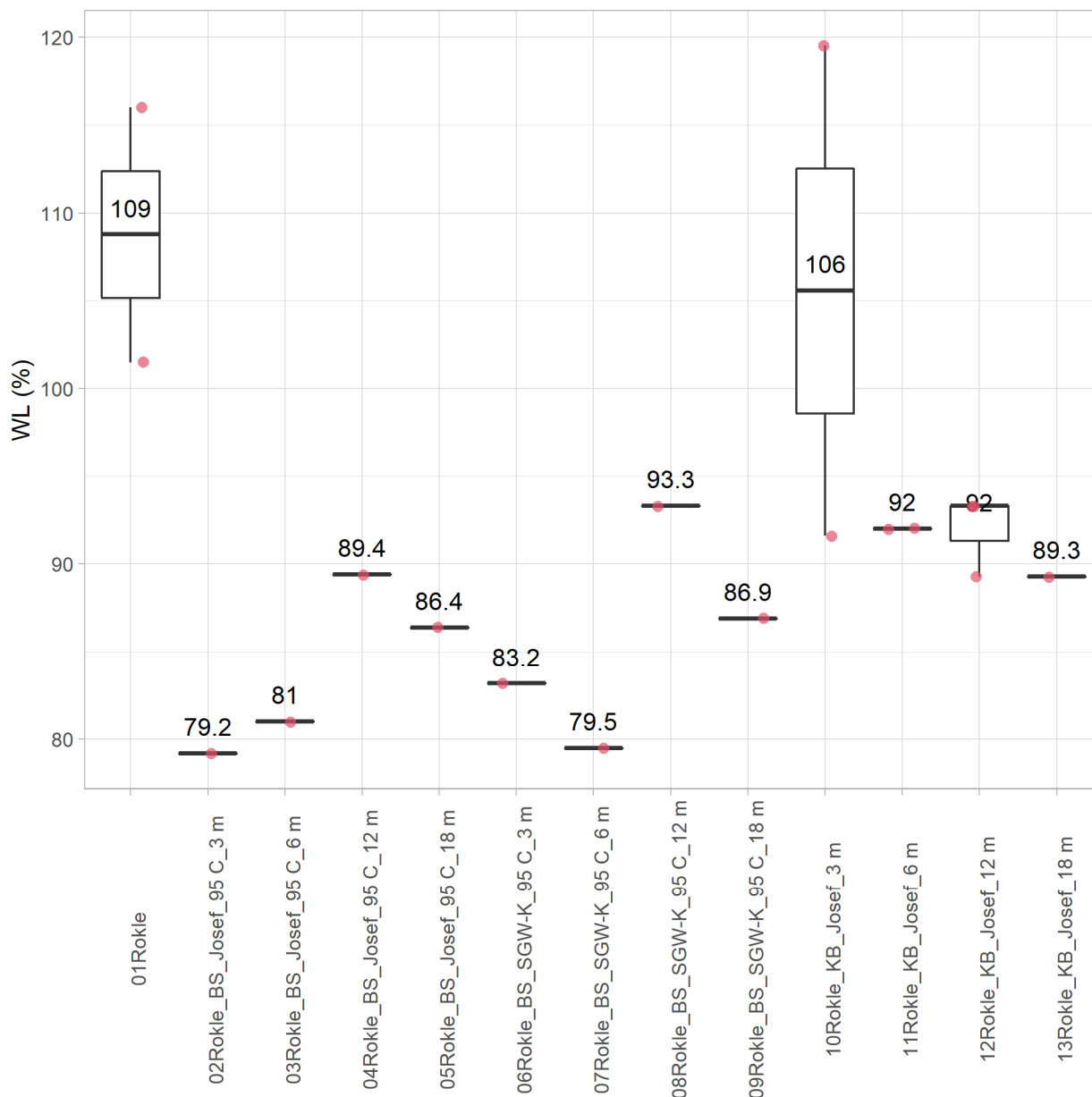
bentonitu číselné označení vynecháno, z důvodu společného vyhodnocování hodnot z jednotlivých patron. Mez tekutosti byla v projektu ověřování (Pacovský et al. 2010a) a v projektu zaměřeném na fyzikální modelování (Pacovský et al. 2007a, 2007b) určována kuželovou metodou, což je odlišné od (Pacovský et al. 2003), kde byla mez tekutosti určována Cassagrandeho metodou. Meze tekutosti byly vyhodnocovány pro každou metodu samostatně.

Samostatně je také vyhodnocována mez tekutosti jednotlivých bentonitů. Do grafu Obr. 59, který se vztahuje k čisté Rokli je pro porovnání vloženo vyhodnocení meze tekutosti materiálu Mock-Up CZ a do grafu Obr. 61, který se vztahuje k vyhodnocení meze tekutosti Mock-Up CZ je pro porovnání vloženo vyhodnocení čisté Rokle.



Obr. 59 Mez tekutosti bentonitu Rokle určená Cassagrandeho metodou. Bentonit MU-Cz je materiál Mock-Up CZ. Mez tekutosti Rokle (neovlivněný) určena CZ laboratořemi a laboratoří TUT a Rokle_OS po krátkodobém (24 h) a dlouhodobém (3, 6, 9 měsíců) vystavení zvýšené teplotě (80 °C a 110 °C) v suchém stavu.

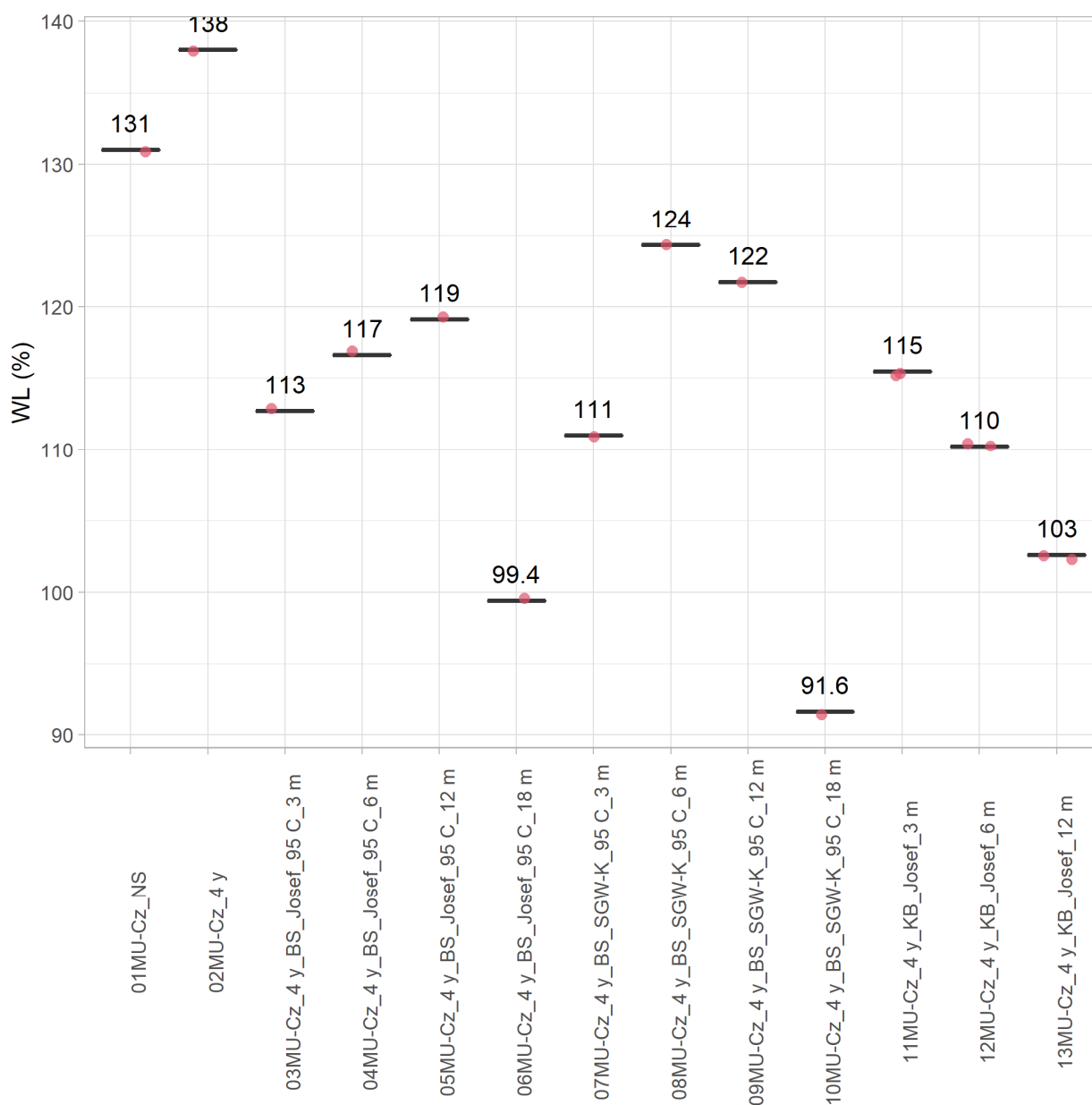
Na grafu Obr. 59 je vyobrazena mez tekutosti měřena pomocí Cassagrandeho misky. Tato metoda není dostatečně přesná a není možné porovnávat výsledky získané pomocí této metody s mezí tekutosti získané kuželovou metodou. Výsledky získané touto metodou nebudou v dalším vyhodnocení uvažovány.



Obr. 60 Mez tekutosti bentonitu Rokle určená kuželovou metodou.

V grafu na Obr. 60 je mez tekutosti bentonitu Rokle měřena kuželovou metodou. Pro neovlivněný stav byly měřeny pouze dvě hodnoty. Na ovlivněném stavu byla stanovena vždy jen jedna hodnota meze tekutosti. Ovlivněný stav spočíval v tepelném zatěžování bentonitu ve formě suspenze teplotou 95 °C. V suspenzi byla použita voda da Josef, nebo VŠCHT voda (označována jako SGW-K). Bentonitová suspenze byla zatěžována 3, 6, 12 a 18 měsíců. Bentonit z in-situ experimentu je označován jako Rokle_KB_Josef. Vzorky z in situ experimentu byly vyhodnocovány po 3, 6, 12 a 18 měsících po umístění. Mez tekutosti bentonitu Rokle pocházejícího z in situ experimentu je mírně vyšší než mez tekutosti bentonitu Rokle po tepelném

zatížení. Mez tekutosti bentonitu Rokle po tepelném zatížení je nižší než v případě neovlivněného bentonitu. Trend vývoje meze tekutosti s dobou zatěžování není z dostupných dat patrný.



Obr. 61 Mez tekutosti bentonitu Mock-up Cz určená kuželovou metodou.

Na obrázku Obr. 61 je mez tekutosti směsi Mock-up Cz. Směs byla zatěžována teplotou 95 °C ve formě suspenze po dobu 3, 6, 12 a 18 měsíců. Z grafu je patrné, že vlivem zatížení teplotou došlo k poklesu meze tekutosti. Směs Mock-up Cz nebo dále vyhodnocována z důvodu, že se nejedná o čistý bentonit.

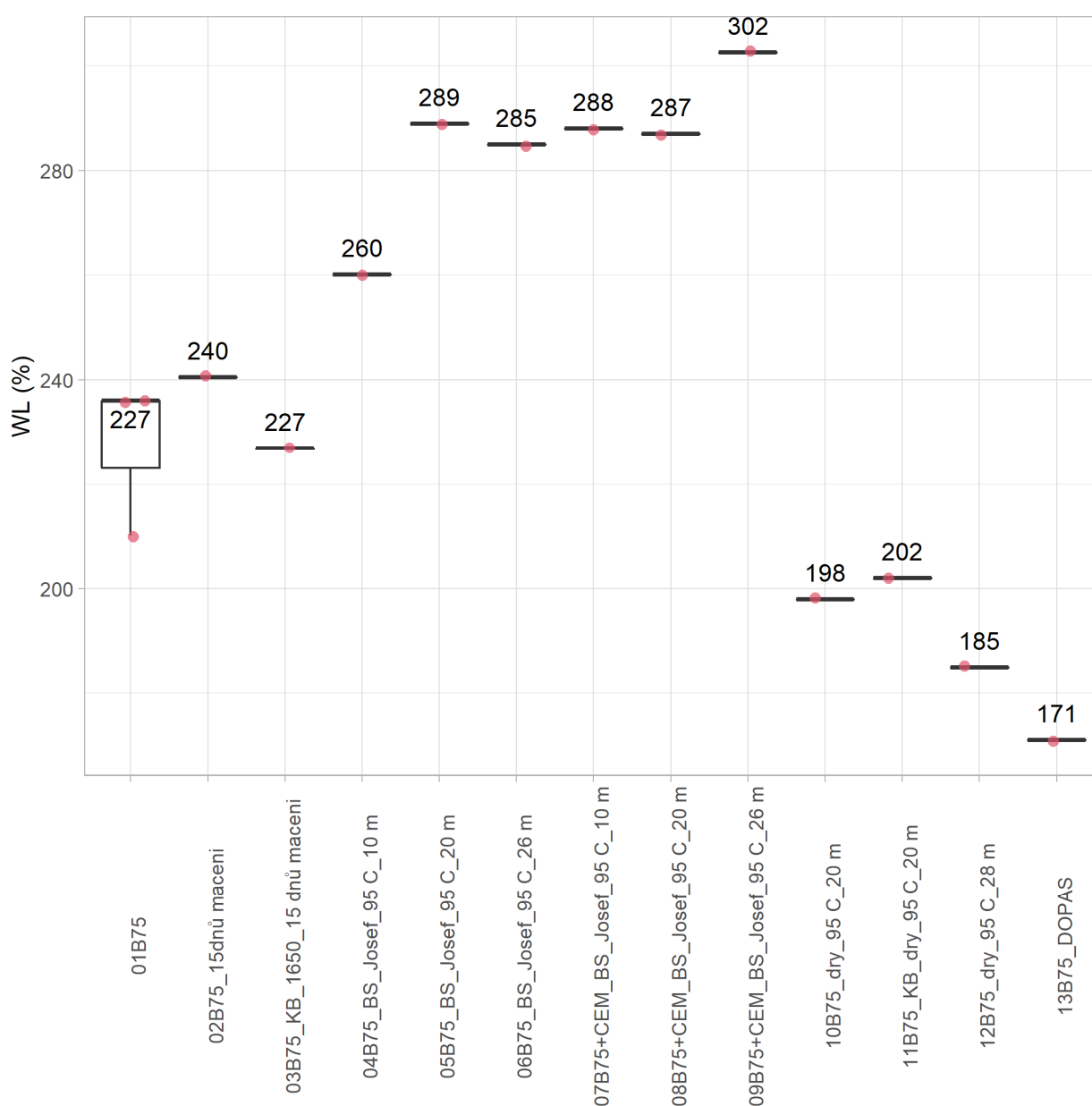
2.6.4 WL – B75

Data pro vyhodnocení meze tekutosti bentonitu B75 pochází ze šesti zdrojů:

- Data pro vyhodnocení meze tekutosti ovlivněného bentonitu B75 pochází zejména z projektu MPO-TIP a výsledky jsou uvedeny v technické zprávě k projektu (Vašíček et al.

2013). V tomto projektu byly předmětem výzkumu možné změny v chování bentonitu způsobené tepelným zatížením, typem saturačního media a vlivem interakce s cementovými materiály. Bentonit byl zatěžován teplem (95 °C) a sytícím mediem ve formě vody Josef odebrané z vrtu v podzemní laboratoři Josef. Zatěžování trvalo od 3 do 28 měsíců. Bentonit byl zatěžován v suchém a vlhkém stavu. Zatěžovány byly různé kombinace cementu a bentonitu a čistý bentonit v práškové podobě a ve formě vylisovaných prefabrikátů. Měřena byla také mez tekutosti neovlivněného bentonitu B75.

- Dalším zdrojem dat jsou další průběžné zpráva k projektu MPO TIP (Vašíček et al. 2010; Vašíček et al. 2011).
- Další hodnota pochází z projektu DOPAS a je uvedena v Vašíček et al. (2014).
- V rámci projektu Mock-Up-Josef byly měřeny dvě hodnota W_L (Šťástka et al. 2018; Šťástka et al. 2022).



Obr. 62 Mez tekutosti bentonitu B75.

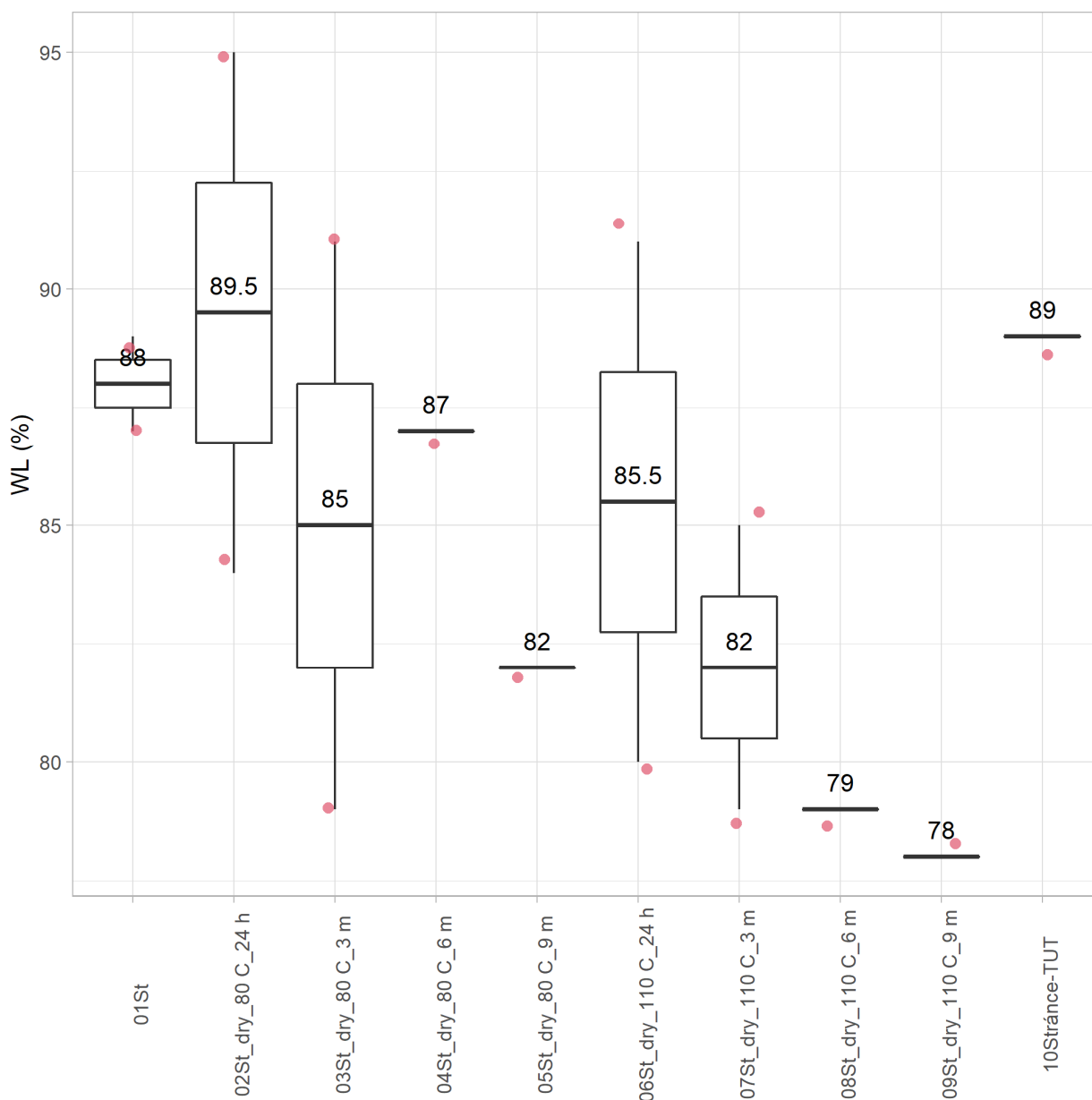
Bentonit B75 je uměle natrifikovaný bentonit, čemuž odpovídají hodnoty meze tekutosti, vyšší než v případě ostatních bentonitů. Bentonit B75, na rozdíl od bentonitu Rokle, vykazuje vyšší hodnoty meze tekutosti po tepelném zatížení ve vlhkém stavu (B75_BS_Josef_95 C_xxm), než bentonit v neovlivněném stavu. Bentonit tepelně zatěžovaný jako bentonitová suspenze s vloženou cementovou kostkou má přibližně stejnou mez tekutosti jako bentonit zatěžovaný jako suspenze bez cementové kostky. Bentonit odebraný z in situ experimentu má menší mez tekutosti než neovlivněný bentonit.

2.6.5 WL – Stránce

Data pro analýzu meze tekutosti ovlivněného bentonitu Stránce pochází z jednoho zdroje:

- V projektu Ověřování nahraditelnosti bentonitů montmorillonitickými jíly (Pacovský et al. 2004a, 2004b) byl bentonit Stránce krátkodobě (24 h) a dlouhodobě (3, 6 a 9 měsíců) zatěžován zvýšenou teplotou (80 °C a 110 °C) v suchém s tavu. V tomto projektu byla také stanovena hodnota WL neovlivněného bentonitu Stránce.

Mez tekutosti neovlivněného bentonitu Stránce byla určena laboratoří TUT pro instituci Posiva v rámci projektu zaměřeného na ověření nahraditelnosti bentonitů montmorillonitickými jíly (Carlson et al. 2006).



Obr. 63 Mez tekutosti bentonitu Stránce (neovlivněný) určený CZ laboratořemi a laboratoří TUT a Stránce_OS po krátkodobém (24h) a dlouhodobém (3, 6, 9 měsíců) vystavení zvýšené teplotě (80°C a 110°C) v suchém stavu.

Heterogenita bentonitu Stránce se projevuje na velkém rozptylu dat měřených na ovlivněném i neovlivněném bentonitu. Heterogenita je způsobena procesem získání a zpracování bentonitu Stránce. Jedná se o kopaný a nehomogenizovaný bentonit. Vliv tepelného zatížení nelze z důvodu heterogenity dat vyhodnotit.

2.6.6 WL – Zelený jíł

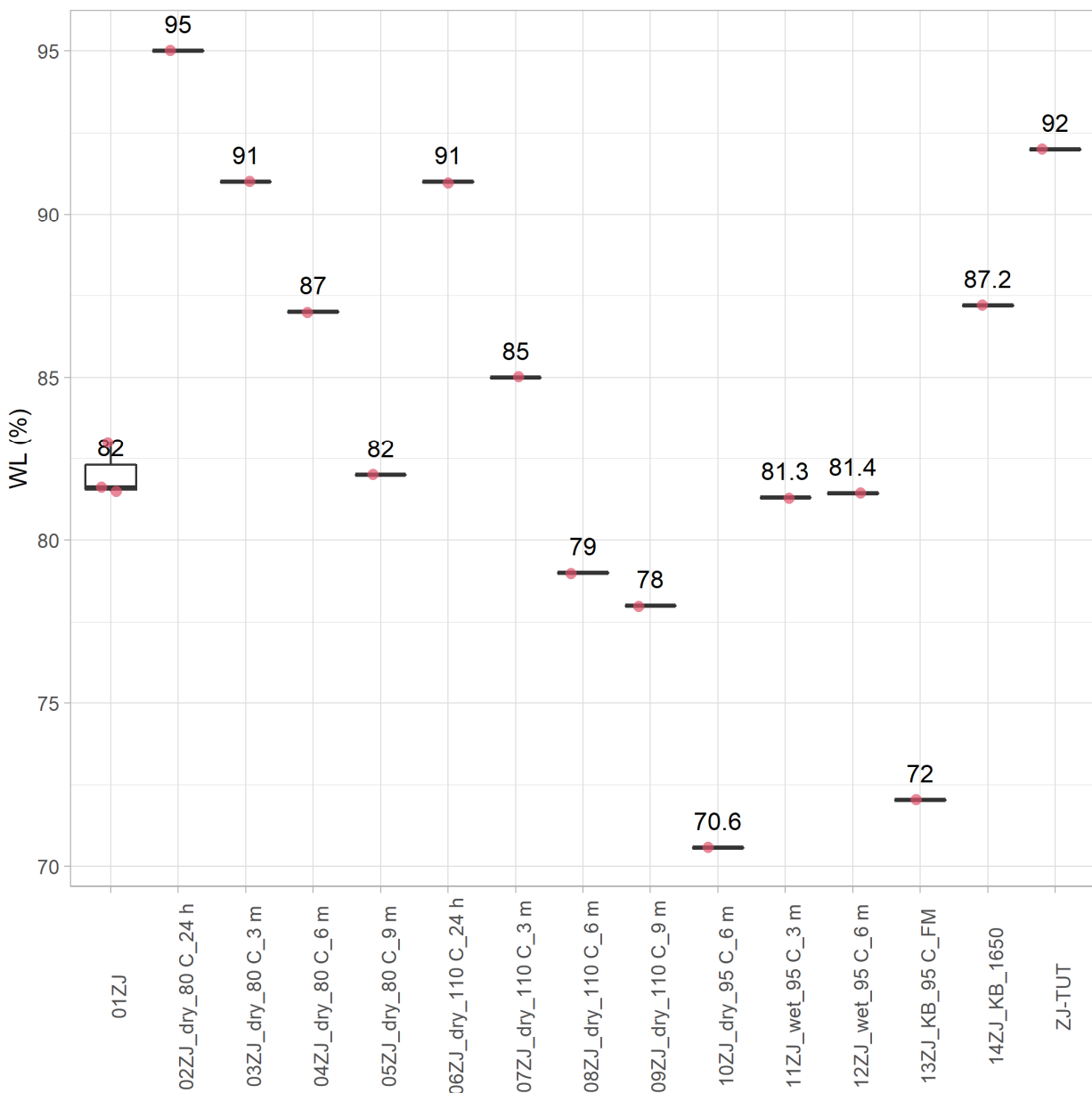
Data pro analýzu meze tekutosti ovlivněného bentonitu Zelený jíł pochází ze dvou zdrojů:

- V projektu Ověřování nahraditelnosti bentonitů montmorillonitickými jíly (Pacovský et al. 2004a, 2004b) byl bentonit Zelený jíł krátkodobě (24 h) a dlouhodobě (3, 6 a 9 měsíců)

zatěžován zvýšenou teplotou (80 °C a 110 °C) v suchém s tavu. V tomto projektu byla také stanovena hodnota WL neovlivněného bentonitu Zelený jííl (značen jako ZJ).

- V projektu zaměřeném na geotechnický výzkum přírodních zelených jíílů byl bentonit tepelně zatěžován teplotou 95 °C v suchém a vlhkém stavu. Tepelně zatěžovaný bentonit ve vlhkém stavu byl vystaven podzemní vodě „Josef“, odebrané z vrtů podzemní laboratoře Josef. Bentonitová suspenze byla zalita vodou a poté vystavena zvýšené teplotě 95 °C. Odběry vzorků probíhaly v časových intervalech 3 a 6 měsíců (Pacovský et al. 2011).

V rámci těchto dvou projektů byla stanovena mez tekutosti také pro neovlivněný Zelený jííl. Mez tekutosti neovlivněného bentonitu Zelený jííl byla také určena laboratoří TUT pro instituci Posiva v rámci projektu zaměřeného na ověření nahraditelnosti bentonitů montmorillonitickými jííly (Carlson et al. 2006).



Obr. 64 Mez tekutosti bentonitu Zelený jíł (neovlivněný) a Zelený jíł_OS po krátkodobém (24 h) a dlouhodobém (3, 6, 9 měsíců) vystavení zvýšené teplotě (80 °C a 110 °C) v suchém stavu a mez tekutosti bentonitu dlouhodobě (3 a 6 měsíců) vystaveného teplotě 95 °C v suchém a vlhkém stavu.

Mez tekutosti bentonitu zelený jíł je po tepelném zatížení v suchém stavu vyšší než v neovlivněném stavu, ale s dobou zatížení klesá, až po 9 měsících tepelného zatížení klesne na mez tekutosti neovlivněného bentonitu. Mez tekutosti bentonitu zatěžovaného teplotou 110 °C je v prvních třech měsících tepelného zatěžování vyšší než mez tekutosti bentonitu v neovlivněném stavu, ale s dobou zatížení pod tuto hodnotu klesne. Bentonit zelený jíł zatěžovaný ve vlhkém stavu jako suspenze má stejnou mez tekutosti jako bentonit v neovlivněném stavu. Nejnížší mez tekutosti vykazují bentonit zelený jíł po 6 měsících zatěžování teplotou 95 °C v suchém stavu.

2.6.7 Metodické a statistické zhodnocení

Za účelem měření meze tekutosti jsou využívány dvě metody. Jeden způsob měření je Cassagrandeho metoda, druhý způsob je měření meze tekutosti kuželem. Výsledky získané za využití těchto metod nelze mezi sebou vzájemně porovnávat, jelikož dávají rozdílné výsledky, zejména u vysoce plastických zemin (Vašíček et al. 2022). Cassagrandeho metoda byla použita pouze v případě části zkoušek na bentonitu Rokle. Porovnání meze tekutosti změřené na Rokle_NS jednotlivými metodami ukazuje na podhodnocení výsledků získaných měřením Cassagrandeho metodou.

Při statistickém vyhodnocení meze tekutosti je nutné rozlišovat přípravu vzorku před samotnou zkouškou. Laufek et al. (2021) poukazuje na zvyšující se mez tekutosti s dobou máčení. Zařazením dalšího parametru, kterým je doba máčení před zkouškou dochází k dalšímu prohlubování nehomogenity dat. Tento parametr je však cenný z důvodu sledování vývoje dosycování a měl by být systematicky sledován.

U bentonitu BCV, Rokle a B75 došlo k poklesu meze tekutosti vlivem tepelného zatížení bentonitu v suchém stavu, pro ostatní bentonity nelze mez tekutosti pro tento typ ovlivnění vyhodnotit. K poklesu mez tekutosti bentonitu zatěžovaného ve stavu suspenze došlo v případě bentonitu Rokle, naopak k nárůstům došlo u bentonitu B75. Mez tekutosti bentonitu BCV zůstává vlivem ovlivnění suspenze nezměněna. Pro ostatní bentonity nelze efekt tohoto ovlivnění z důvodu nedostatku dat vyhodnotit.

2.7 Mez plasticity

Mez plasticity bentonitu v neovlivněném stavu byla určena pro všechny bentonity kromě BaM. Pro bentonit v ovlivněném stavu byl tento parametr určen pro bentonit Rokle, Stránce, Zelený jíla a pro směr Mock-Up-Cz. Nejširší analýza byla provedena na bentonitu Rokle, kde bylo analyzováno dohromady 25 vzorků pro ovlivněný stav a 5 vzorků pro neovlivněný stav. Celkem bylo analyzováno 19 vzorků bentonitu a směsi v neovlivněném stavu a 62 vzorků v ovlivněném stavu. Mez plasticity patří mezi základní charakteristiky bentonitu. Neslouží jako indikátor změn bentonitu vlivem ovlivnění z důvodu nepřesnosti metody měření.

2.7.1 WP – BCV

Pro bentonit BaM byla stanovena jedna hodnota meze plasticity (WP). Tato hodnota byla stanovena pro BCV_NS. Ve zdroji (Najser et al. 2020) není uvedena doba máčení před zkouškou. Výsledná hodnota je 45 %.

2.7.2 WP – Rokle

Data pro OS Rokle pocházejí z laboratorních a in-situ experimentů. Data pochází ze dvou zdrojů, jedním je projekt Ověřování nahraditelnosti bentonitu montmorillonitickými jíly (Pacovský 2003) a Experimentální výzkum materiálu na bázi bentonitu při dlouhodobém působení teploty a saturačního media s extrémními účinky (Pacovský et al. 2010a).

V projektu zaměřeném na ověřování nahraditelnosti (Pacovský et al. 2003) byl bentonit Rokle vystavován krátkodobě (24 h) a dlouhodobě (3 a 6 měsíců) zvýšené teplotě (80 °C a 110 °C) a poté byl testován při laboratorní teplotě.

V projektu zaměřeném na saturační media (Pacovský et al. 2010a) byl bentonit v obou případech vystavován kombinovaným zatížením teplem a dvěma typům saturačního media. Přirozené podzemní vodě „Josef“ a syntetické „SGW-K“. Testovány byly dva typy bentonitů založené na bentonitu Rokle:

- Čistá Rokle.
- Substrát Mock-Up-CZ (směs bentonitu, křemenného písku a grafitu) po zatížení teplotou 60-70 °C po dobu 4 let.

Laboratorní experimenty

Vzorky bentonitů byly umístěny v tlakových nádobách a zality saturačním mediem (vodou „Josef“ či „SGW-K“). Procedura spočívala v zahřívání (zatěžování) tlakových nádob teplotou 95 °C po dobu 13 dnů a následném vystavení nádob běžné laboratorní teplotě (1 den). Odběry byly poté provedeny po 3, 6, 12 a 18 měsících (Pacovský et al. 2010a).

In-situ experimenty

Do vrtu v podzemí v blízkosti tepelného zdroje byly umístěny perforované patrony s bentonitovou náplní (Rokle, Mock-Up CZ). Bentonit byl vystavován přirozeném podzemnímu prostředí. Saturačním mediem byla přirozená voda „Josef“. Náplň patron byla zatěžována teplotou do 100 °C. Odběry byly poté provedeny po 3, 6, 12 a 18 měsících (Pacovský et al. 2010a).

Meze plasticity z jednotlivých patron z in situ experimentu po stejné době zatížení teplotou se téměř neliší, a proto byly sloučeny a vyhodnocovány společně. Týká se to bentonitu Rokle, kde byly společně vyhodnocovány hodnoty meze plasticity z patron 2 a 4 a MU-Cz_4y, kde byly společně vyhodnocovány meze plasticity z patron 3 a 5. V databázi je bentonit pocházející z jednotlivých patron rozlišován pomocí označení „KB#“. Ve statistickém vyhodnocení je v názvu bentonitu číselné označení vynecháno, z důvodu společného vyhodnocování hodnot z jednotlivých patron.

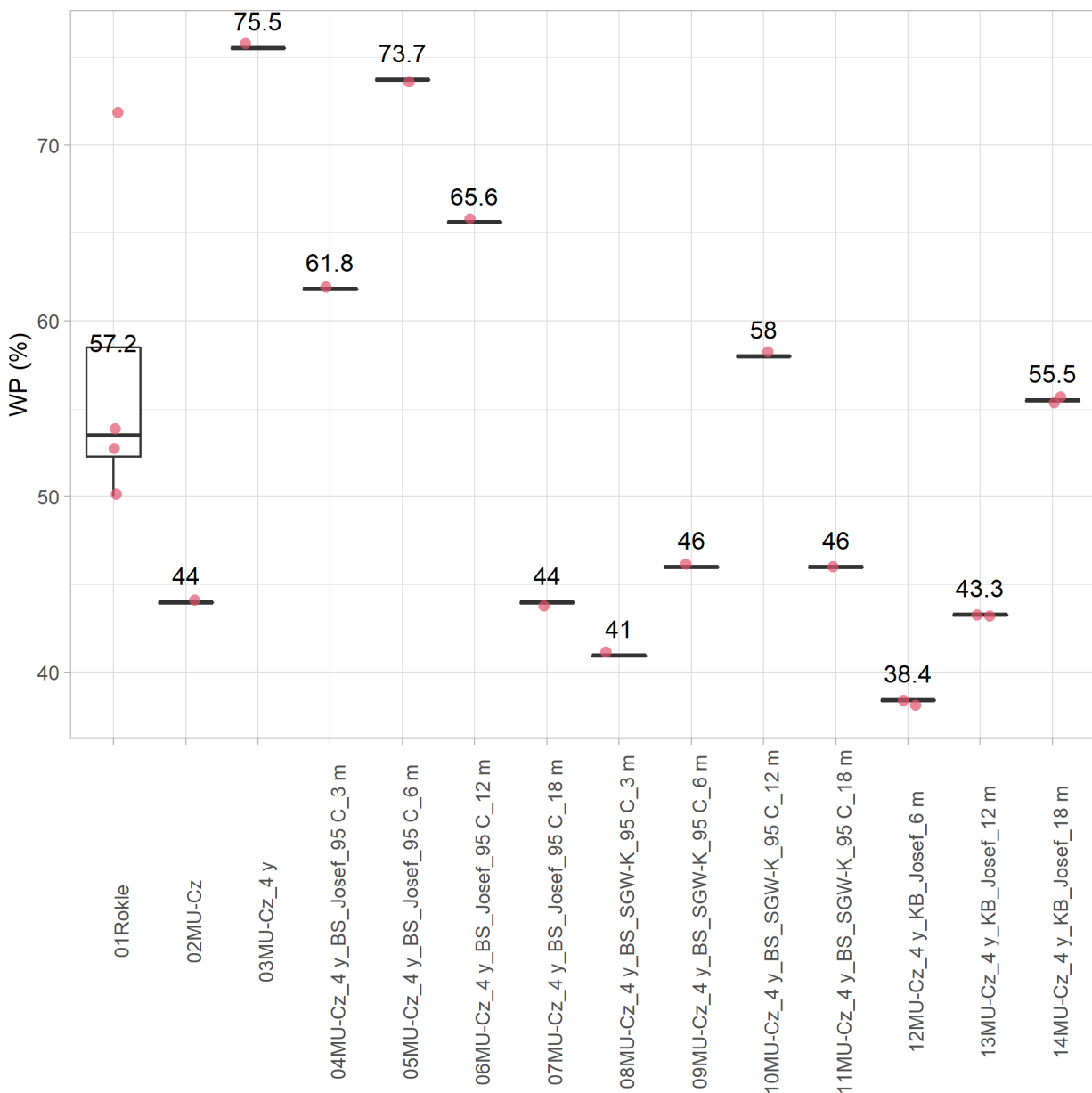
Mez plasticity je vyhodnocena pro každý bentonit samostatně. Do grafu Obr. 66, který se vztahuje k materiálu Mock-Up CZ je pro porovnání vloženo vyhodnocení meze plasticity čisté Rokle.



Obr. 65 Mez plasticity bentonitu Rokle_NS a Rokle_OS po krátkodobém (24 h) a dlouhodobém (3, 6, 9 měsíců) vystavení zvýšené teplotě (80 °C a 110 °C) v suchém stavu a mez plasticity bentonitu Rokle po zatížení teplotou 95 °C a současném vystavení vodě „Josef“, respektive „SGW-K“ po dobu 3, 6, 12 a 18 měsíců v nádobách a mez plasticity bentonitu Rokle umístěné v perforovaných patronách v podzemí po zatížení zvýšenou teplotou a vystavení vodě „Josef“.

V grafu Obr. 65 je mez plasticity bentonitu Rokle_NS a Rokle po zatížení teplotou 80 a 110 °C v suchém stavu po dobu 24 hodin, 3, 6 a 9 měsíců a bentonitové suspenze při použití vody Josef a VŠCHT vody (označované SGW-K) zatěžované teplotou 95 °C po dobu 3, 6, 12 a 18 měsíců. Mez plasticity byla určena také pro vzorky odebrané z in situ experimentu po 3, 6, 12 a 18 měsících po umístění. Jedině v tomto případě je možné pozorovat nějaký trend, kdy mez plasticity roste s dobou vystavení in situ podmínkám.

Nebyl zaznamenán žádný efekt tepelného zatížení bentonitu Rokle na mez plasticity.



Obr. 66 Porovnání meze plasticity bentonitu Mock-up-Cz a Rokle_NS. Mez plasticity směsi Mock-Up CZ po zatížení teplotou 95 °C a současném vystavení vodě „Josef“, respektive „SGW-K“ po dobu 3, 6, 12 a 18 měsíců v nádobách a mez plasticity směsi Mock-Up CZ umístěné v perforovaných patronách v podzemí po zatížení zvýšenou teplotou a vystavení vodě „Josef“.

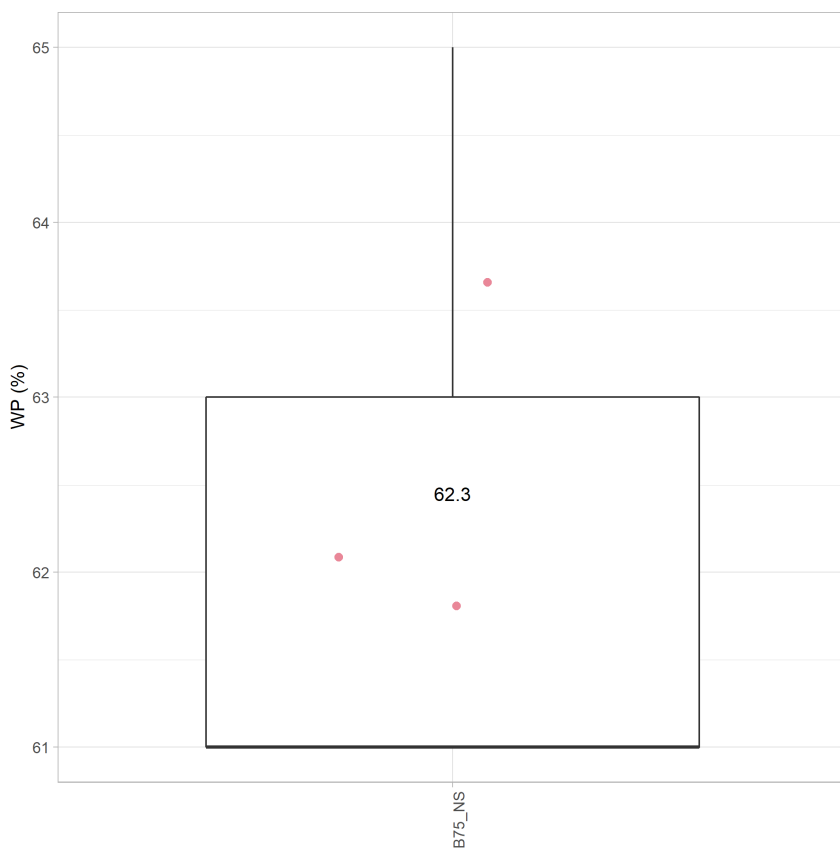
Na grafu Obr. 66 je mez plasticity směsi Mock-up Cz v neovlivněném stavu a mez plasticity směsi po vystavení teplotě 95 °C ve vlhkém stavu po dobu 3, 6, 12 a 18 měsíců. Pro vytvoření suspenze byla použita voda Josef a voda VŠCHT (označena jako SGW-K). Nebyl zaznamenán žádný efekt tepelného zatížení směsi Mock-up Cz na mez plasticity.

2.7.3 WP – BaM

Pro bentonit BaM nebyla určena mez plasticity pro žádnou z forem bentonitu.

2.7.4 WP – B75

Pro bentonit B75 byla určena hodnota jen pro nezatížený bentonit B75_NS (Vašíček et al. 2010; Ševců et al. 2018; Štáštka et al. 2018). Graficky jsou hodnoty zobrazeny v grafu na Obr. 67



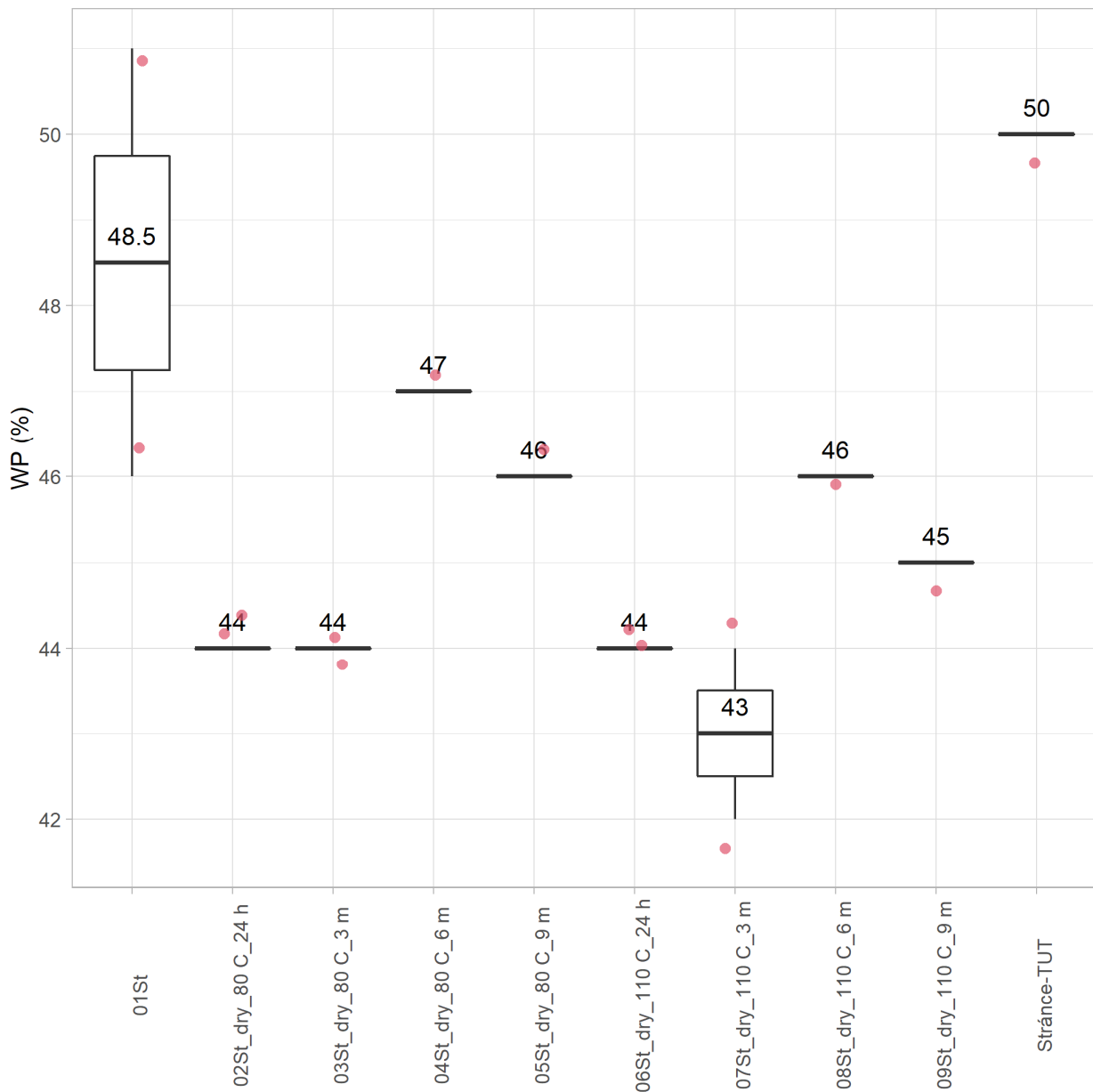
Obr. 67 Mez plasticity bentonitu B75.

2.7.5 WP – Stránce

Data pro analýzu meze plasticity ovlivněného bentonitu Stránce pochází z jednoho zdroje:

- V projektu Ověřování nahraditelnosti bentonitů montmorillonitickými jíly (Pacovský et al. 2004a, 2004b) byl bentonit Stránce krátkodobě (24 h) a dlouhodobě (3, 6 a 9 měsíců) zatěžován zvýšenou teplotou (80 °C a 110 °C) v suchém s tavu. V tomto projektu byla také stanovena hodnota WP neovlivněného bentonitu Stránce.

Mez plasticity neovlivněného bentonitu Stránce byla určena laboratoří TUT pro instituci Posiva v rámci projektu zaměřeného na ověření nahraditelnosti bentonitů montmorillonitickými jíly (Carlson a Keto 2006).



Obr. 68 Mez plasticity bentonitu Stráncé (neovlivněný) určený CZ laboratořemi a laboratoří TUT a Stráncé_OS po krátkodobém (24 h) a dlouhodobém (3, 6, 9 měsíců) vystavení zvýšené teplotě (80°C a 110°C) v suchém stavu.

Na grafu na Obr. 68 je mez plasticity bentonitu Stráncé v neovlivněném stavu (označeno jako St) a mez plasticity bentonitu Stráncé po zatížení teplotou 80 a 110 °C v suchém stavu po dobu 24 hodin, 3, 6 a 9 měsíců. Vlivem tepelného zatížení došlo k mírnému poklesu meze plasticity bentonitu Stráncé.

2.7.6 WP – Zelený jíł

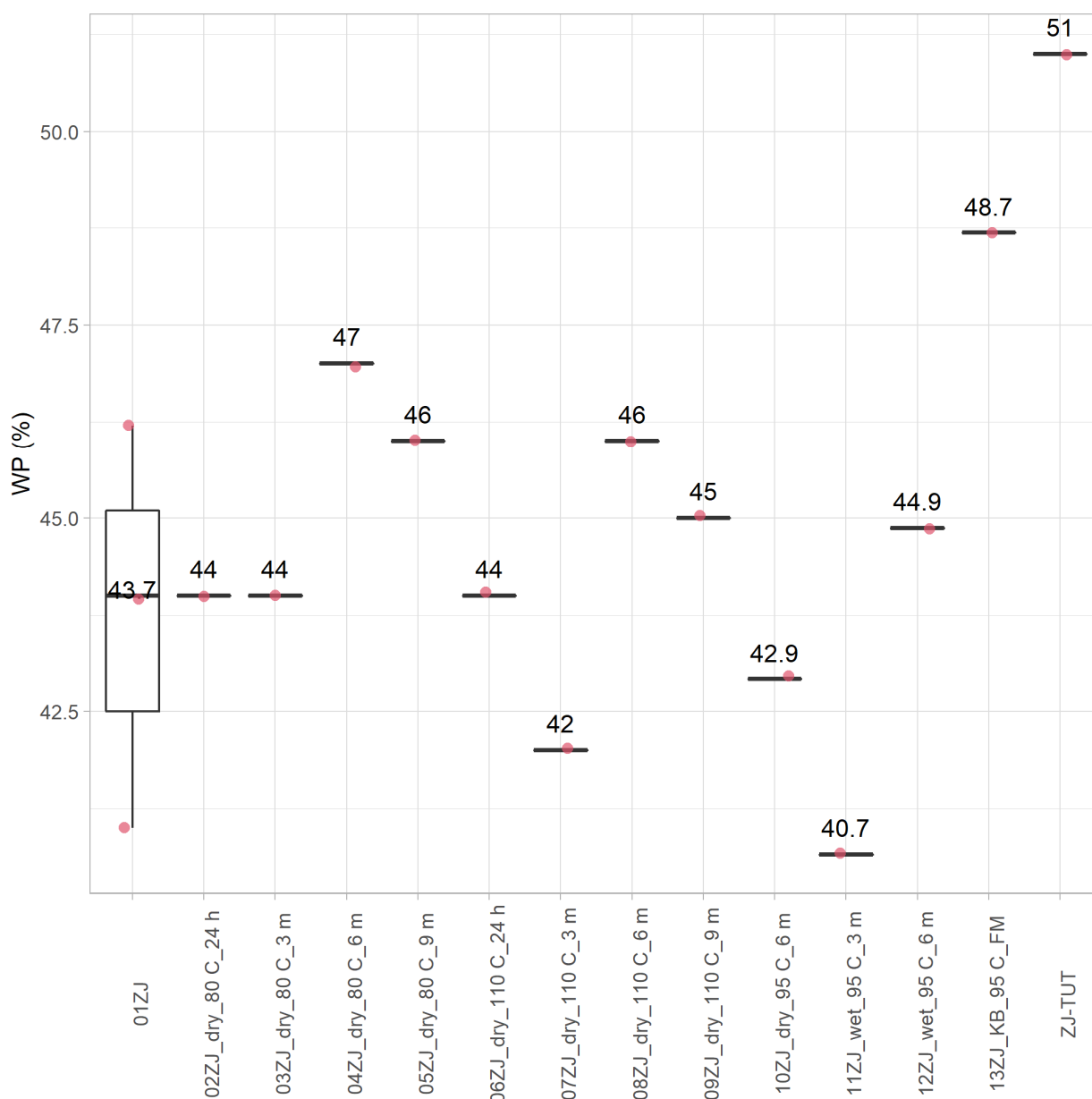
Data pro analýzu meze plasticity ovlivněného bentonitu Zelený jíł pochází ze dvou zdrojů:

- V projektu Ověřování nahraditelnosti bentonitů montmorillonitickými jíly (Pacovský et al. 2004a, 2004b) byl bentonit Zelený jíł krátkodobě (24 h) a dlouhodobě (3, 6 a 9 měsíců)

zatěžován zvýšenou teplotou (80 °C a 110 °C) v suchém s tavu. V tomto projektu byla také stanovena hodnota WP neovlivněného bentonitu Zelený jíł (značen jako ZJ).

- V projektu zaměřeném na geotechnický výzkum přírodních zelených jíłů byl bentonit tepelně zatěžován teplotou 95 °C v suchém a vlhkém stavu. Tepelně zatěžovaný bentonit ve vlhkém stavu byl vystaven podzemní vodě „Josef“, odebrané z vrtů podzemní laboratoře Josef. Bentonitová suspenze byla zalita vodou a poté vystavena zvýšené teplotě 95 °C. Odběry vzorků probíhaly v časových intervalech 3 a 6 měsíců (Pacovský et al. 2011).

V rámci těchto dvou projektů byla stanovena mez plasticity také pro neovlivněný Zelený jíł. Mez plasticity neovlivněného bentonitu Stránce byla také určena laboratoří TUT pro instituci Posiva v rámci projektu zaměřeného na ověření nahraditelnosti bentonitů montmorillonitickými jíly (Carlson a Keto 2006).



Obr. 69 Mez plasticity bentonitu Zelený jíł (neovlivněný) a Zelený jíł_OS po krátkodobém (24 h) a dlouhodobém (3, 6, 9 měsíců) vystavení zvýšené teplotě (80 °C a 110 °C) v suchém stavu a mez tekutosti bentonitu dlouhodobě (3 a 6 měsíců) vystaveného teplotě 95 °C v suchém a vlhkém stavu.

Na Obr. 69 je mez plasticity bentonitu Zelený jíł v neovlivněném stavu (označeno jako ZJ) a mez plasticity bentonitu Zelený jíł po zatížení teplotou 80 a 110 °C v suchém stavu po dobu 24 hodin, 3, 6 a 9 měsíců a po zatížení ve vlhkém stavu teplotou 95 °C po dobu 3 a 6 měsíců. Z grafu není patrná změna meze plasticity vlivem tepelného zatěžování.

2.7.7 Metodické a statistické zhodnocení

Mez plasticity není vhodným ukazatelem stability bentonitu, jelikož podléhá velkým nepřesnostem při měření a charakter zkoušky samotné neumožňuje postihnout drobné změny v geotechnickém chování bentonitu. Výsledky jsou silně vázané na zkušenosti laboranta provádějícího zkoušku. Do vyhodnocení zkoušky je vnesen prvek subjektivity lidského faktoru, a při porovnávání výsledků

je nutné uvažovat jistou nepřesnost jednotlivých hodnot. Zkoušku je vhodné provádět za účelem komplexní charakterizace bentonitu nikoli jako indikátor změn vlivem zatížení. Pomocí této zkoušky je možné vystihnout pouze extrémní změny v geotechnických vlastnostech.

Podobně jako u meze tekutosti také v případě meze plasticity je nutné věnovat pozornost době máčení před zkouškou a zařadit ji mezi parametry podle nichž je prováděno statistické vyhodnocení.

Mez plasticity ovlivněného bentonitu byla měřena pro bentonity Rokle, Stránce a Zelený jíl. U ovlivněného bentonitu je k dispozici zpravidla jedna hodnota meze plasticity pro každý typ ovlivnění. Pro neovlivněný bentonit jsou stanoveny 2-3 hodnoty. V případě bentonitu Stránce bylo zaznamenáno mírné snížení meze plasticity u ovlivněného stavu. Bentonity Rokle a Zelený jíl nevykazují změnu meze plasticity. Pro bentonity BCV a B75 byla stanovena mez plasticity pouze pro neovlivněný bentonit pro BaM není k dispozici žádná hodnota.

2.8 Specifická hustota

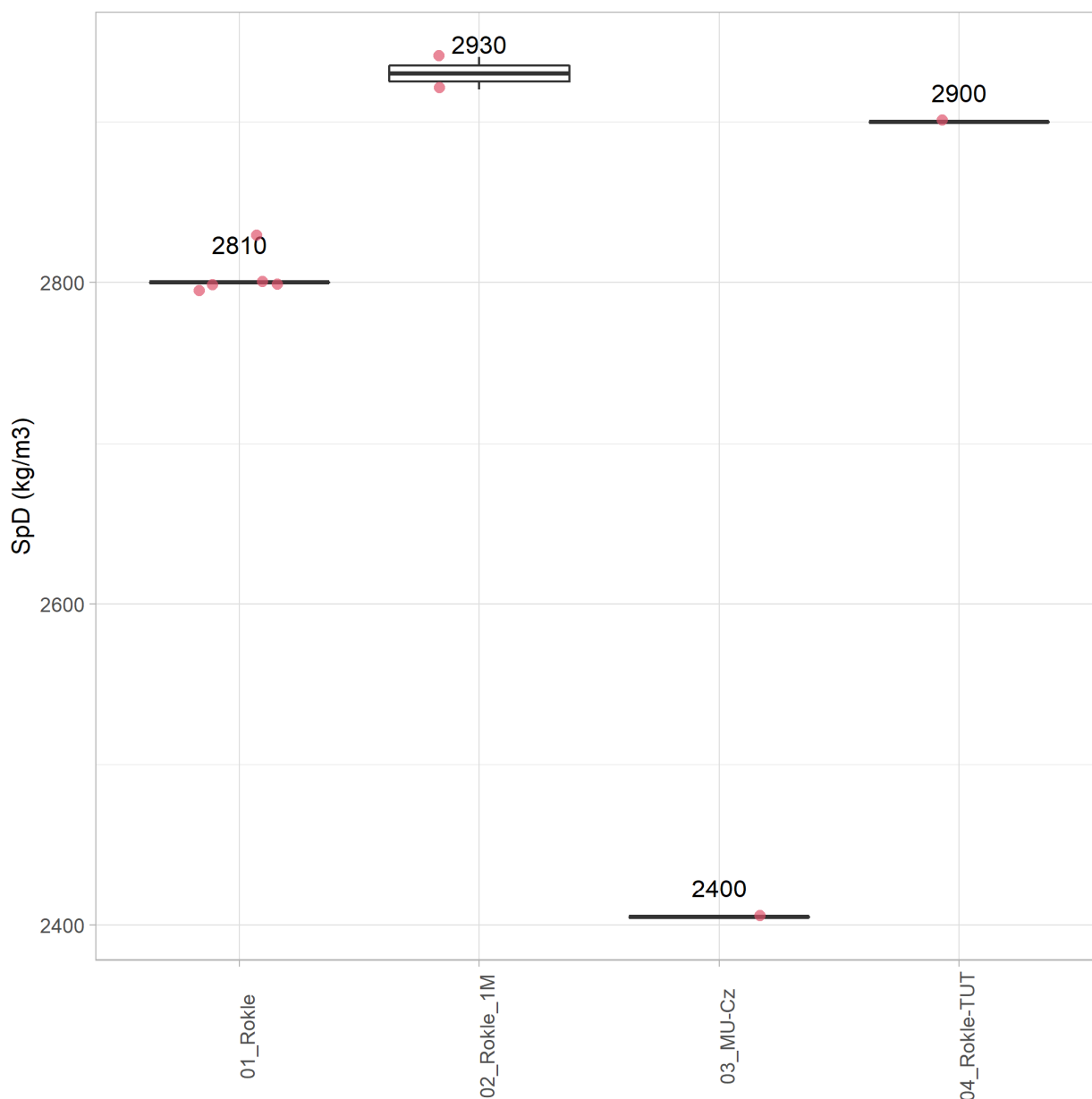
Specifická hustota patří mezi základní fyzikální vlastnosti bentonitu. Byla měřena zejména pro neovlivněný materiál. Nepředpokládá se, že by docházelo k výrazným změnám tohoto parametru vlivem tepelného zatěžování. Specifická hustota byla určena pro všechny předmětné bentonity i po směs Mock-Up-Cz. Nejvíce vzorků bylo analyzováno pro bentonit Rokle – 9 vzorků. Dohromady bylo analyzováno 21 vzorků na neovlivněném bentonitu. Na ovlivněném bentonitu byla stanovena pouze jedna hodnota pro B75. Tento vzorek pocházel z projektu Dopas.

2.8.1 SpD – BCV

Na BCV byla provedena jedna zkouška na zjištění specifické hustoty (SpD) neovlivněného bentonitu. Zkouška byla provedena v laboratoři UJV (Červinka et al. 2018). Byl použit pyknometr a 0,1 M MgCl₂, výsledná hodnota je: $\rho_s = 2758 \text{ kg/m}^3$.

2.8.2 SpD – Rokle

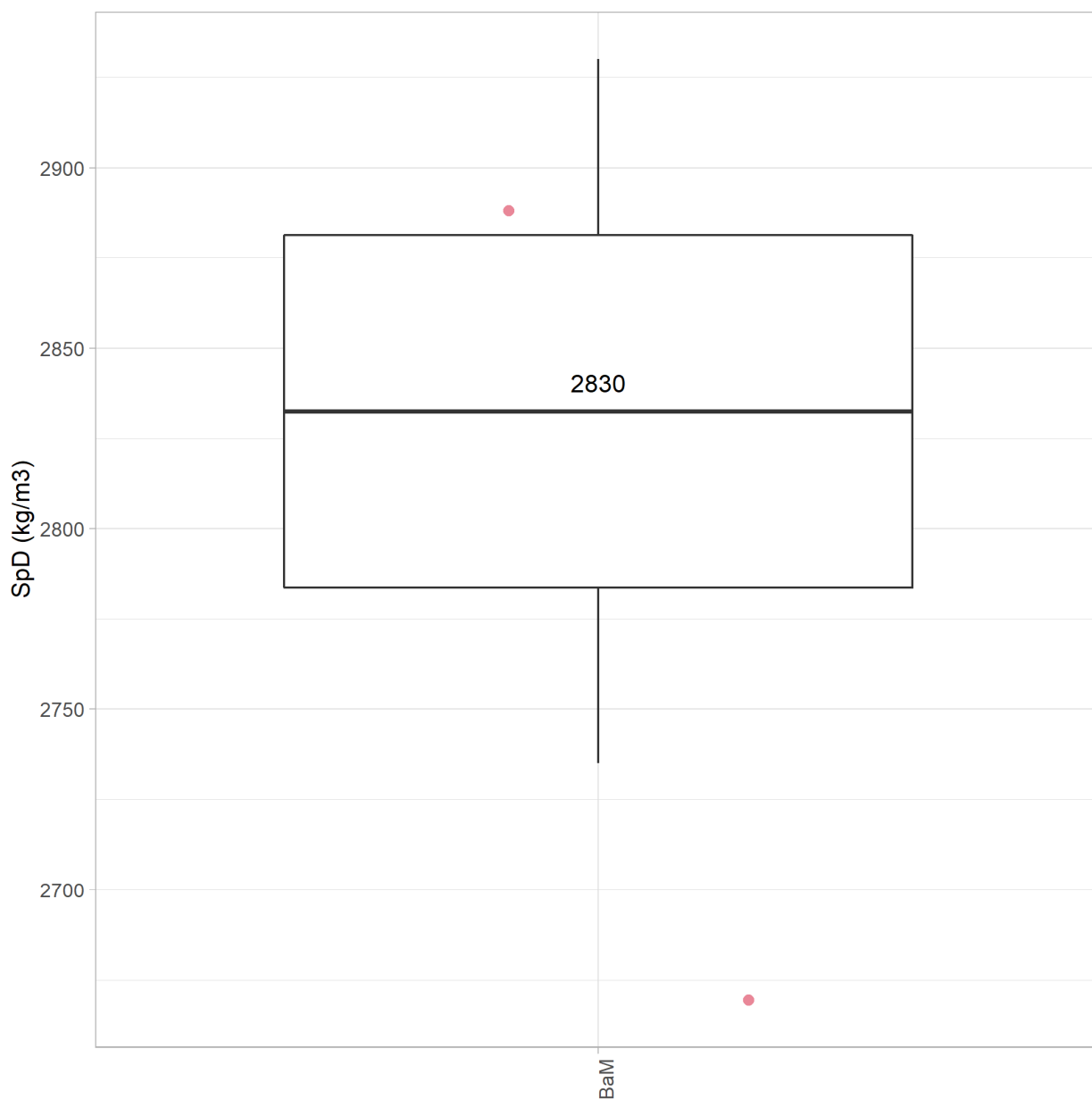
Data pro vyhodnocení specifické hustoty neovlivněného bentonitu Rokle pochází ze tří zdrojů (Pacovský et al. 2003, Svensson et al. 2011, Carlson a Keto 2006).



Obr. 70 Specifická hustota neovlivněného bentonitu Rokle při využití solného roztoku o koncentraci 1 M mol/l NaCl a destilované vody a specifická hustota stanovená v laboratoři TUT bez uvedení média.

2.8.3 SpD – BaM

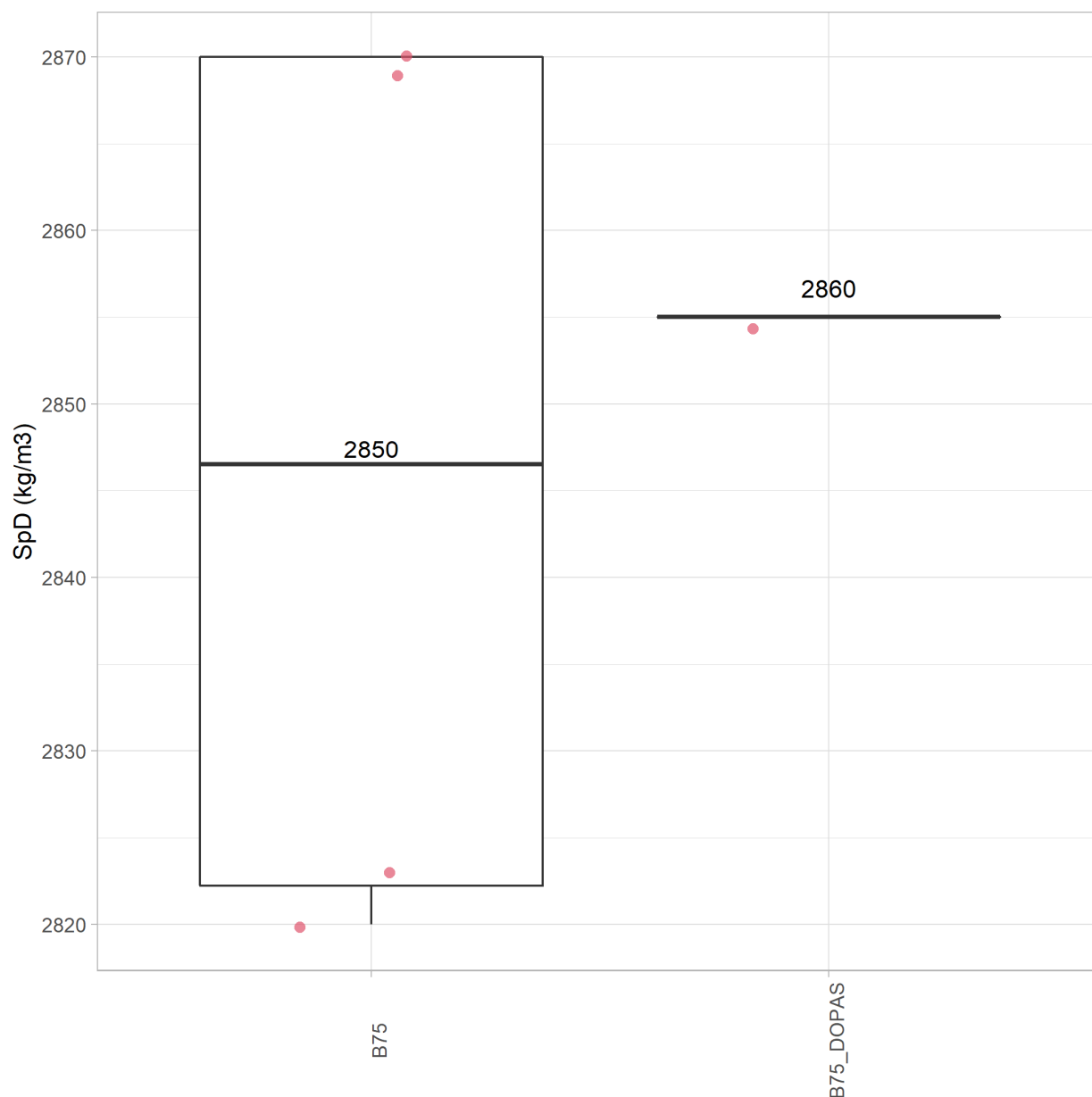
Pro BaM_NS byly určeny dvě hodnoty specifické hustoty (Červinka et al. 2015, Červinka et al. 2018) pyknometrickou metodou s využitím destilované vody. Hodnoty jsou zobrazeny v grafu na Obr. 71.



Obr. 71 Specifická hustota bentonitu BaM.

2.8.4 SpD – B75

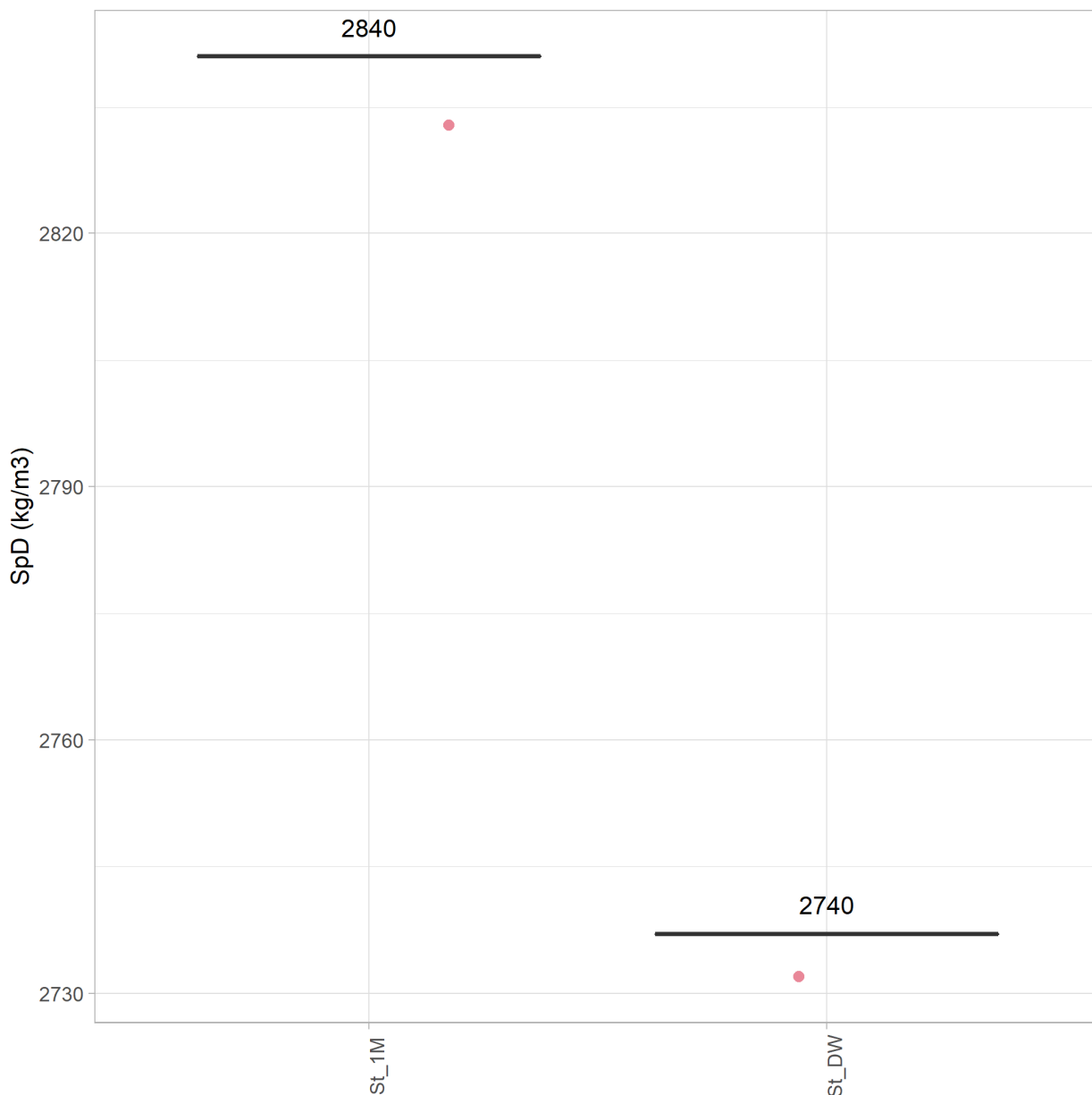
Data pro vyhodnocení specifické hustoty pochází ze čtyř zdrojů (Vašíček et al. 2010, Gondolli et al. 2013, Vašíček et al. 2014, Šťástka et al. 2018).



Obr. 72 Specifická hustota neovlivněného bentonitu B75.

2.8.5 SpD – Stránce

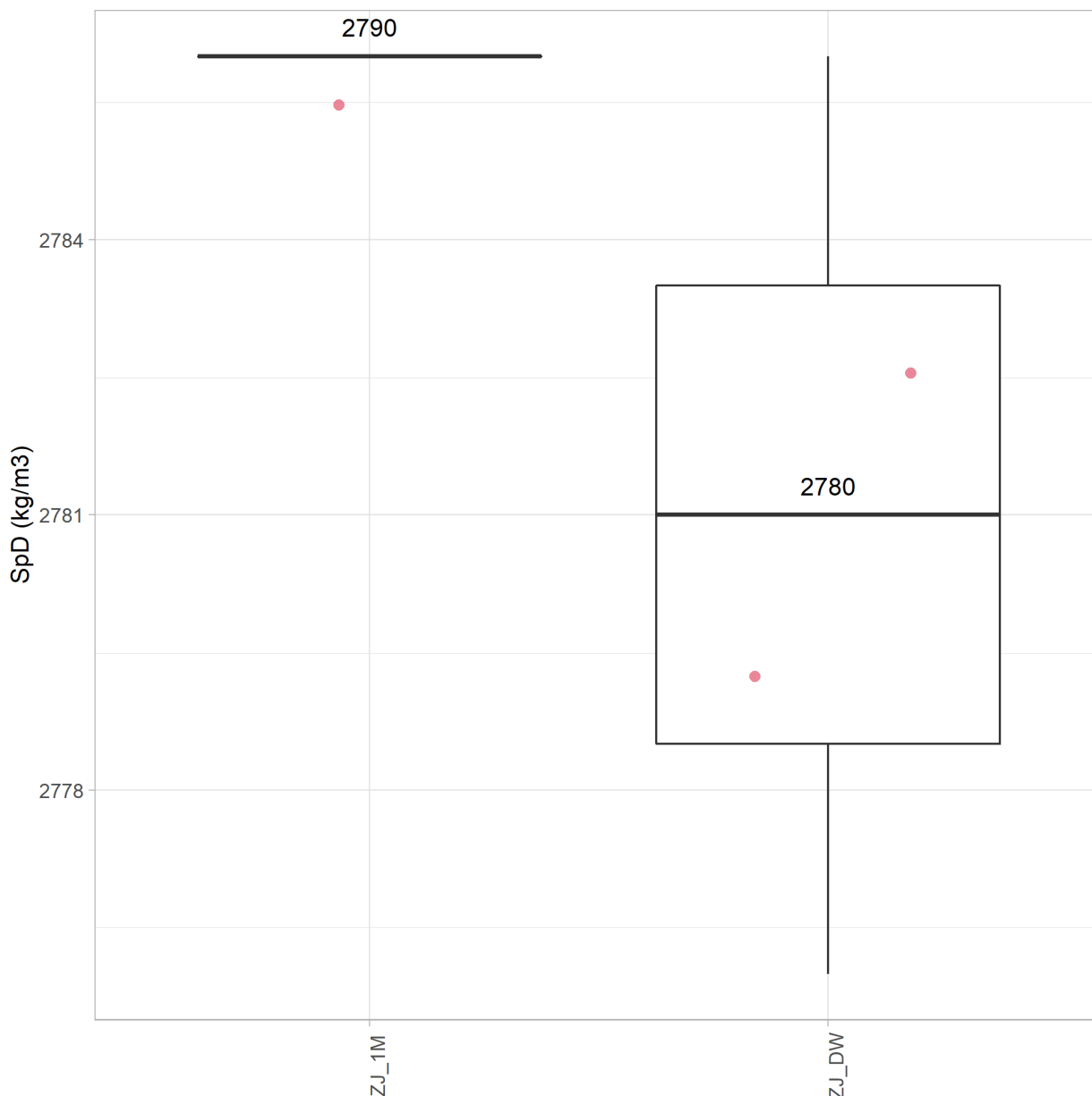
Pro Stránce_NS byly určeny dvě hodnoty specifické hustoty pyknometrickou metodou. Jednou s využitím destilované vody, v grafu na Obr. 73 označeno jako St_DW a jednou s využitím solného roztoku o koncentraci 1M mol/l NaCl, v grafu na Obr. 73 označeno jako St_1M.



Obr. 73 Specifická hustota bentonitu Stránce_NS a specifická hustota bentonitu Stránce určená za použití destilované vody označená jako ST_DW a při použití roztoku 1M mol/l NaCl, označené St_1M.

2.8.6 SpD – Zelený jíł

Pro bentonit Zelený jíł byla měřena specifická hustota na nezátíženém bentonitu. Dvě měření byla provedena při využití destilované vody, v grafu Obr. 74 označené jako ZJ_DW a jedno měření s využitím solného roztoku o koncentraci 1M mol/l NaCl, v grafu označené jako ZJ_1M.



Obr. 74 Specifická hustota neovlivněného bentonitu Zelený jíl určená za použití destilované vody označená jako ZJ_DW a při použití roztoku 1M mol/l NaCl, označené ZJ_1M.

2.8.7 Metodické a statistické zhodnocení

Specifická hustota patří mezi základní fyzikální vlastnosti bentonitu, nepředpokládá se však se změnami tohoto parametru vlivem tepelného zatížení ať už v kombinaci s vodou, nebo v suchém stavu. Všechny hodnoty byly stanoveny pro neovlivněný bentonit. Při vyhodnocení bylo rozlišováno použité medium. Samostatně byl vyhodnocován bentonit, kde byla zkouška provedena s destilovanou vodou, nebo s roztokem NaCl. Samostatně byly vyhodnocovány hodnoty, kde ve zdroji použité medium nebylo uvedeno. Takový případ je jen jeden, a to v případě zkoušky provedené v TUT na bentonitu Rokle. Hodnoty specifické hustoty se napříč bentonity významně neliší. Pro ovlivněný bentonit nebyla stanovena ani jedna hodnota specifické hustoty.

2.9 Hydraulická vodivost (PROP)

Vyhodnocení hydraulické vodivosti vyžadovalo specifický přístup, jelikož se jedná o dvourozměrná data, kde není dostupná široká základna dat, která je nutná pro běžně prováděné statistické analýzy na těchto typech dat.

Statistické vyhodnocení je založené na procentuálním určení rozdílu reálně naměřených hodnot a hodnot teoretických stanovených regresní analýzou. V případě hydraulické vodivosti byla jako best fit varianta zvolena aproximace přímkou. Parametry regresní křivky vychází z přirozeného logaritmu řady hydraulických vodivostí. Pro dané objemové hmotnosti byly určeny teoretické hodnoty hydraulických vodivostí. Statistická analýza byla poté provedena pro soubor procentuálních rozdílů naměřených a teoretických hodnot v logaritmickém tvaru a bylo s nimi pracováno jako s jednorozměrnými daty. Tudíž i statistické charakteristiky mají procentuální formát. Interval spolehlivosti je vyjádřen jako procentuální odchylka od regresní křivky. Inverzní funkcí byly poté získány normální hodnoty hydraulické vodivosti a křivky vyjadřující interval spolehlivosti Studentova t- rozdělení na hladině spolehlivosti $\alpha = 5\%$. Tento interval spolehlivosti vyjadřuje rozsah, v jakém se s danou spolehlivostí bude pohybovat regresní křivka.

Pro samotné vyhodnocení jsou použity charakteristické křivky vyjadřující rozsah, ve kterém se s danou pravděpodobností bude pohybovat každý další naměřený bod, jedná se o rozsah k teoretické $\pm 2\sigma$. V legendě následujících grafů je uveden popis těchto křivek jako ($k \pm 2sig$). Následné vyhodnocení je založeno na analýze polohy právě těchto křivek. Z důvodu přehlednosti není v legendě grafu uveden popis intervalu spolehlivosti regresní křivky. Jedná se o křivky těsně přiléhající k regresní křivce. Intervaly spolehlivosti měření jsou ze své podstaty vždy širší než intervaly spolehlivosti regresní křivky.

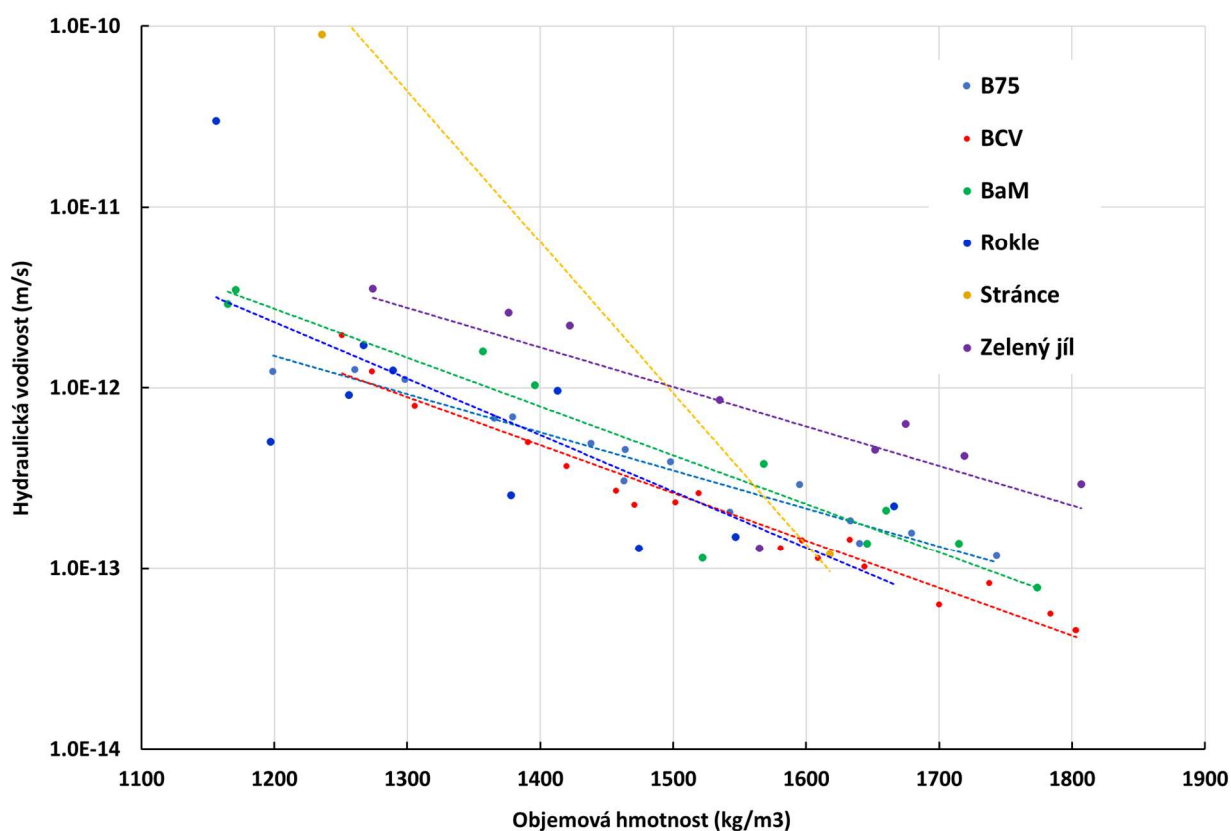
Ke každé datové řadě je vztaženo pět křivek udávající spolehlivosti. Za účelem přehlednosti byl vytvořen systém hodnocení založený na porovnávání vždy jen dvou datových řad. Zobrazení více než tří datových řad a jejich charakteristických křivek je nepřehledné. Porovnávání je neovlivněný bentonit vždy s jednou řadou ovlivněného bentonitu a hodnocení míry ovlivnění je tedy vztaženo k neovlivněnému bentonitu. Vzájemné porovnání více řad měřených na ovlivněném bentonitu je problematické z důvodu velkého množství kritérií, dle kterých byl bentonit rozřazen do skupin. Například bentonit BCV byl rozdělen do 13 skupin v závislosti na teplotě zatížení, době, vlhkostním stavu (suspenze, suchý), formě bentonitu (homoionní jíly, pelety, lisovaný), způsobu zatěžování (post mortem, měření v průběhu zatěžování, in-situ experimenty). Hodnocení vztažené k neovlivněnému bentonitu nabízí i možnost porovnat jednotlivé skupiny bentonitů vůči sobě v závislosti na jejich vztahu k neovlivněnému bentonitu.

Systém klasifikace ovlivnění je založen na vzájemném geometrickém vztahu mezi pásy spolehlivosti ovlivněného a neovlivněného bentonitu. Zjednodušeně lze říci, že pokud se pás spolehlivosti ovlivněného bentonitu vyskytuje mimo pás spolehlivosti neovlivněného bentonitu, tak je možné prohlásit, že jsou pozorovány změny v geotechnických vlastnostech vlivem zatížení.

Klasifikace samotná spočívá na ohodnocení, zda se intervaly spolehlivosti obou datových sad zcela překrývají, či jen částečně, nebo zda jsou plně oddělené. Běžně se regresní křivky a s nimi i křivky/ oblasti spolehlivosti protínají a tím není možné definovat vzájemný vztah v celém oboru měřených hodnot objemové hmotnosti sušiny. Z tohoto důvodu je pás spolehlivosti pomyslně rozdělen na 4 intervaly, které vzniknou rozdělením celého rozsahu objemových hmotností sušiny

zatíženého bentonitu na 4 stejně velké části a klasifikuje se vzájemná poloha jednotlivých pásů spolehlivosti vždy pro každý interval zvlášť. Velikost jednotlivých intervalů je $(\rho_{dmax} - \rho_{dmin})/4$.

Graf na Obr. 75 zobrazuje shrnutí dat měřených na všech bentonitech v neovlivněném stavu. V následujících kapitolách je porovnání hydraulické vodivosti neovlivněného a ovlivněného bentonitu po jednotlivých typech. Propustnost bentonitu Stránce se v oblastech vyšších objemových hmotností pohybuje kolem propustností ostatních bentonitů. U nízkých objemových hmotností je vysoká propustnost daná vysokou heterogenitou bentonitu (fotodokumentace viz Pacovský et al. 2003), jelikož se jedná o kopaný nehomogenizovaný bentonit. Z důvodu přehlednosti není v grafu Obr. 75 uvedena hodnota nejmenší objemové hmotnosti 800 kg/m³.



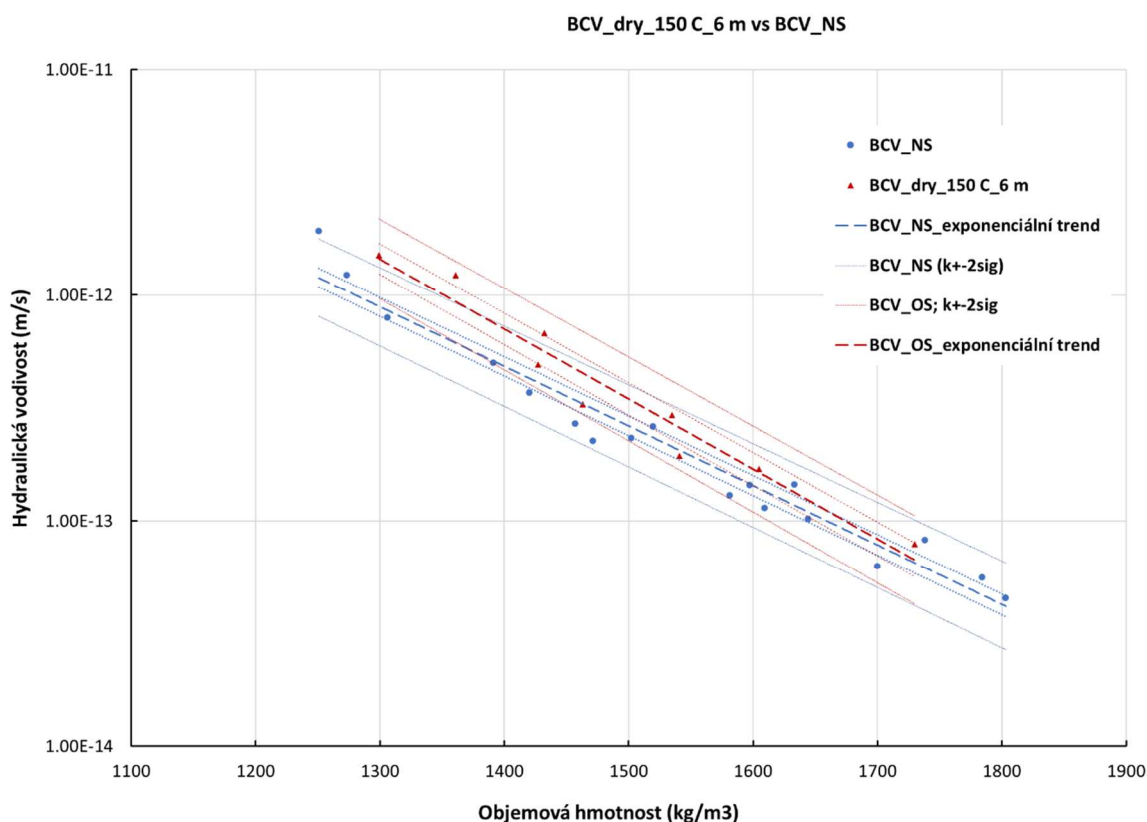
Obr. 75 Hydraulická vodivost všech předmětných bentonitů v neovlivněném stavu.

2.9.1 PROP – BCV

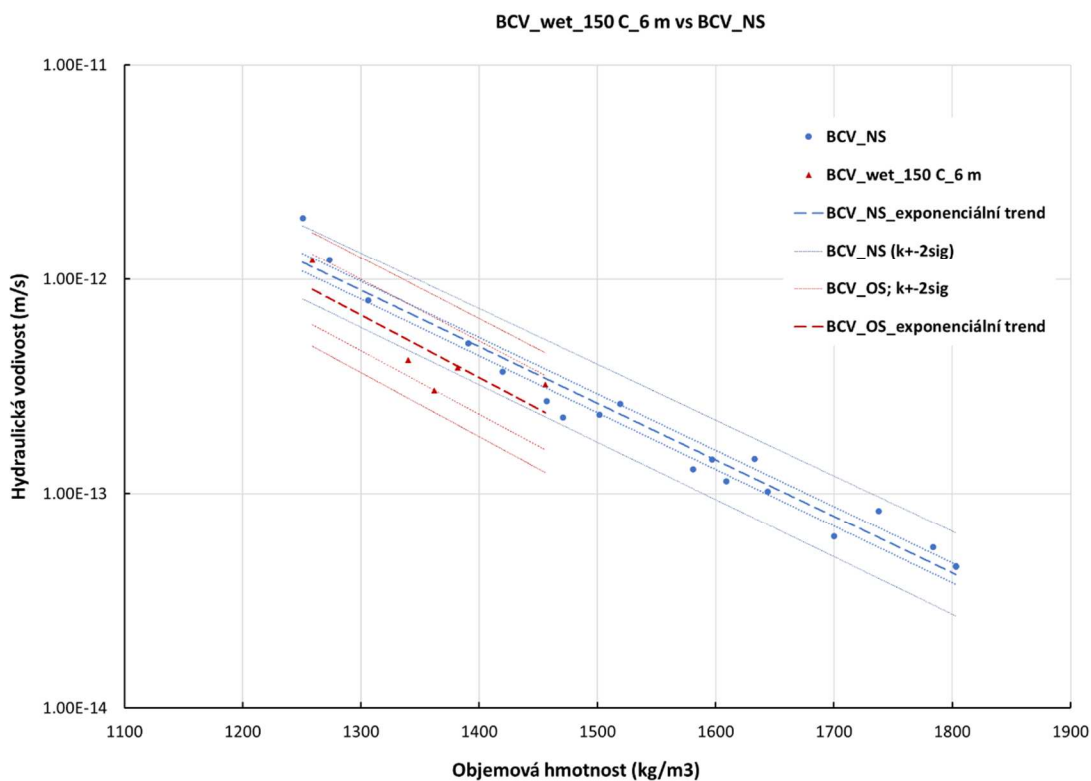
Data pro vyhodnocení hydraulické vodivosti pochází z osmi zdrojů:

- V rámci projektu zaměřeném na kompletní charakterizaci bentonitu BCV 2017 byla určena hydraulická vodivost BCV_NS (Červinka et al. 2018).
- Projekt Geotechnická charakterizace homoionních forem bentonitu BCV 2017 byl zaměřen na charakterizaci různých forem BCV bentonitu (Na – BCV, Ca-BCV, Na/Ca-BCV). Bentonit nebyl tepelně ovlivněn. Byla určena vždy jedna sada dat o různých objemových hmotnostech sušiny pro každou formu (Vašíček et al. 2019).

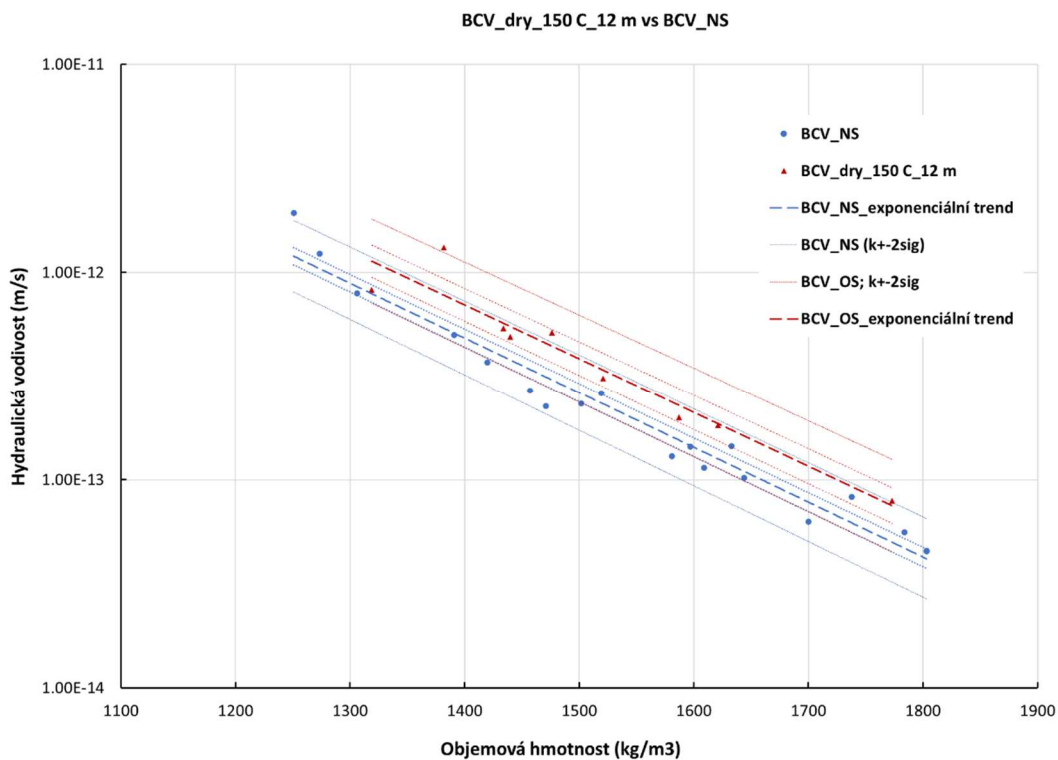
- V rámci projektu EURAD HITEC jsou určovány hydraulické a geotechnické charakteristiky bentonitu BCV po 6, 12 a 24 měsících tepelného zatížení teplotou 150 °C. Bentonit je zatěžován ve vlhkém stavu, kdy je zalit destilovanou vodou a v suchém stavu. Z tohoto projektu pochází sady dat hydraulické vodivosti pro různé objemové hmotnosti sušiny po 6 a 12 měsících zahřívání v suchém stavu a po 6 měsících zahřívání ve vlhkém stavu (Černochová et al. 2021).
- V článku (Kašpar et al. 2021) jsou uvedeny hodnoty hydraulické vodivosti BCV po tepelném zatížení teplotou 150 °C v suchém stavu po dobu 6 a 12 měsíců a pro BCV_NS. Data byla získána v rámci projektu EURAD HITEC.
- Hydraulická vodivost BCV_NS a peletizovaného BCV byla určena také v rámci projektu Interakční experiment (Svoboda et al. 2019b).
- Cílem projektu zaměřeném na laboratorní zkoušky bentonitu BCV za zvýšené teploty bylo měření hydraulických a geotechnických charakteristik v průběhu tepelného zatěžování. Na sadách vzorků BCV byla měřena hydraulická vodivost při současném zahřívání teplotou 40 °C, 60 °C a 80 °C. V projektu byla také měřena hydraulická vodivost na sadě vzorků neovlivněného BCV o různé objemové hmotnosti sušiny. (Najser et al. 2020, Najser et al. 2021).



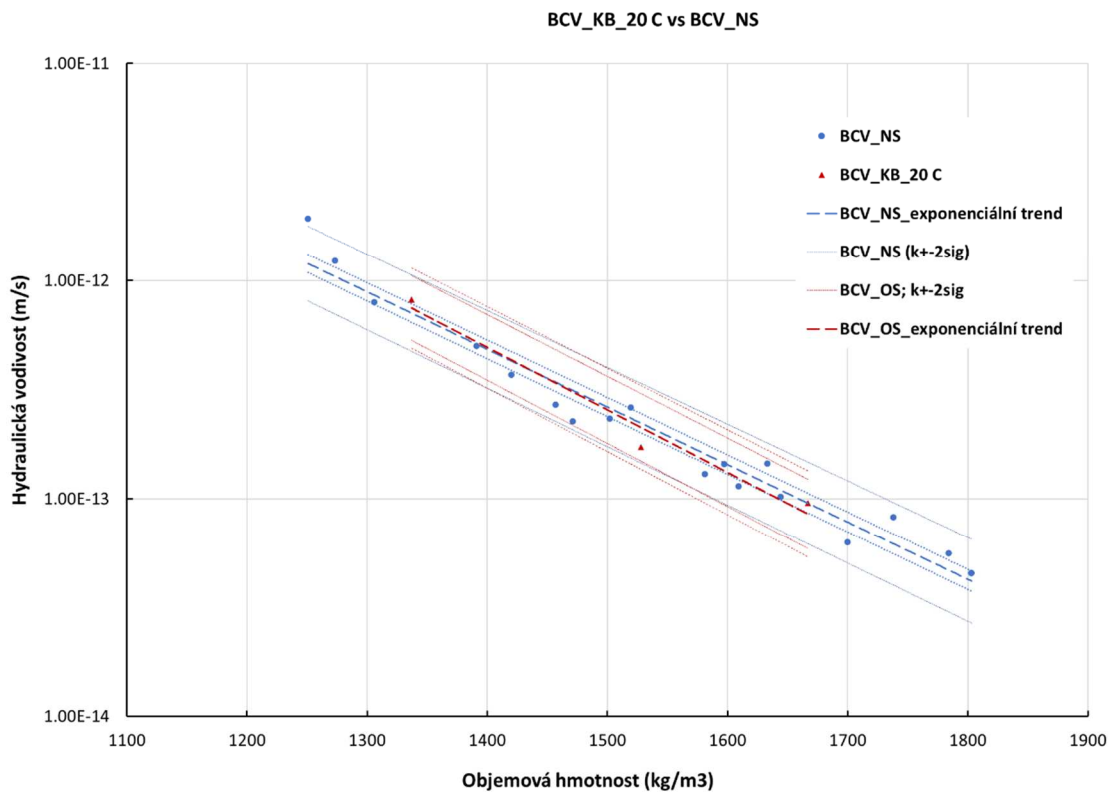
Obr. 76 Porovnání hydraulické vodivosti a charakteristických křivek bentonitu BCV_NS a bentonitu BCV_dry_150 C_6 m po 6 měsících tepelného zatěžování teplotou 150 °C v suchém stavu.



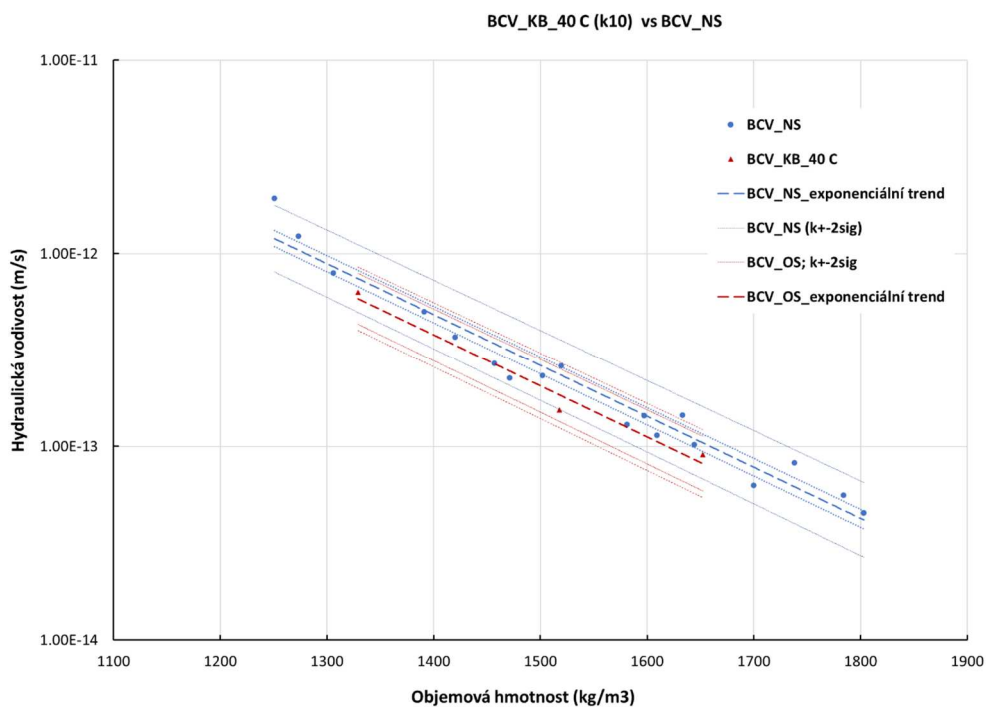
Obr. 77 Porovnání hydraulické vodivosti a charakteristických křivek bentonitu BCV_NS a bentonitu BCV_wet_150 C_6 m po 6 měsících tepelného zatěžování teplotou 150 °C ve vlhkém stavu.



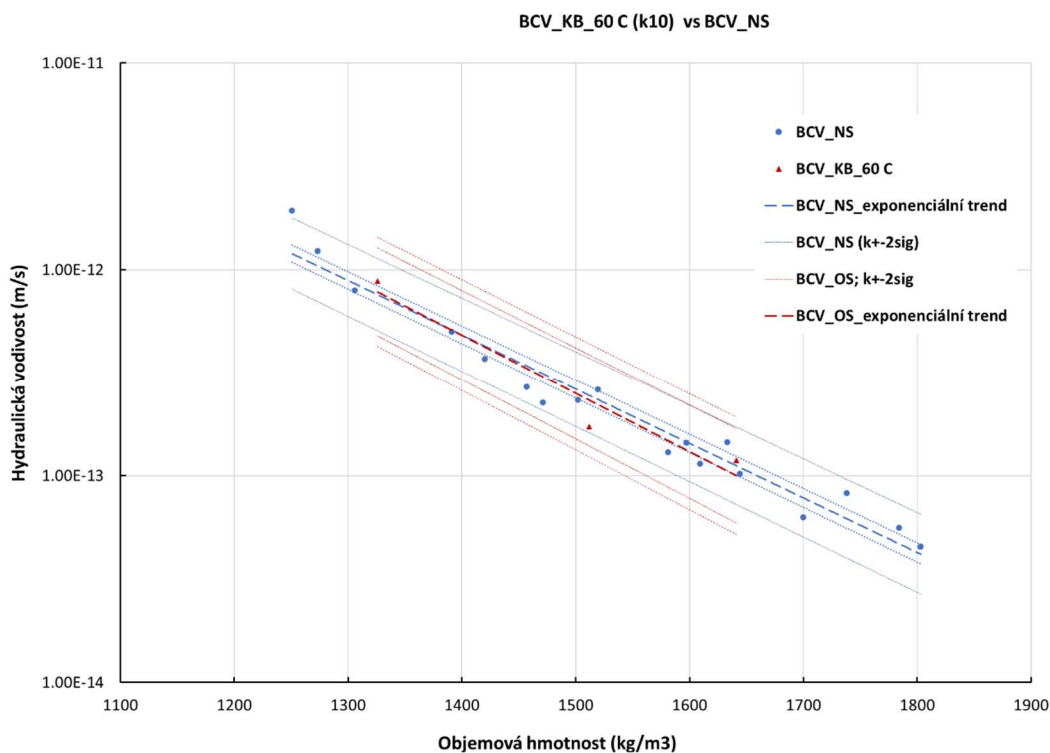
Obr. 78 Porovnání hydraulické vodivosti a charakteristických křivek bentonitu BCV_NS a bentonitu BCV_dry_150 C_12 m po 12 měsících tepelného zatěžování teplotou 150 °C v suchém stavu.



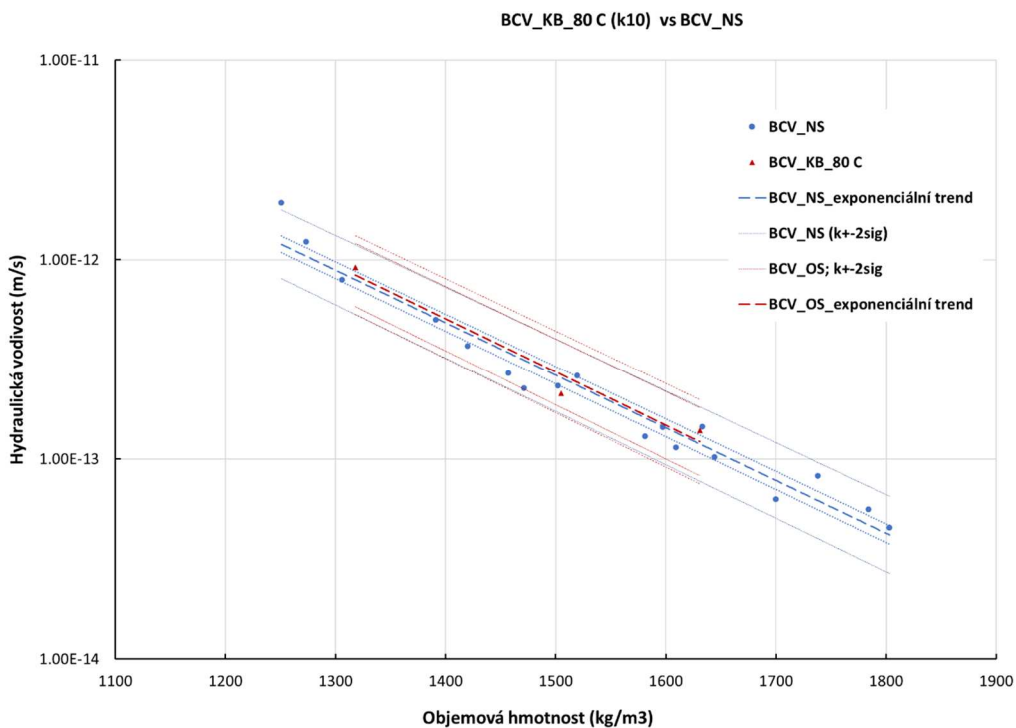
Obr. 79 Porovnání hydraulické vodivosti a charakteristických křivek dvou sad bentonitu BCV_NS získaných z laboratoře ČVUT (BCV_NS) a z laboratoře UK (BCV_KB_20C).



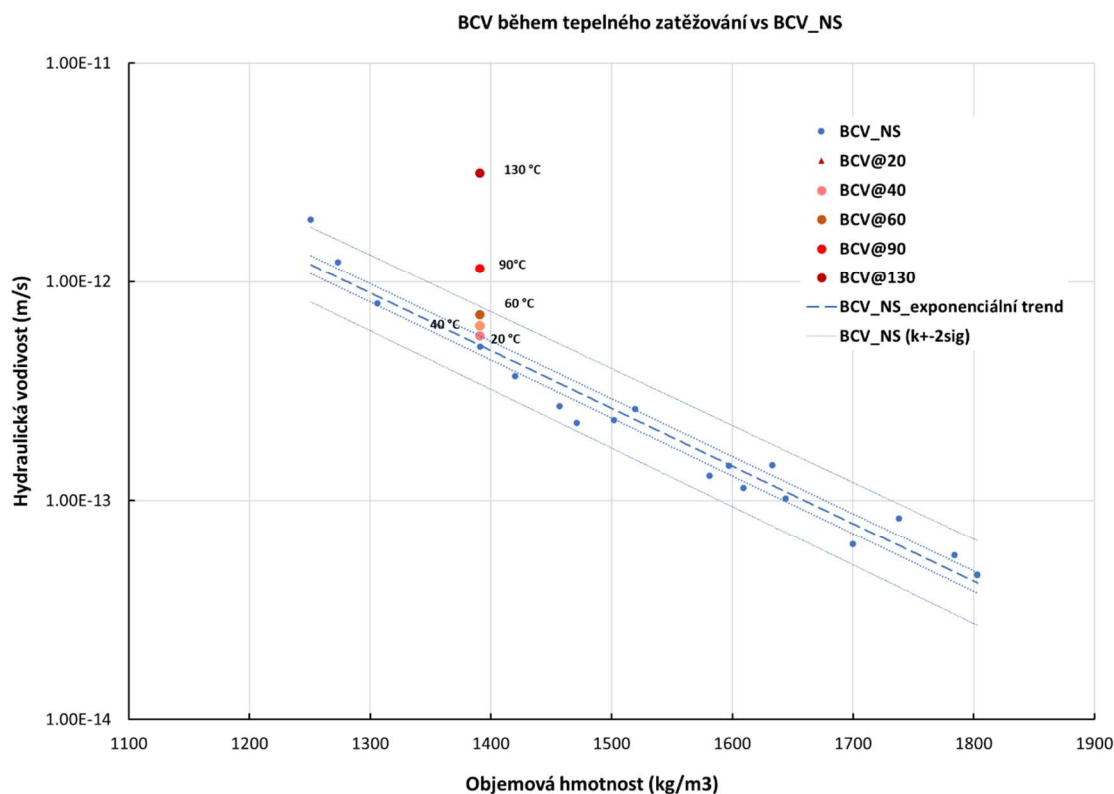
Obr. 80 Porovnání hydraulické vodivosti a charakteristických křivek bentonitu BCV_NS a bentonitu BCV_KB_40 C v průběhu tepelného zatěžování 40 °C. Hydraulická vodivost přepočtena na referenční teplotu $t = 10$ °C.



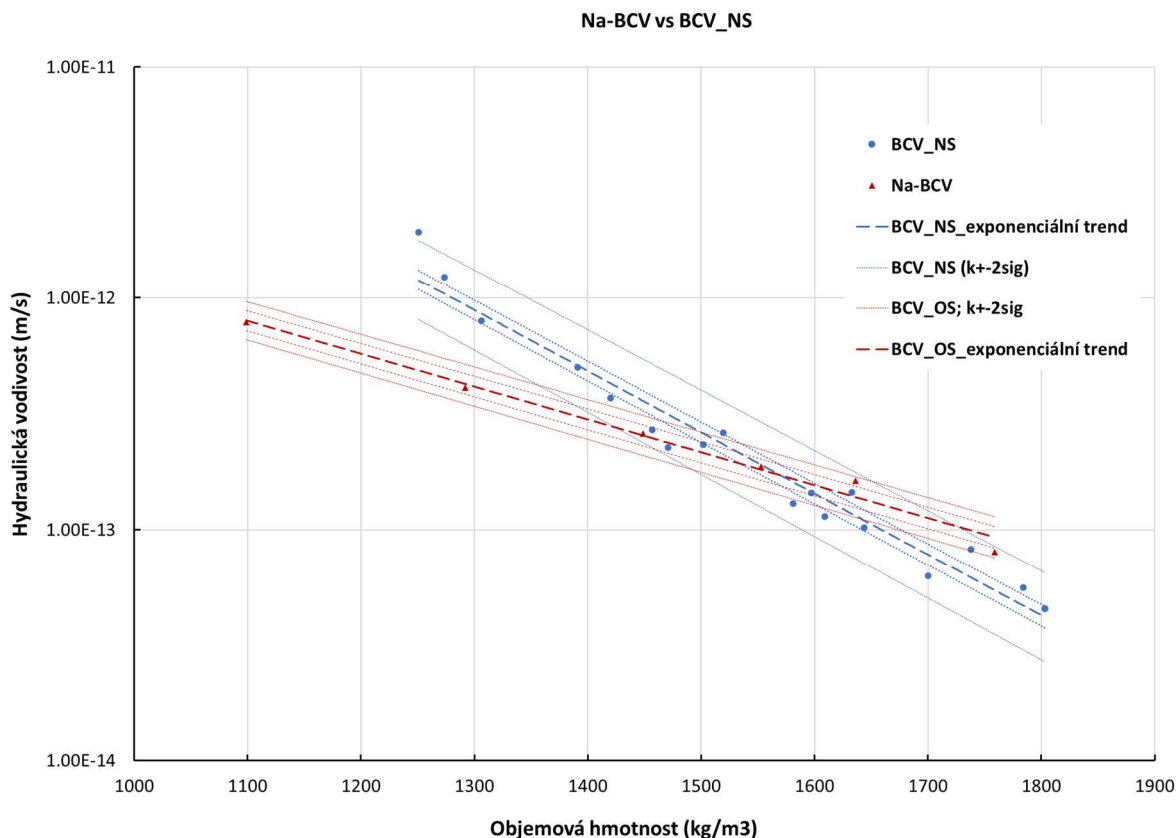
Obr. 81 Porovnání hydraulické vodivosti a charakteristických křivek bentonitu BCV_NS a bentonitu BCV_KB_60 C v průběhu tepelného zatěžování 60 °C. Hydraulická vodivost přepočtena na referenční teplotu $t = 10$ °C.



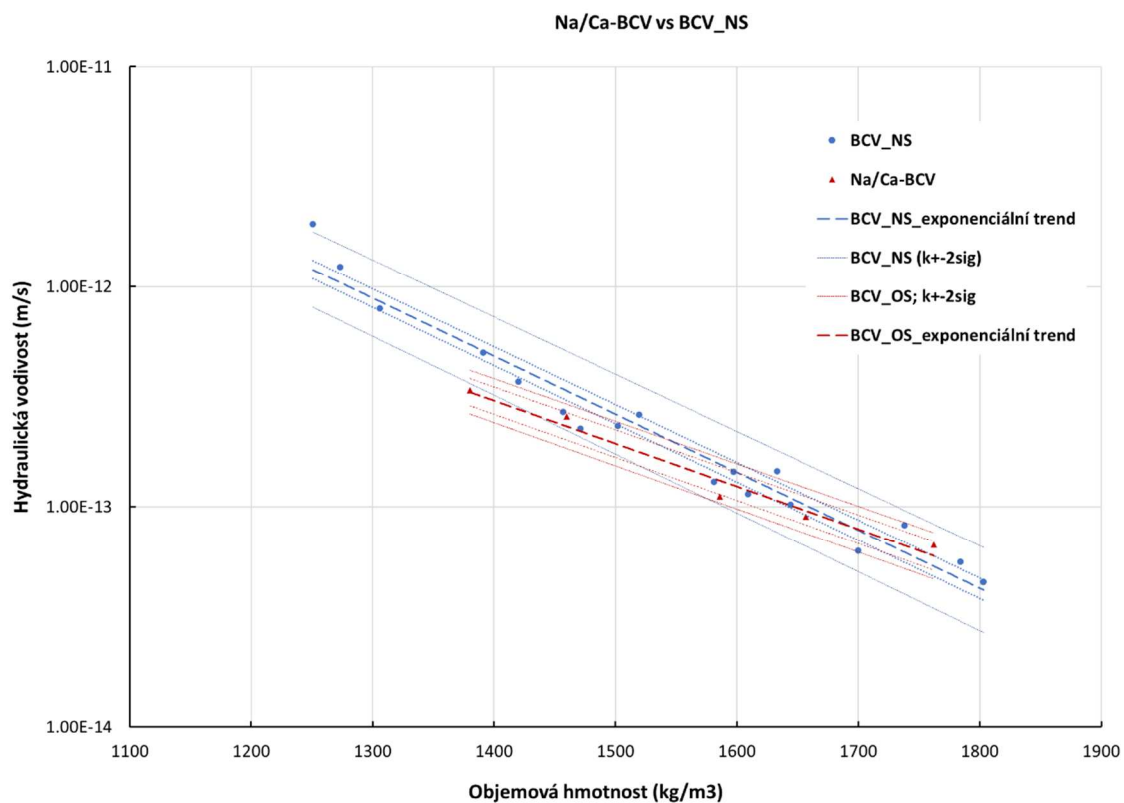
Obr. 82 Porovnání hydraulické vodivosti a charakteristických křivek bentonitu BCV_NS a bentonitu BCV_KB_80 C v průběhu tepelného zatěžování 80 °C. Hydraulická vodivost přepočtena na referenční teplotu $t = 10$ °C.



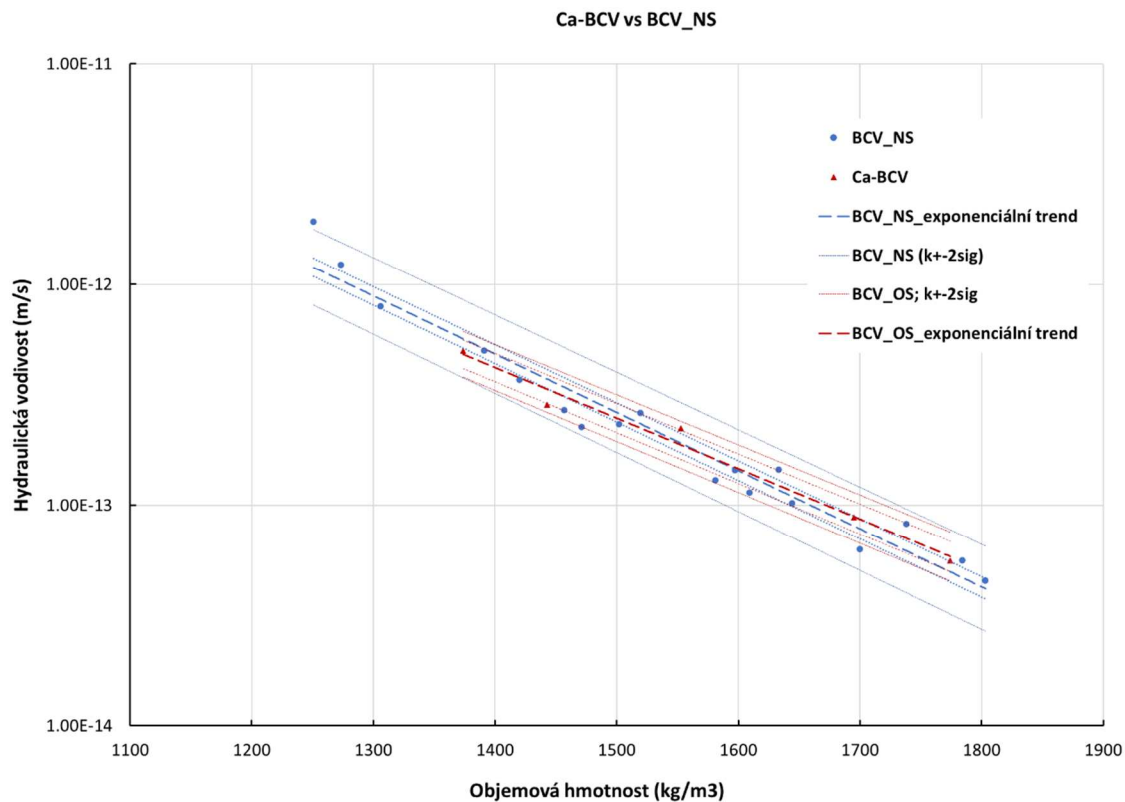
Obr. 83 Porovnání hydraulické vodivosti bentonitu BCV_NS a bentonitu BCV v průběhu tepelného zatěžování teplotou 40 °C, 60 °C, 90 °C a 130 °C. Všechny hodnoty hydraulické vodivosti jsou přepočítány na referenční teplotu $t = 10 \text{ °C}$.



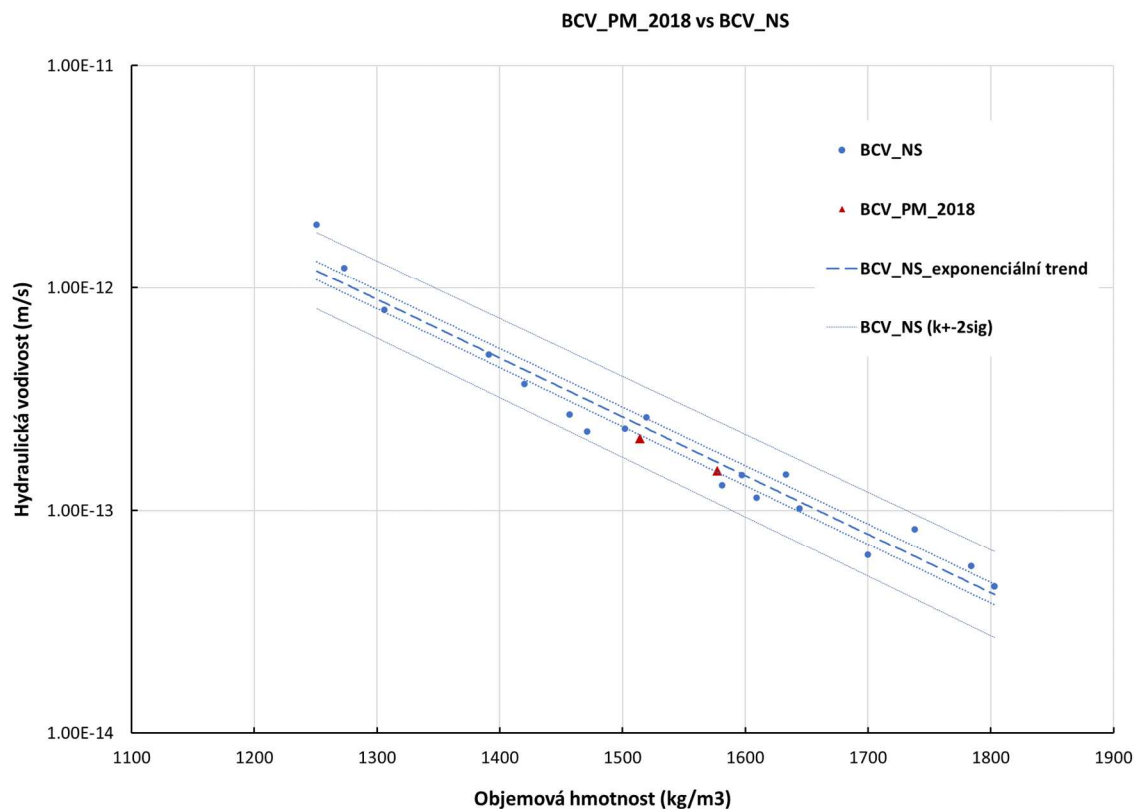
Obr. 84 Porovnání hydraulické vodivosti bentonitu BCV_NS a Na formy BCV_NS (označeno Na-BCV).



Obr. 85 Porovnání hydraulické vodivosti bentonitu BCV_NS a Na/Ca formy BCV_NS (označeno Na/Ca-BCV).



Obr. 86 Porovnání hydraulické vodivosti bentonitu BCV_NS a Ca formy BCV_NS (označeno Ca-BCV).



Obr. 87 Porovnání hydraulické vodivosti bentonitu BCV_NS a peletizované formy bentonitu BCV_NS (označeno BCV_PM_2018).

V tabulce Tab. 7 je celkové vyhodnocení ovlivnění hydraulické vodivosti tepelným zatížením bentonitu BCV v suchém a vlhkém stavu.

Hodnocení je vždy vzhledem k nezatíženému bentonitu. Systém hodnocení je následující:

- 0 interval spolehlivost OS bentonitu se nachází z více než 75 % uvnitř intervalu spolehlivosti NS bentonitu.
- + vyšší hodnoty – více než polovina intervalu spolehlivosti nad intervalem spolehlivosti NS bentonitu.
- ++ významně vyšší hodnoty – pás spolehlivosti OS bentonitu mimo pás spolehlivosti NS bentonitu.
- nižší hodnoty – více než polovina intervalu spolehlivosti pod intervalem spolehlivosti NS bentonitu.
- významně nižší hodnoty – pás spolehlivosti OS bentonitu mimo pás spolehlivosti NS bentonitu.

Parametr „orientace“ v tabulce Tab. 7 je vyplněn pouze pokud jsou intervaly spolehlivosti rovnoběžné a jen částečně se překrývají, nebo když k překryvu nedochází. V případě, že jsou charakteristické čáry rovnoběžné je možné uvažovat o jisté systematickosti v chování bentonitu v celém rozsahu sledovaných objemových hmotnostech sušiny. Ve většině případů jsou vůči sobě v obecné poloze, kdy dochází k protnutí, nebo vzájemnému přibližování charakteristických čar. Významné přibližování či oddalování je viditelné v klasifikaci v jednotlivých intervalech.

Tab. 7 Klasifikace ovlivnění hydraulické vodivosti tepelným zatížením bentonitu BCV v suchém a vlhkém stavu. Intervaly se vztahují k rozsahu objemových hmotností a k nim vztaženým charakteristickým křivkám zatíženého bentonitu BCV. N – počet měřených prvků. Velikost intervalu odpovídá $(\rho_{dmax} - \rho_{dmin})/4$. Orientace udává vzájemnou polohu pásů spolehlivosti, v případě, kdy není uvedeno „rovnoběžné“ je poloha obecná. ρ_{dmax} – maximální objemová hmotnost sušiny, ρ_{dmin} – minimální objemová hmotnost sušiny.

název bentonitu	n	ρ_{dmin} (kg/m ³)	ρ_{dmax} (kg/m ³)	zatížený bentonit – č. intervalu				orientace
				1.	2.	3.	4.	
BCV_NS	19	1250	1800					
BCV_dry_150 C_6 m	9	1300	1750	+	+	0	0	
BCV_wet_150 C_6 m	5	1250	1450	-	-	-	-	rovnoběžné
BCV_dry_150 C_12 m	9	1310	1780	+	+	+	+	rovnoběžné
BCV_KB_80 C	3	1350	1650	0	0	0	0	
BCV_KB_60 C	3	1320	1650	0	0	0	0	
BCV_KB_40 C	3	1320	1650	0	0	0	0	
BCV_KB_20 C	3	1320	1650	0	0	0	0	
BCV@20	1	1393		bodová data			0	
BCV@40	1	1393		bodová data			0	
BCV@60	1	1393		bodová data			0	
BCV@90	1	1393		bodová data			++	
BCV@130	1	1393		bodová data			++	
Na-BCV	6	1100	1750	--	0	0	0	
Na/Ca-BCV	5	1380	1750	-	0	0	0	
Ca-BCV	5	1380	1750	0	0	0	0	
BCV_PM_2018	2	bodová data		++				

2.9.2 PROP – Rokle

Data pro OS Rokle pocházejí z laboratorních a in-situ experimentů. Data pochází z jednoho zdroje.

V projektu zaměřeném na saturační media (Pacovský et al. 2010a) byl bentonit v obou případech vystavován kombinovaným zatížením teplem a dvěma typům saturačního media. Přirozené podzemní vodě „Josef“ a syntetické „SGW-K“. Testovány byly dva typy bentonitů založené na bentonitu Rokle.

- Čistá Rokle.

- Substrát Mock-Up-CZ (směs bentonitu Rokle - RMN, křemenného písku a grafitu) po zatížení teplotou 60-70 °C po dobu 4 let.

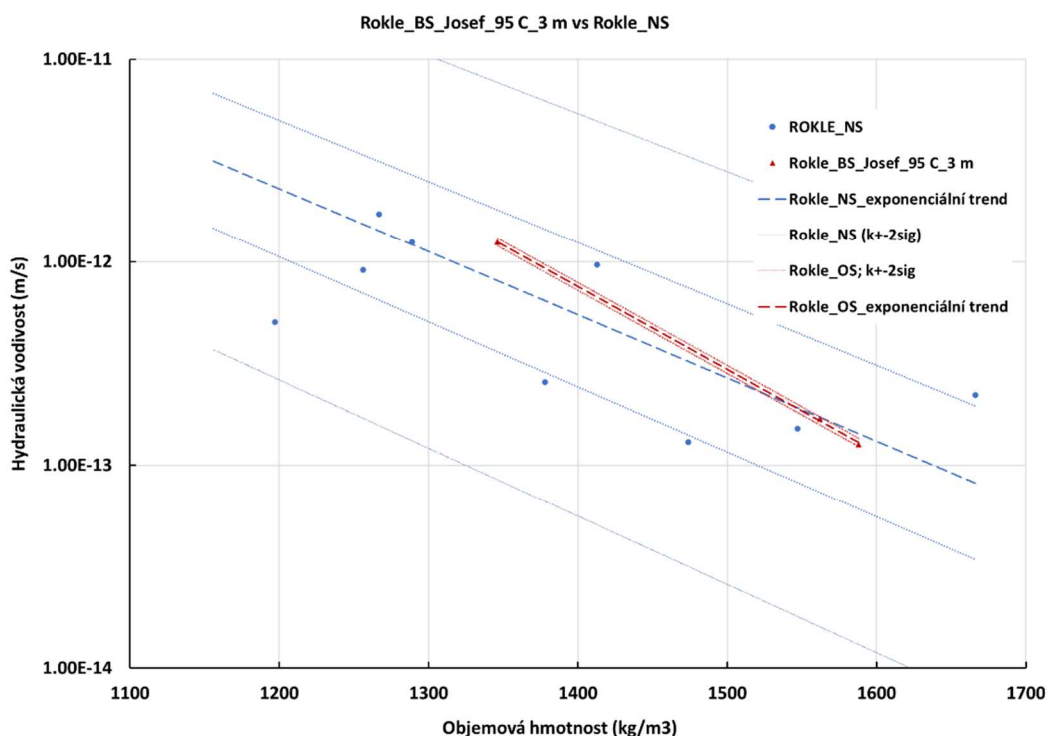
Laboratorní experimenty

- Vzorky bentonitů byly umístěny v tlakových nádobách a zality saturačním médiem (vodou „Josef“ či „SGW-K“). Procedura spočívala v zahřívání (zatěžování) tlakových nádob teplotou 95 °C po dobu 13 dnů a následném vystavení nádob běžné laboratorní teplotě (1 den). Odběry byly poté provedeny po 3, 6, 12 a 18 měsících (Pacovský et al. 2010a).

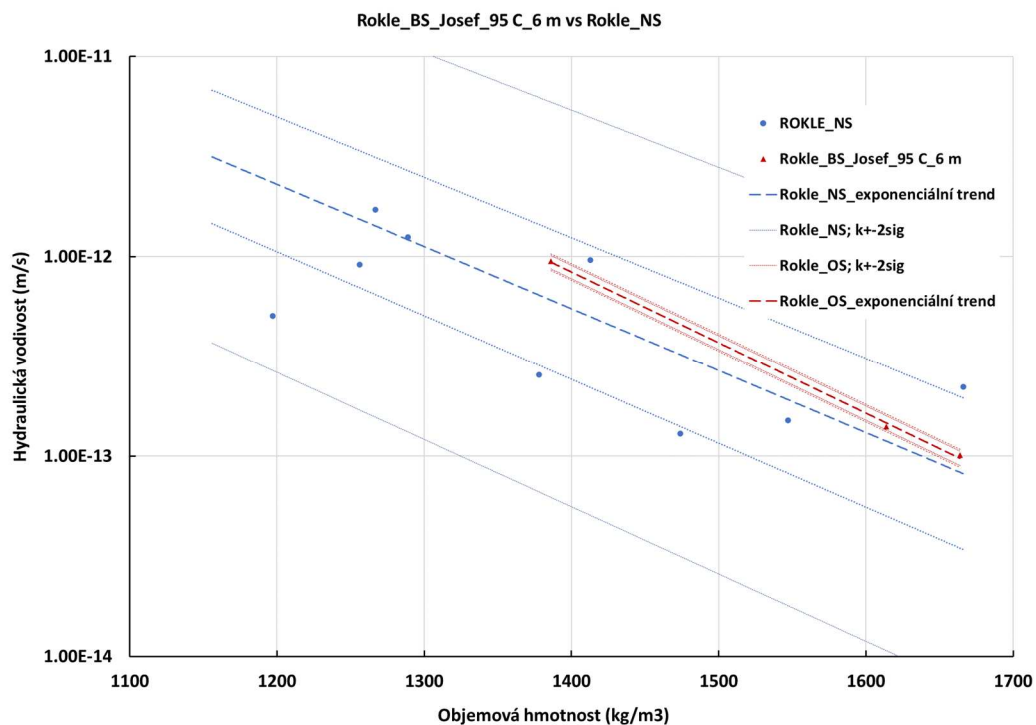
In-situ experimenty

- Do vrtu v podzemí v blízkosti tepelného zdroje byly umístěny perforované patrony s bentonitovou náplní (Rokle, Mock-Up-CZ). Bentonit byl vystavován přirozeném podzemnímu prostředí. Saturačním médiem byla přirozená voda „Josef“. Náplň patron byla zatěžována teplotou do 100°C. Odběry byly poté provedeny po 3, 6, 12 a 18 měsících a vzorky testovány (Pacovský et al. 2010a). V rámci tohoto projektu byly také měřeny hydraulické vodivosti neovlivněného bentonitu Rokle.

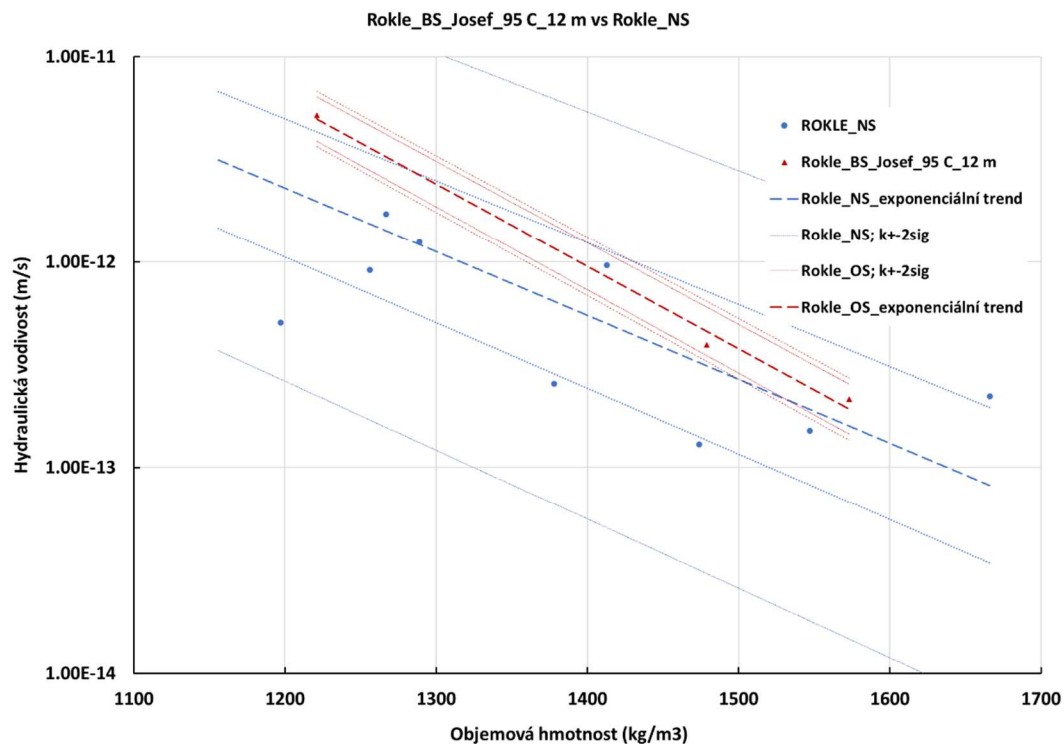
Dalším zdrojem dat měřených na neovlivněném bentonitu jsou hodnoty získané v rámci analýzy mineralogie a těsnících vlastností bentonitů, která byla pro instituci SKB provedena pracovištěm CT (Clay Technology AB). Hydraulická vodivost byla měřena při použití destilované vody jako saturačního média.



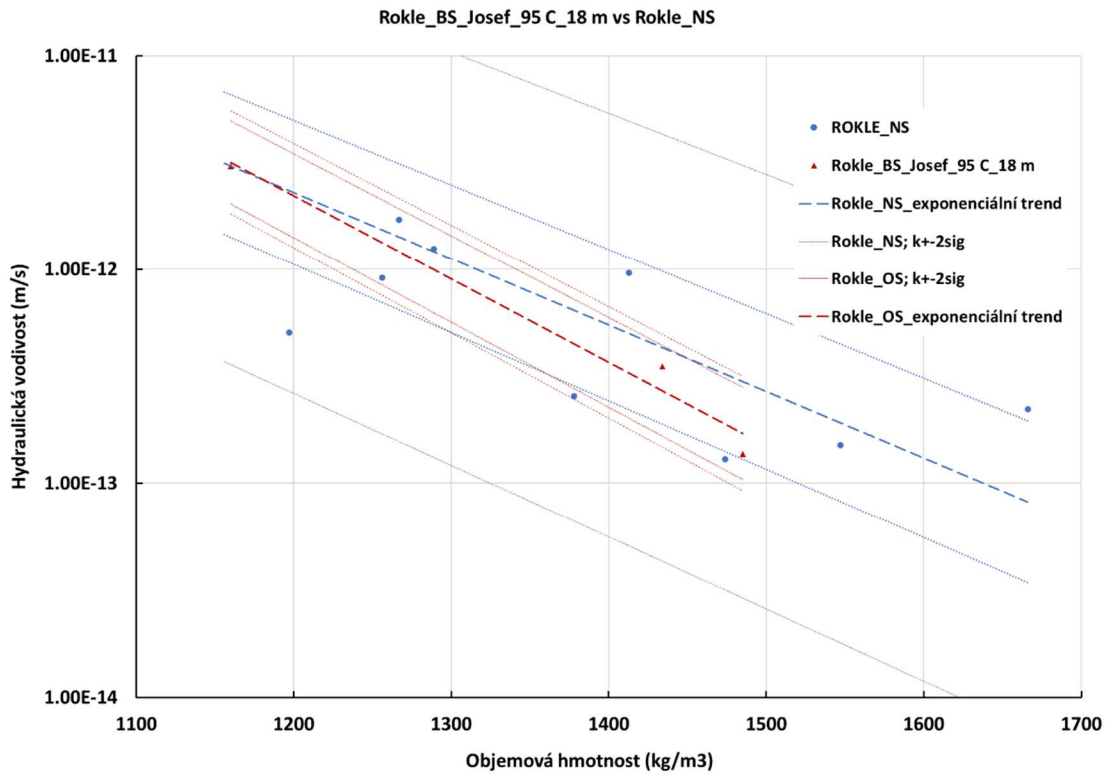
Obr. 88 Porovnání hydraulické vodivosti Rokle_NS a Rokle_BS_Josef_95 C_3 m po 3 měsících tepelného zatěžování při 95 °C a vystavení vodě Josef.



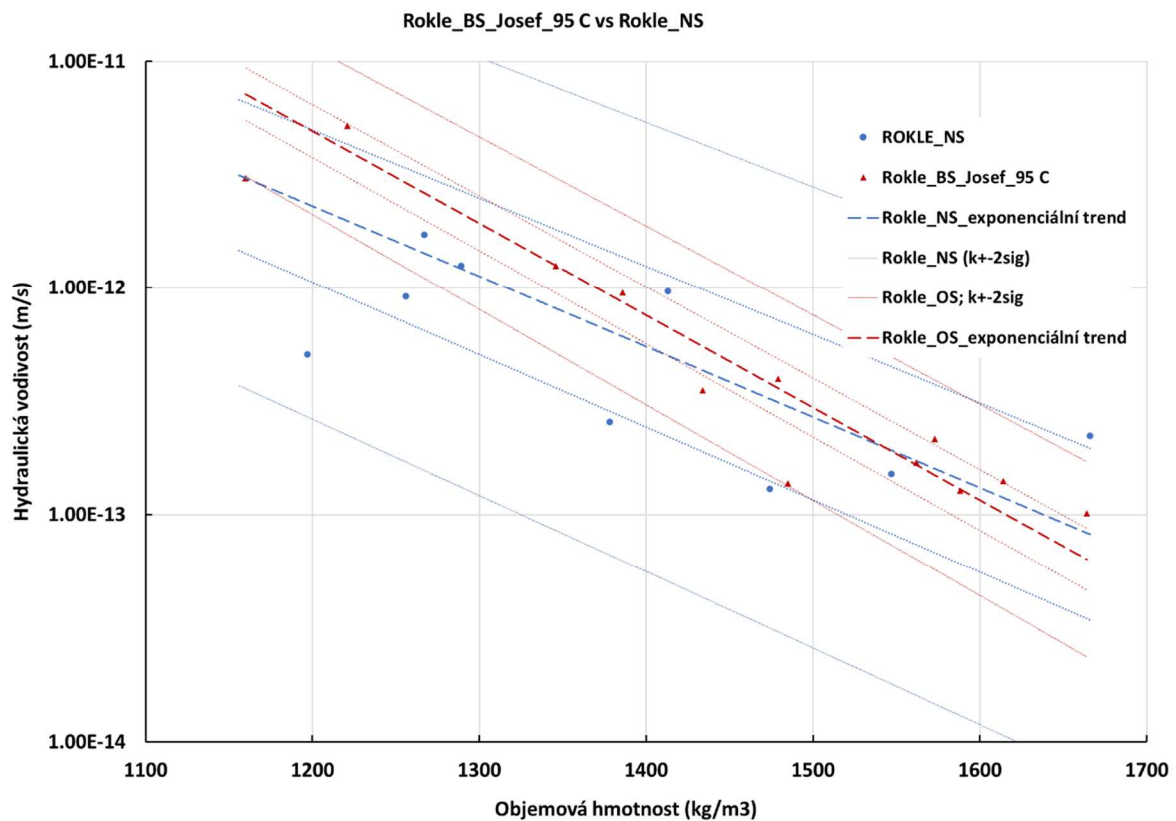
Obr. 89 Porovnání hydraulické vodivosti Rokle_NS a Rokle_BS_Josef_95 C_6 m po 6 měsících tepelného zatěžování při 95 °C a vystavení vodě Josef.



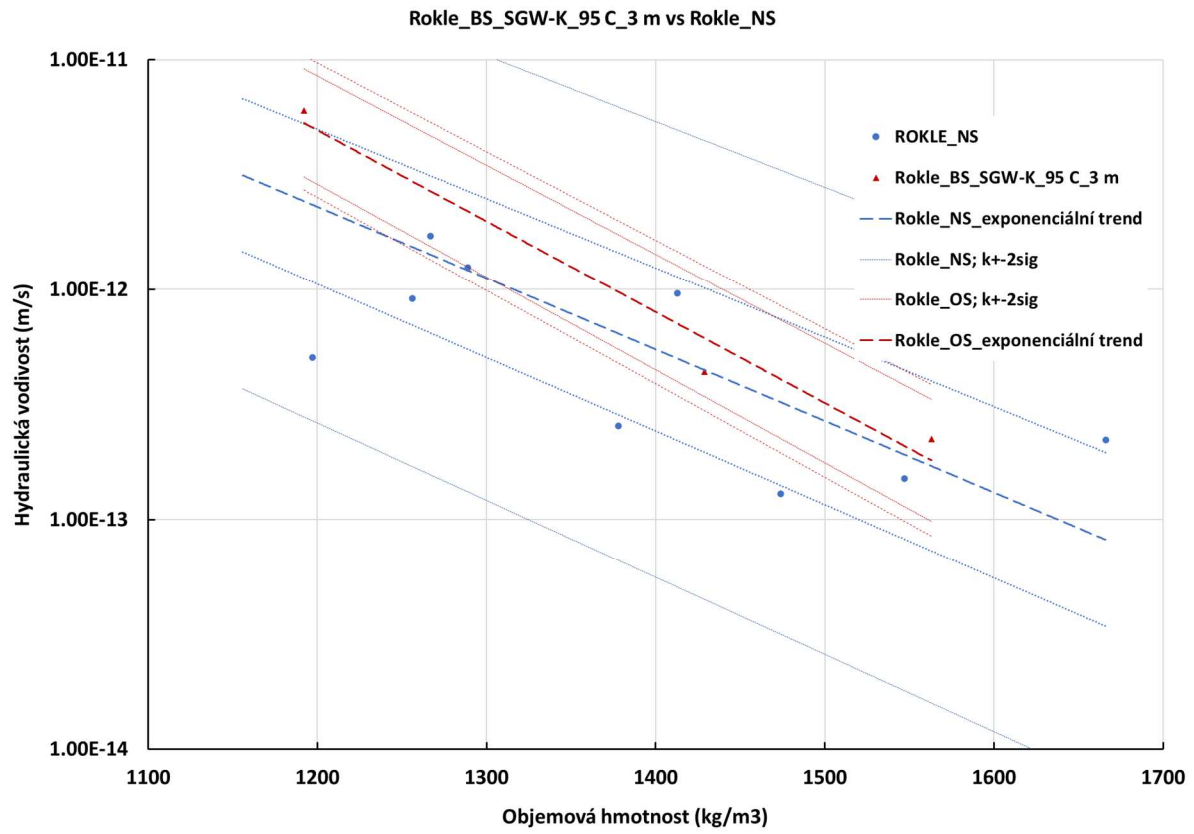
Obr. 90 Porovnání hydraulické vodivosti Rokle_NS a Rokle_BS_Josef_95 C_12 m po 12 měsících tepelného zatěžování při 95 °C a vystavení vodě Josef.



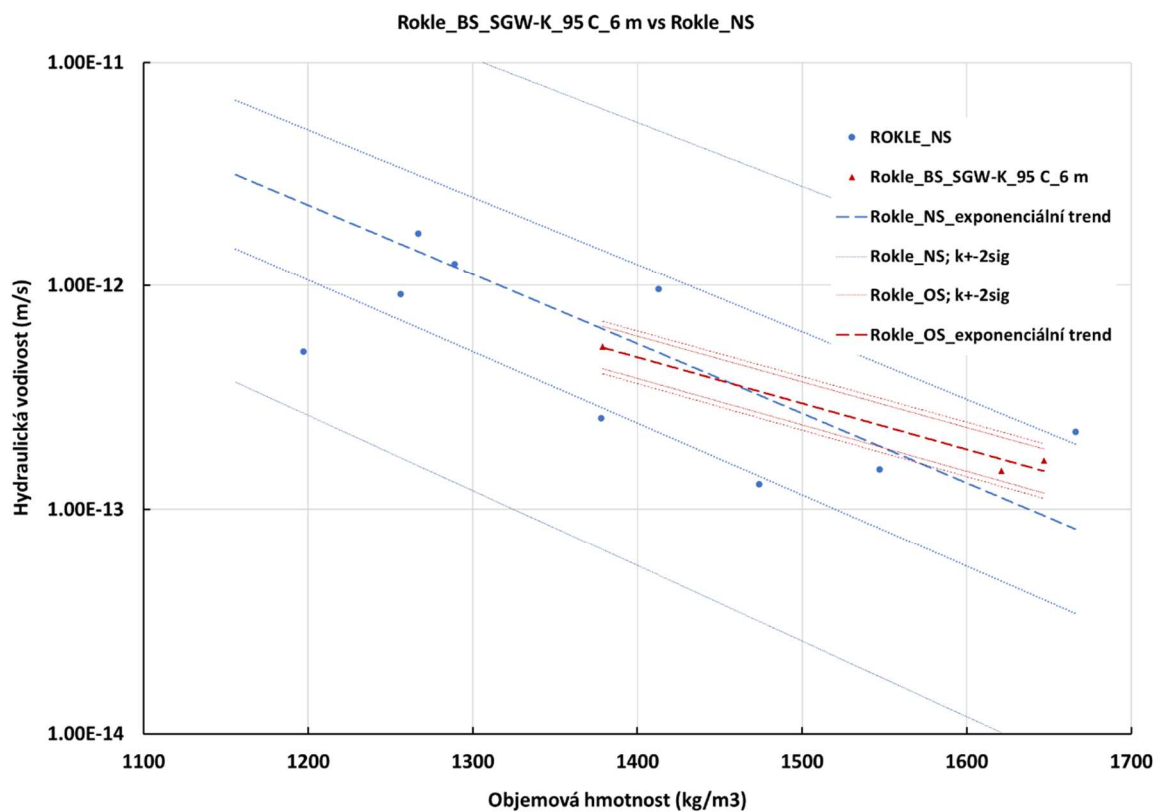
Obr. 91 Porovnání hydraulické vodivosti Rokle_NS a Rokle_BS_Josef_95 C_18 m po 18 měsících tepelného zatěžování při 95 °C a vystavení vodě Josef.



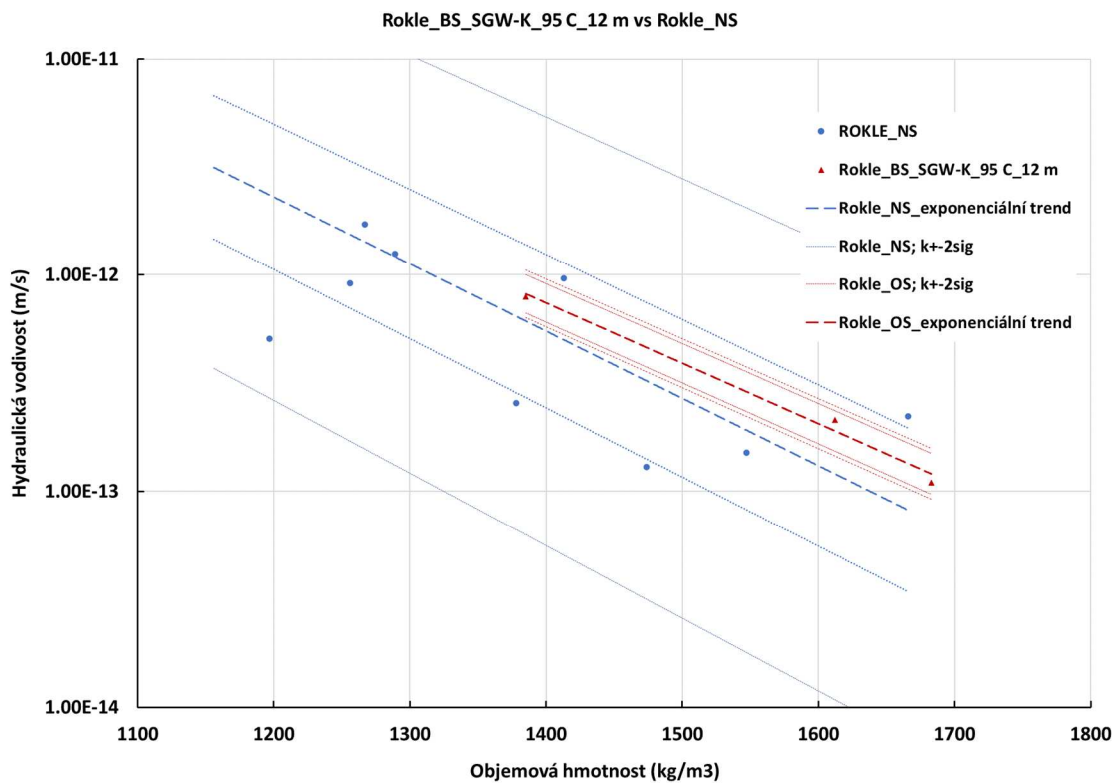
Obr. 92 Porovnání hydraulické vodivosti Rokle_NS a všech vzorků Rokle po tepelném zatěžování při 95 °C, po všech intervalech (3-18 m ěsíců) a vystavení vodě Josef.



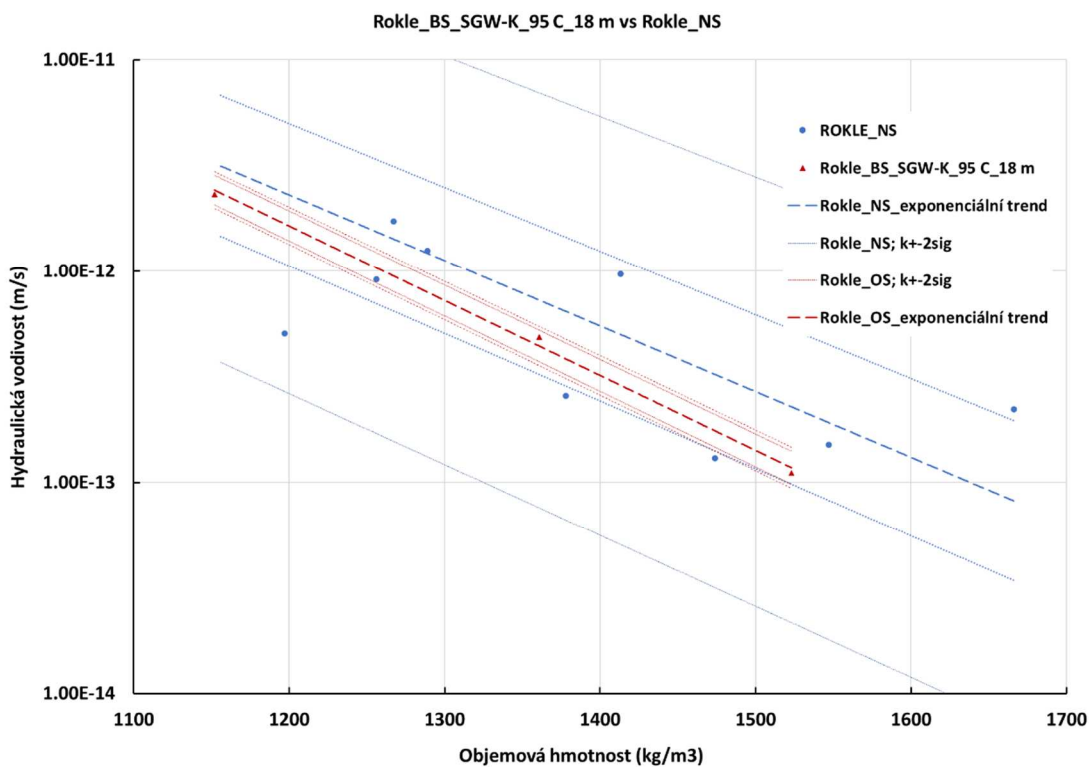
Obr. 93 Porovnání hydraulické vodivosti Rokle_NS a Rokle_BS_SGW-K_95 C_3 m po 3 měsících tepelného zatěžování při 95 °C a vystavení vodě SGW-K.



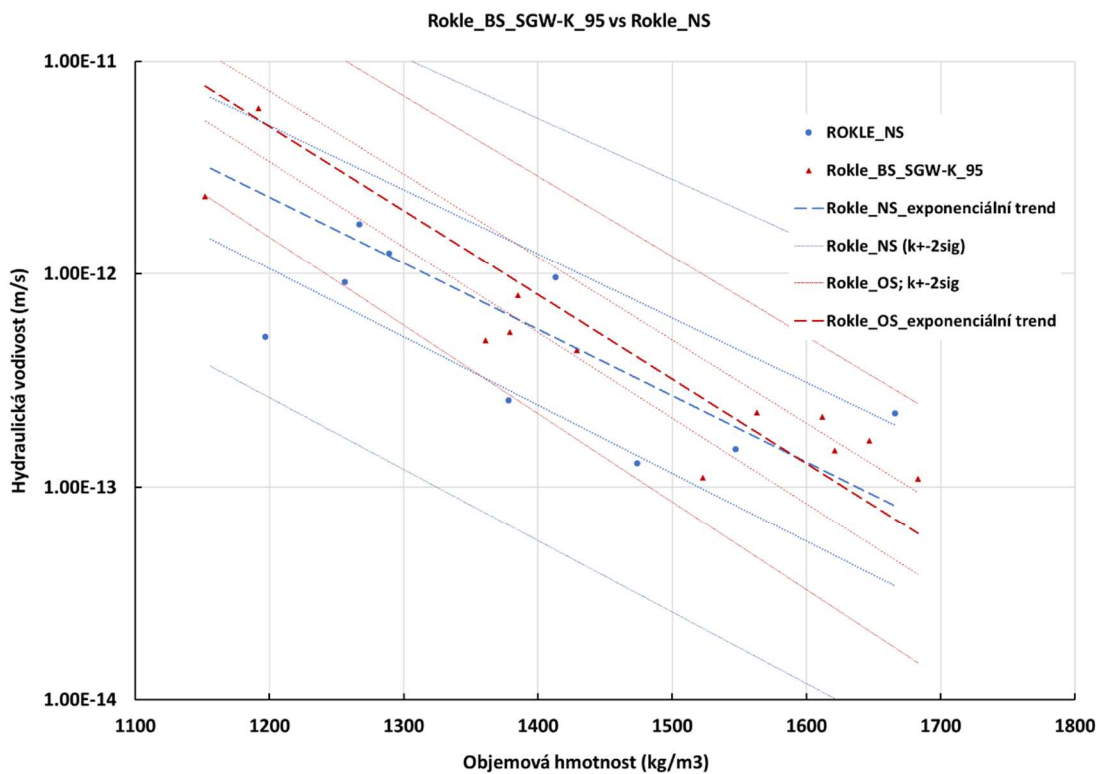
Obr. 94 Porovnání hydraulické vodivosti Rokle_NS a Rokle_BS_SGW-K_95 C_6 m po 6 měsících tepelného zatěžování při 95 °C a vystavení vodě SGW-K.



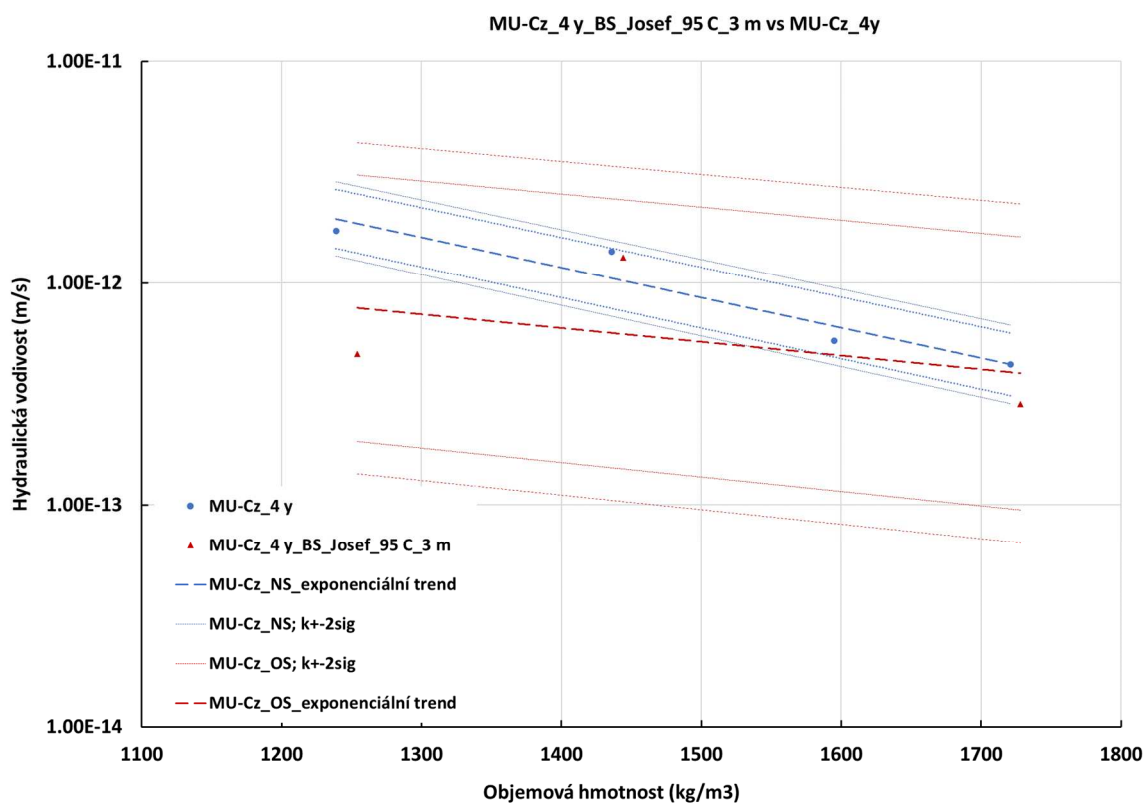
Obr. 95 Porovnání hydraulické vodivosti Rokle_NS a Rokle_BS_SGW-K_95 C_12m po 12 měsících tepelného zatěžování při 95 °C a vystavení vodě SGW-K.



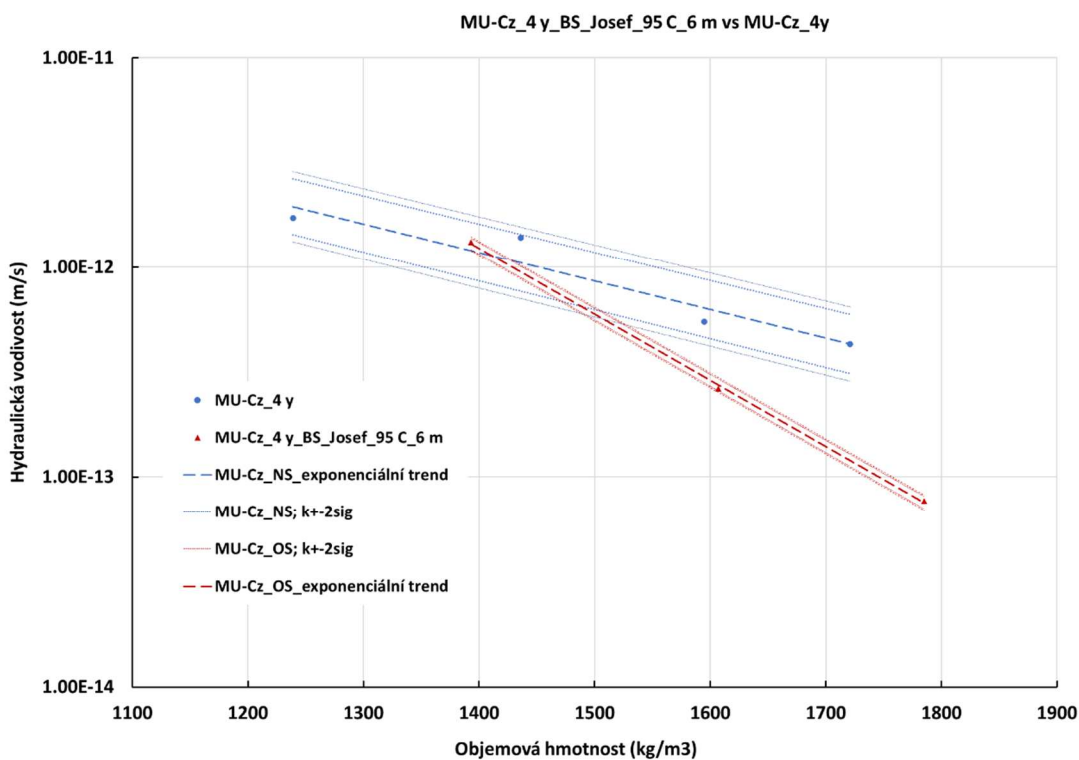
Obr. 96 Porovnání hydraulické vodivosti Rokle_NS a Rokle_BS_SGW-K_95 C_18m po 18 měsících tepelného zatěžování při 95 °C a vystavení vodě SGW-K.



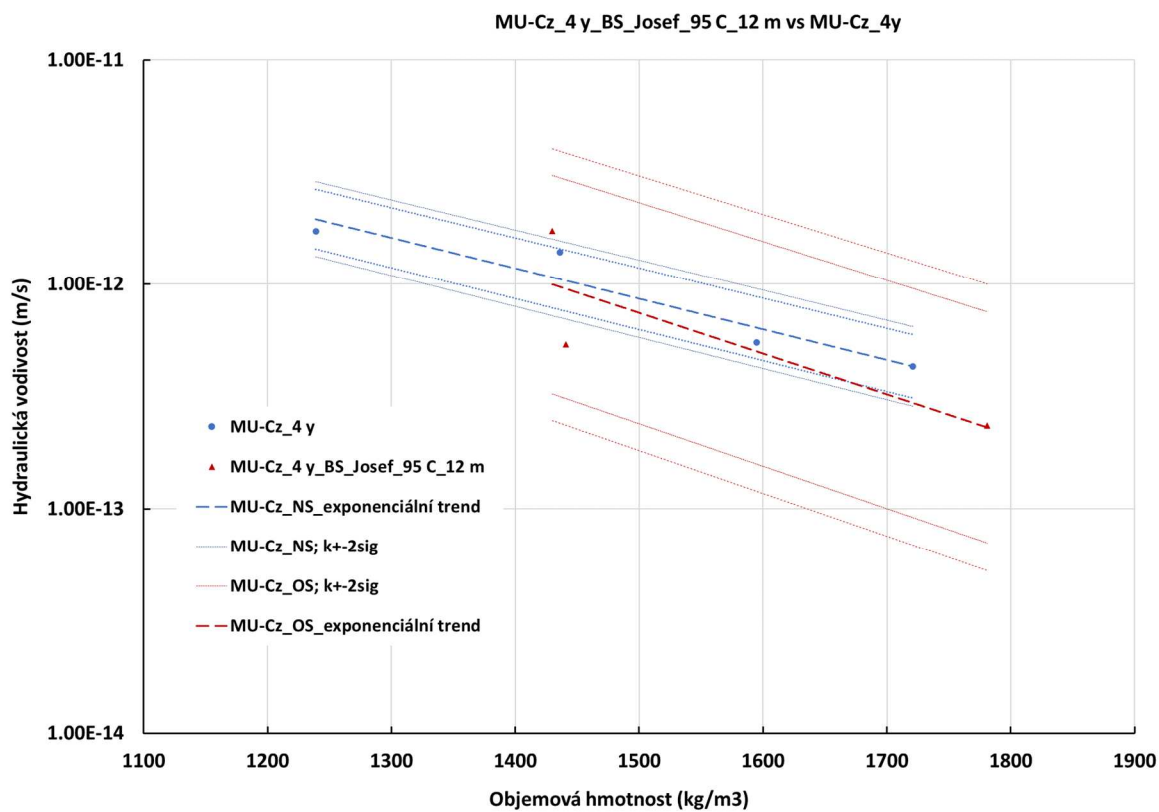
Obr. 97 Porovnání hydraulické vodivosti Rokle_NS a všech vzorků Rokle po tepelném zatěžování při 95 °C, po všech intervalech (3-18 m ěsíců) a vystavení vodě SGW-K.



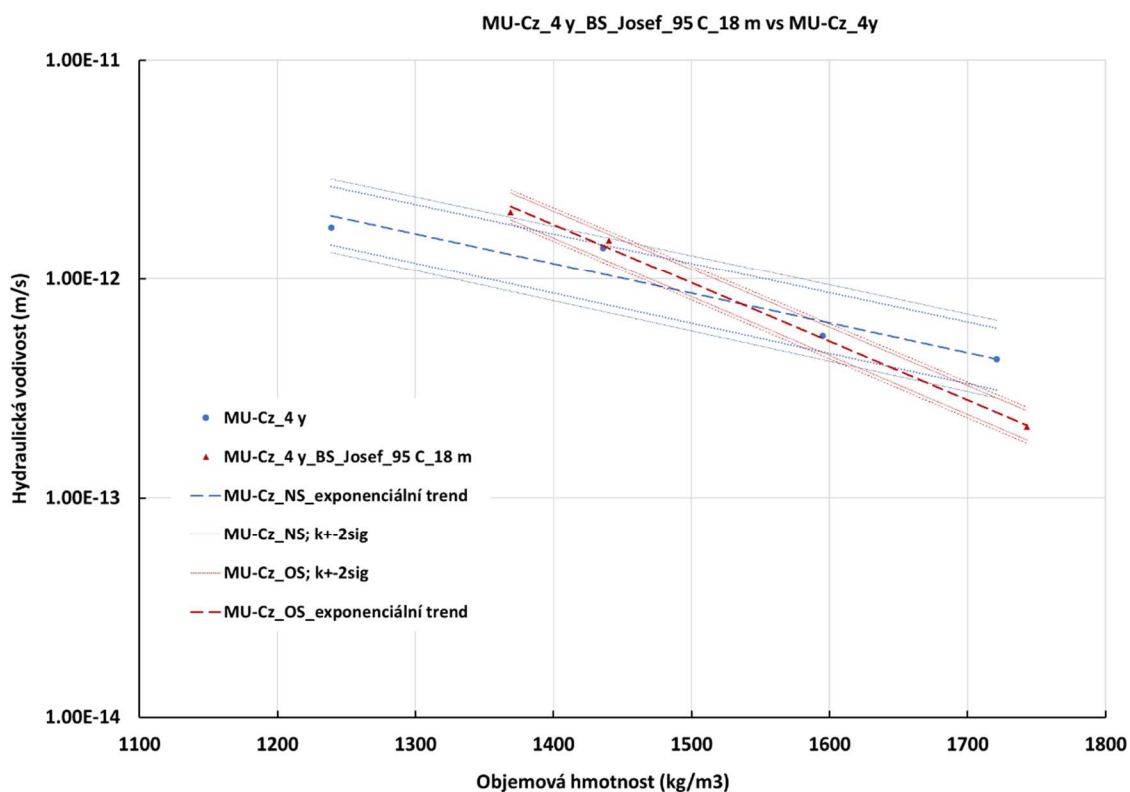
Obr. 98 Porovnání hydraulické vodivosti směsi Mock-Up CZ_NS (označeno MU-Cz_4y) a Mock-Up-CZ po 3 měsících tepelného zatěžování při 95 °C a vystavení vodě Josef (označení MU-Cz_4y_BS_Josef_95 C_3m).



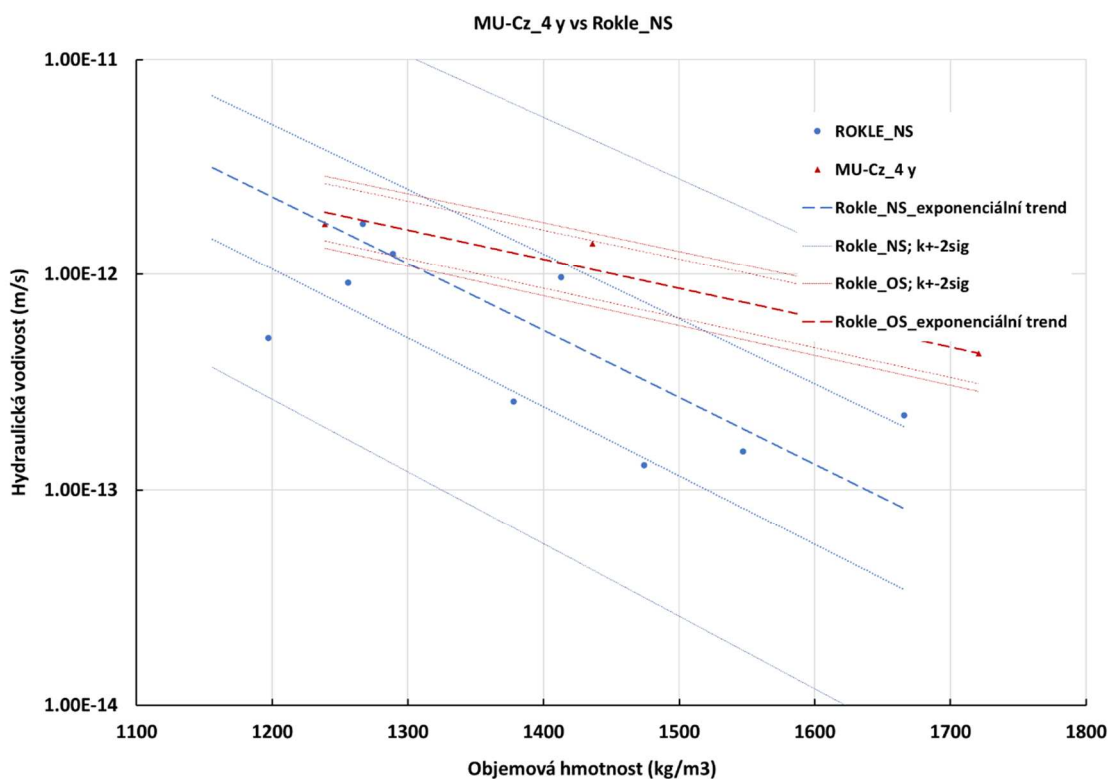
Obr. 99 Porovnání hydraulické vodivosti směsi Mock-Up CZ_NS (označeno MU-Cz_4y) a Mock-Up-CZ po 6 měsících tepelného zatěžování při 95 °C a vystavení vodě Josef (označení MU-Cz_4y_BS_Josef_95 C_6m).



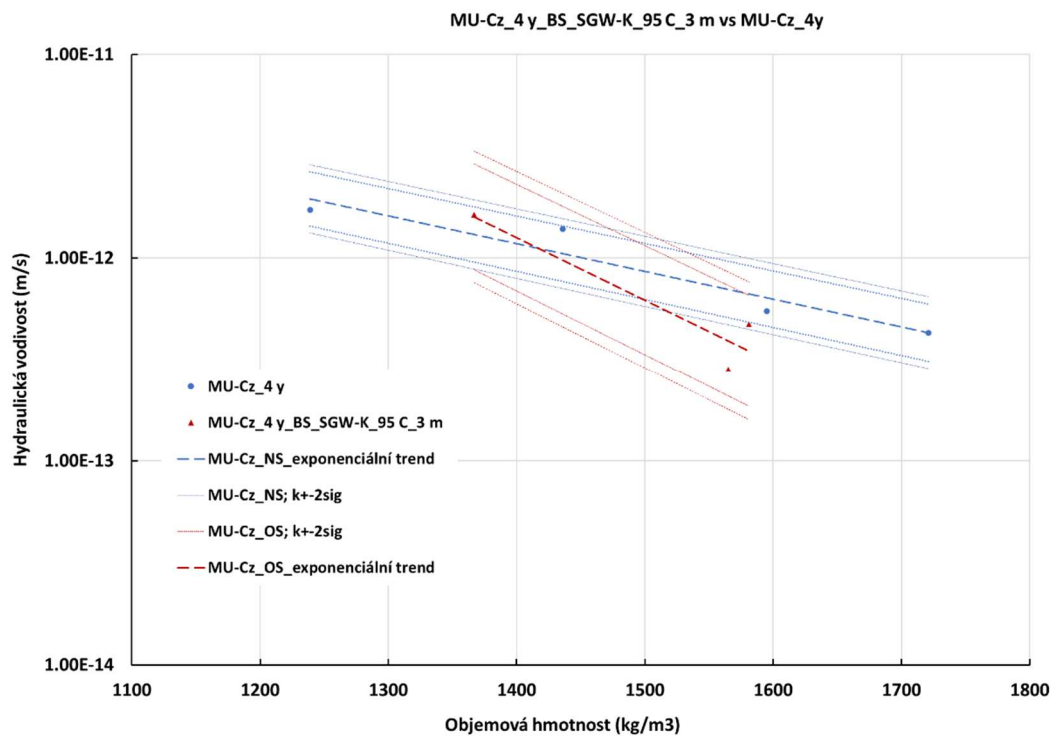
Obr. 100 Porovnání hydraulické vodivosti směsi Mock-Up CZ_NS (označeno MU-Cz_4y) a Mock-Up-CZ po 12 měsících tepelného zatěžování při 95 °C a vystavení vodě Josef (označení MU-Cz_4y_BS_Josef_95 C_12m).



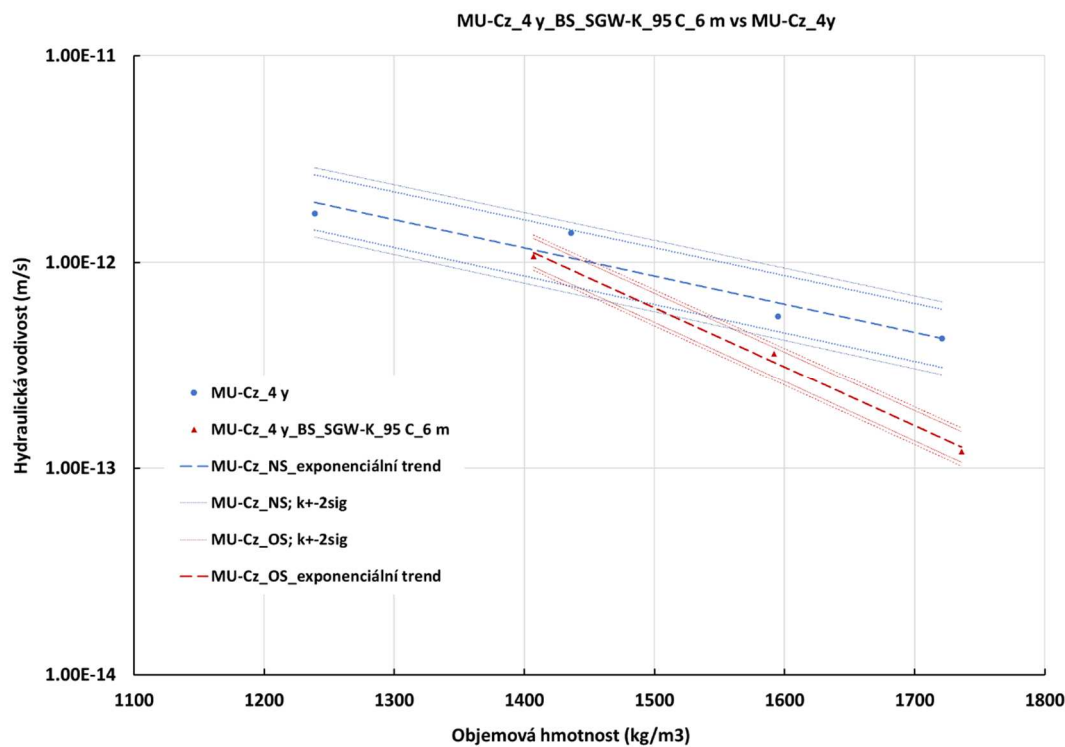
Obr. 101 Porovnání hydraulické vodivosti směsi Mock-Up CZ_NS (označeno MU-Cz_4y) a Mock-Up-CZ po 18 měsících tepelného zatěžování při 95 °C a vystavení vodě Josef (označení MU-Cz_4y_BS_Josef_95 C_18m).



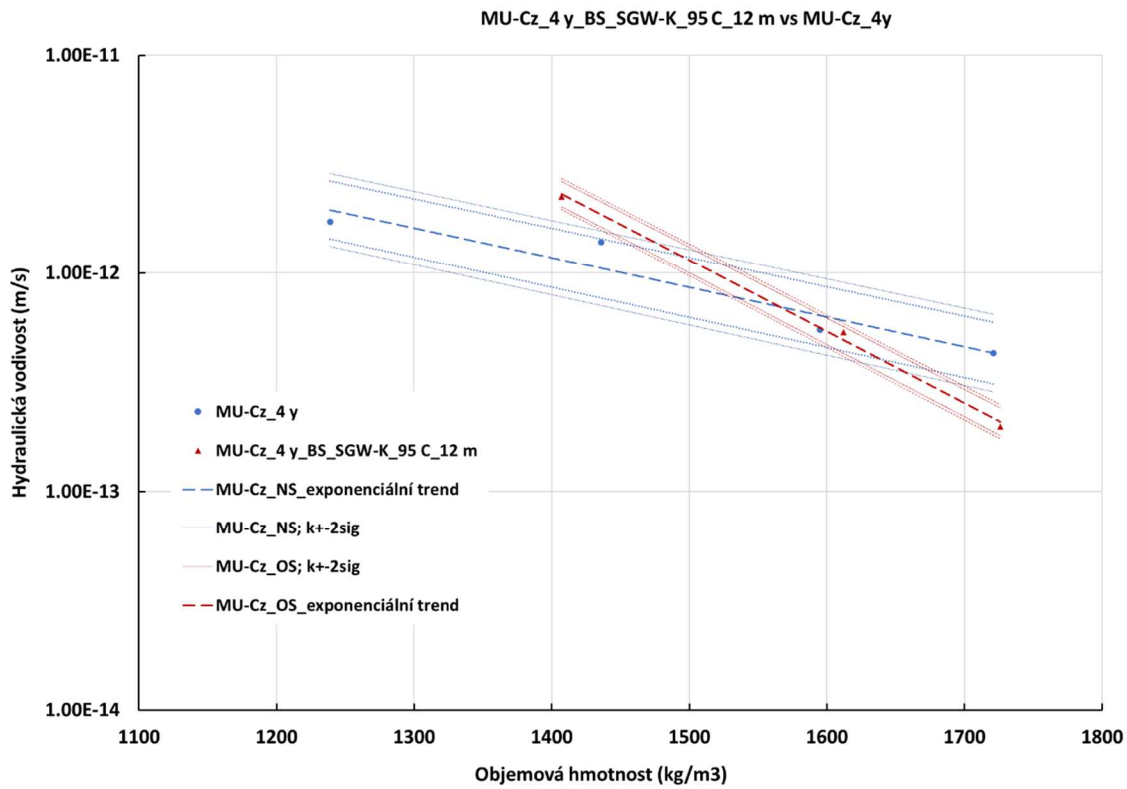
Obr. 102 Porovnání hydraulické vodivosti bentonitu Rokle_NS a bentonitu Mock-Up CZ_NS.



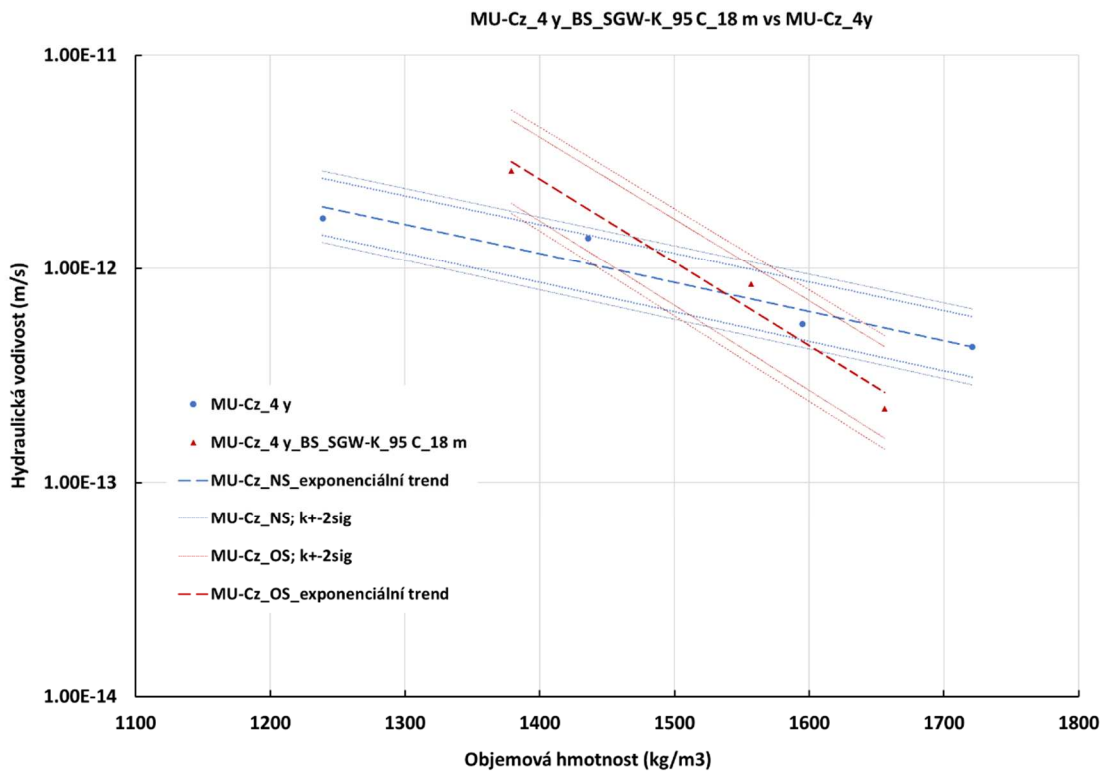
Obr. 103 Porovnání hydraulické vodivosti směsi Mock-Up CZ_NS (označeno MU-Cz_4y) a Mock-Up-CZ po 3 měsících tepelného zatěžování při 95 °C a vystavení vodě SGW-K (označení MU-Cz_4y_BS_SGW-K_95 C_3m).



Obr. 104 Porovnání hydraulické vodivosti směsi Mock-Up CZ_NS (označeno MU-Cz_4y) a Mock-Up-CZ po 6 měsících tepelného zatěžování při 95 °C a vystavení vodě SGW-K (označení MU-Cz_4y_BS_SGW-K_95 C_6m).



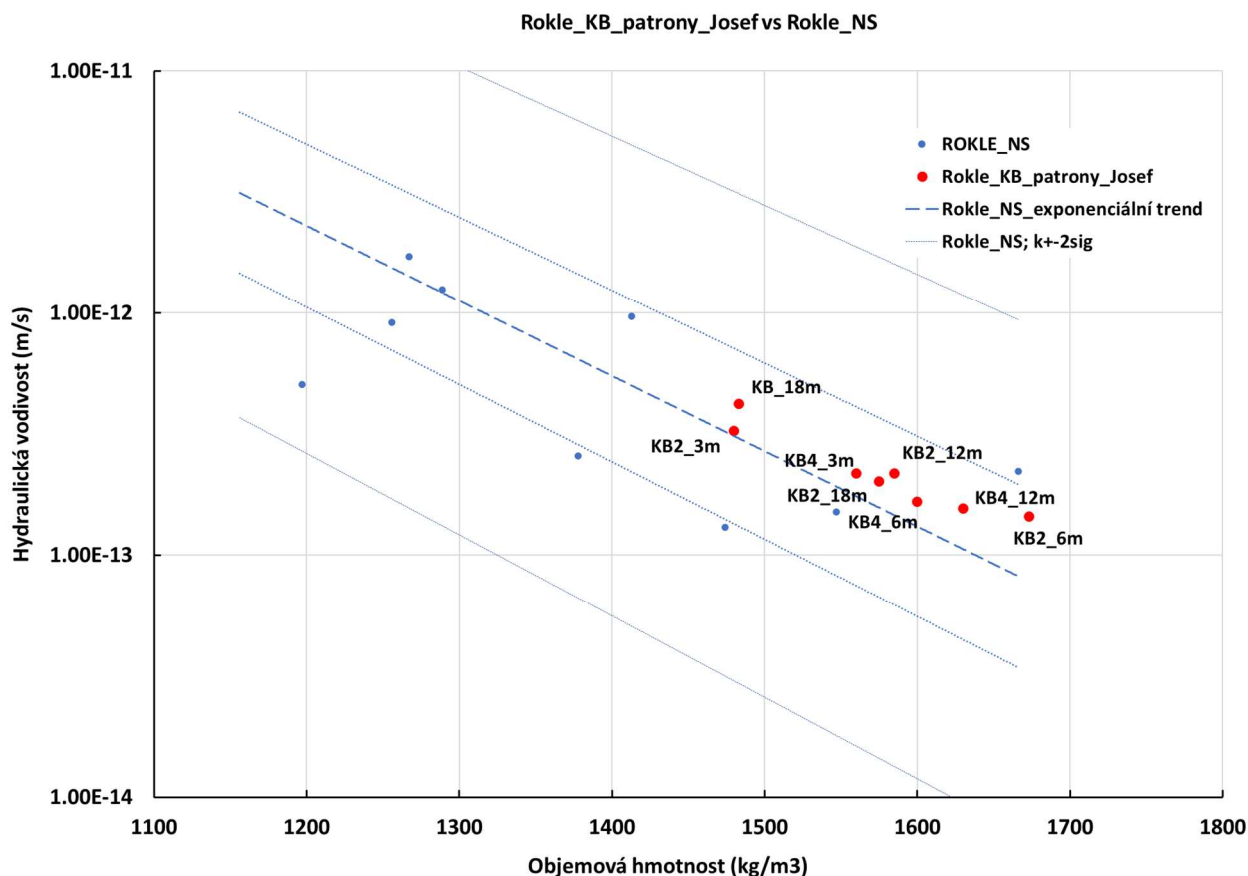
Obr. 105 Porovnání hydraulické vodivosti směsi Mock-Up CZ_NS (označeno MU-Cz_4y) a Mock-Up-CZ po 12 měsících tepelného zatěžování při 95 °C a vystavení vodě SGW-K (označení MU-Cz_4y_BS_SGW-K_95 C_12m).



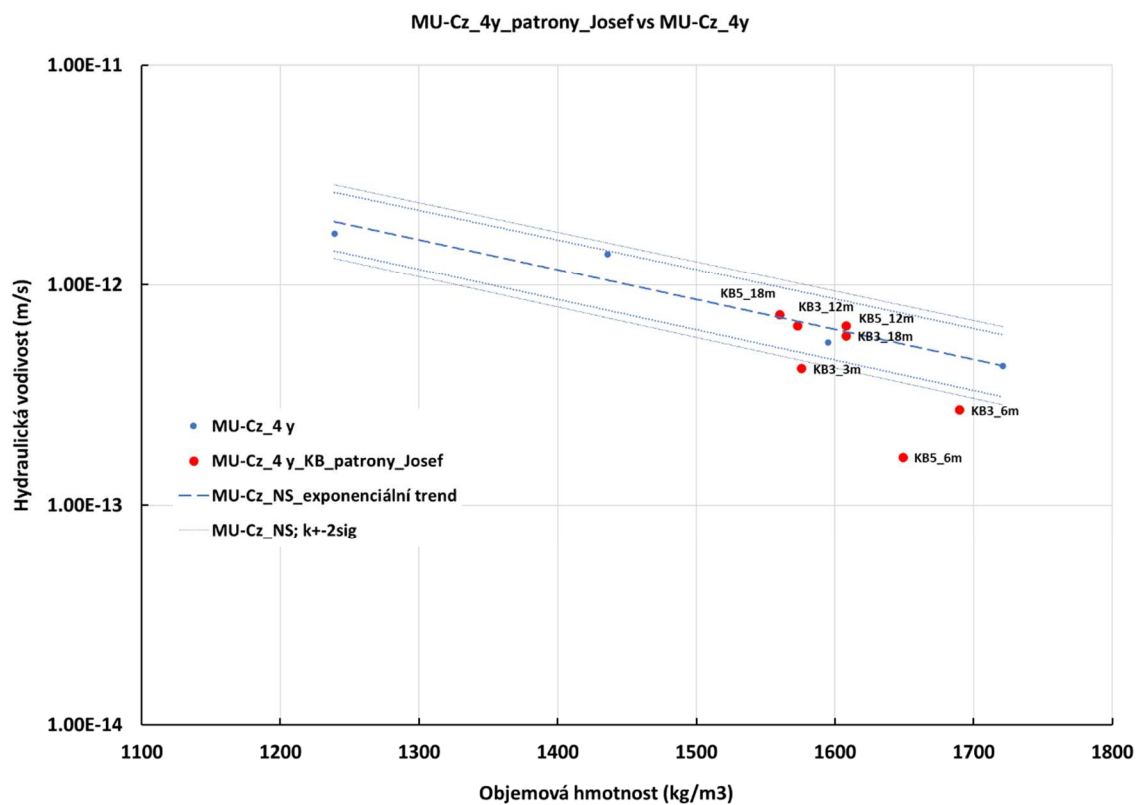
Obr. 106 Porovnání hydraulické vodivosti směsi Mock-Up CZ_NS (označeno MU-Cz_4y) a Mock-Up-CZ po 18 měsících tepelného zatěžování při 95 °C a vystavení vodě SGW-K (označení MU-Cz_4y_BS_SGW-K_95 C_18m).

V grafech na Obr. 107 a Obr. 108 je grafické vyhodnocení vzorků odebraných z in-situ experimentu, kdy byl bentonit vystavován podzemnímu prostředí a vodě „Josef“. V podzemí byl umístěn bentonit Rokle a Mock-up. Z jednotlivých patron byl vyhodnocován vždy jen jeden vzorek pro daný časový úsek zatěžování. Z důvodu nedostatku dat není možné vytvořit charakteristické křivky OS bentonitu a porovnávají jsou pouze jednotlivé hodnoty vůči nezatíženému materiálu (Rokle_NS, Mock-up_NS). V grafech se u jednotlivých bodů nachází informace o čísle patrony (KB) a době zatěžování.

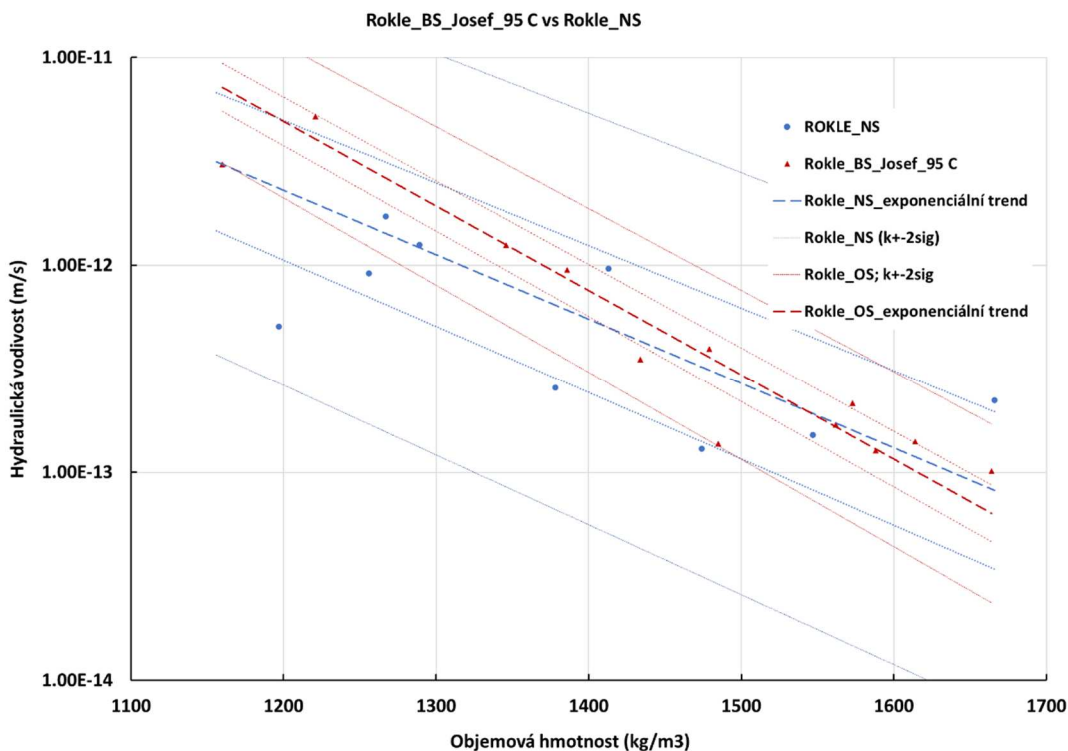
V grafech na Obr. 109 - Obr. 112 je vyhodnocení hydraulické vodivosti bentonitu Rokle a Mock-up po vystavení tepelné zátěži 95 °C při působení jednotlivých druhů vod (Josef, SGW-K). Vyhodnocení na těchto grafech je provedeno pro ovlivněný bentonit bez zohlednění doby trvání zátěže. Charakteristické čáry jsou vytvořeny pro všechna data měřená na tepelně ovlivněném bentonitu nezávisle na době trvání zátěže.



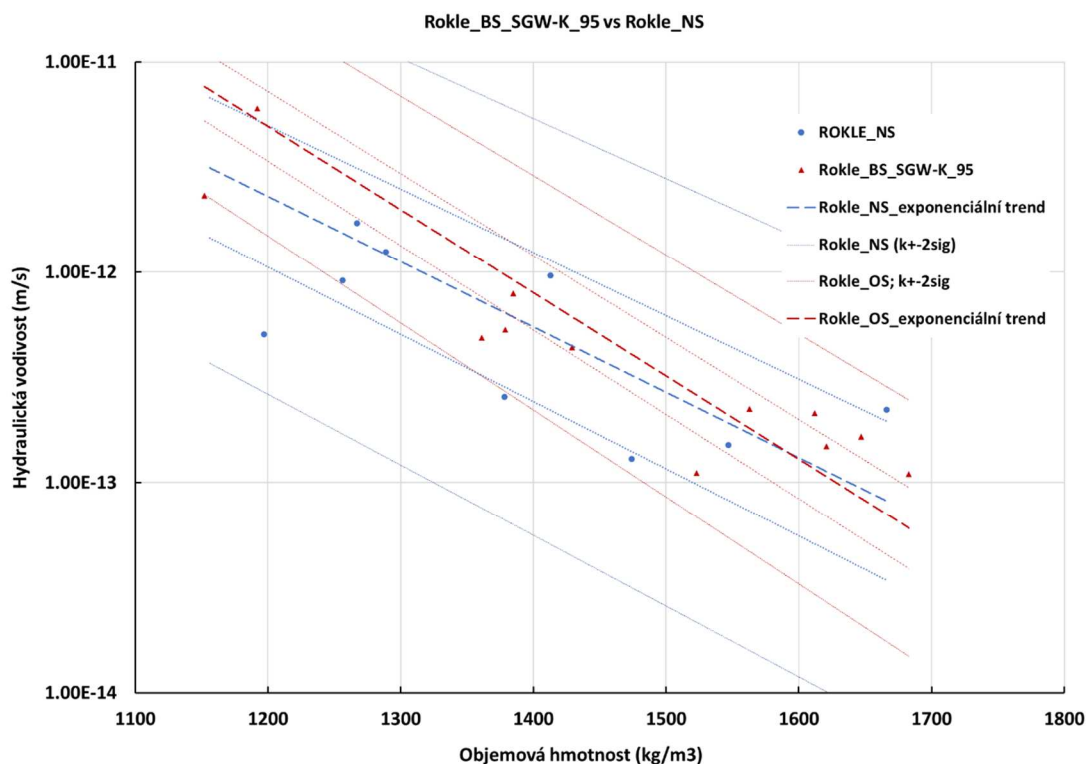
Obr. 107 Porovnání hydraulické vodivosti bentonitu Rokle_NS a bentonitu Rokle umístěného v perforovaných patronách a vystaveného in situ podmínkám v podzemí a vodě Josef. Popisek dat se vztahuje k číslu patrony (KB#) a době zatěžování.



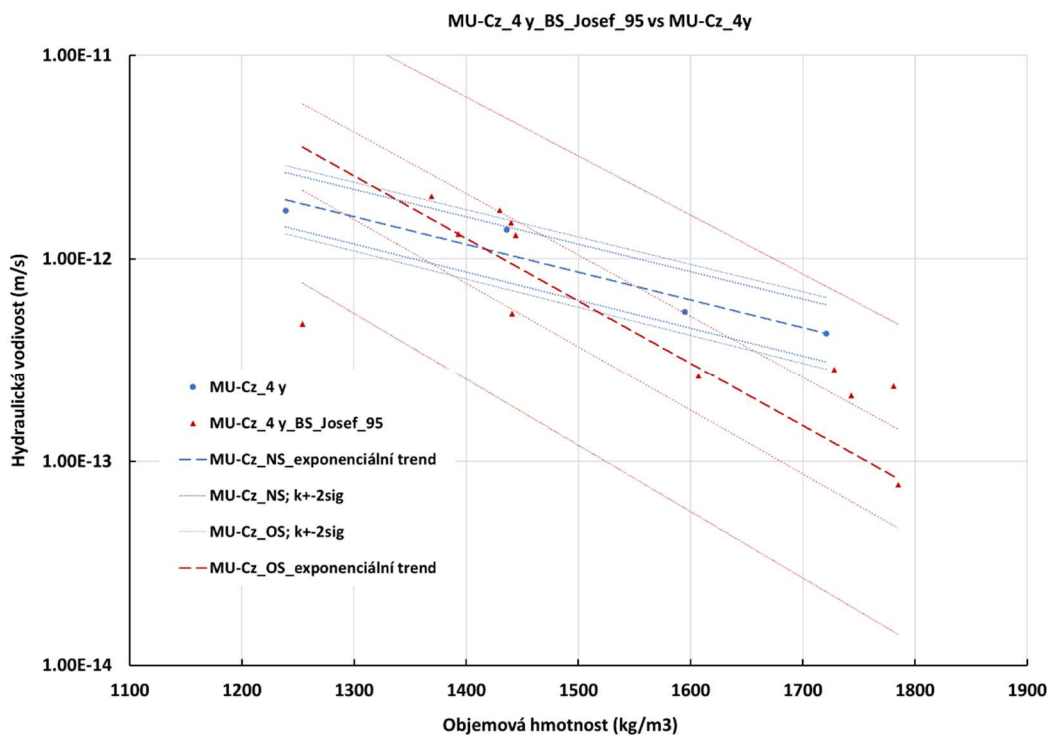
Obr. 108 Porovnání hydraulické vodivosti bentonitu Mock-Up CZ_NS a bentonitu Mock-Up CZ umístěného v perforovaných patronách a vystaveného in situ podmínkám v podzemí a vodě Josef. Popisek dat se vztahuje k číslu patrony (KB#) a době zatěžování.



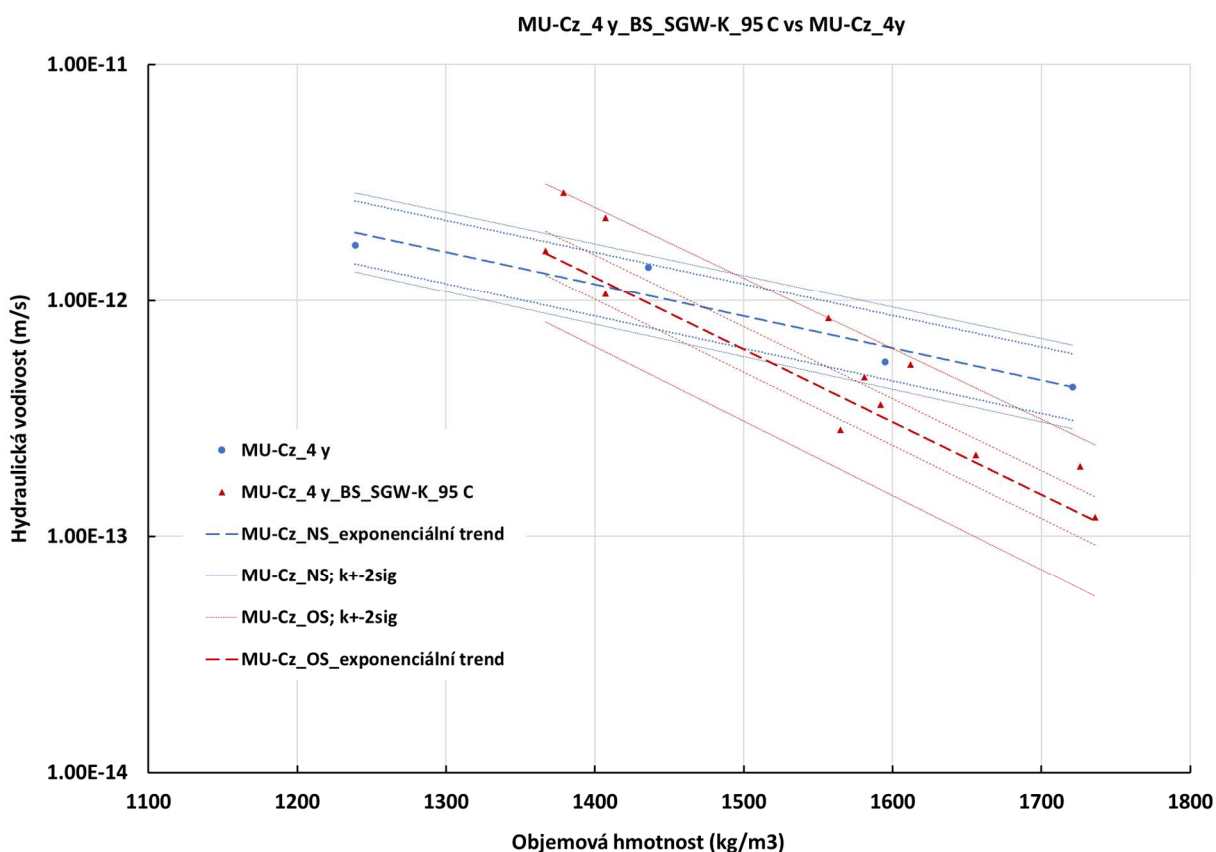
Obr. 109 Porovnání hydraulické vodivosti bentonitu Rokle_NS a ovlivněného bentonitu Rokle zvýšenou teplotou (95 °C) a vystaveného působení vody SGW-K bez zohlednění doby trvání zátěže. Charakteristické čáry jsou pro ovlivněný stav vyhodnoceny ze všech dostupných ověřených dat.



Obr. 110 Porovnání hydraulické vodivosti bentonitu Rokle_NS a ovlivněného bentonitu Rokle zvýšenou teplotou (95 °C) a vystaveného působení vody SGW-K bez zohlednění doby trvání zátěže. Charakteristické čáry jsou pro ovlivněný stav vyhodnoceny ze všech dostupných ověřených dat.



Obr. 111 Porovnání hydraulické vodivosti bentonitu Mock-Up CZ_NS a ovlivněného bentonitu Mock-Up CZ zvýšenou teplotou (95 °C) a vystaveného působení vody Josef bez zohlednění doby trvání zátěže. Charakteristické čáry jsou pro ovlivněný stav vyhodnoceny ze všech dostupných ověřených dat.



Obr. 112 Porovnání hydraulické vodivosti bentonitu Mock-Up CZ_NS a ovlivněného bentonitu Mock-Up CZ zvýšenou teplotou (95 °C) a vystaveného působení vody SGW-K bez zohlednění doby trvání zátěže. Charakteristické čáry jsou pro ovlivněný stav vyhodnoceny ze všech dostupných ověřených dat.

V tabulce Tab. 8 je celkové vyhodnocení ovlivnění hydraulické vodivosti tepelným zatížením bentonitu Rokle.

Hodnocení je vždy vzhledem k nezatíženému bentonitu. Systém hodnocení je následující:

- 0 interval spolehlivosti OS bentonitu se nachází z více než 75 % uvnitř intervalu spolehlivosti NS bentonitu.
- + vyšší hodnoty – více než polovina intervalu spolehlivosti nad intervalem spolehlivosti NS bentonitu.
- ++ významně vyšší hodnoty – pás spolehlivosti OS bentonitu mimo pás spolehlivosti NS bentonitu.
- nižší hodnoty – více než polovina intervalu spolehlivosti pod intervalem spolehlivosti NS bentonitu.
- významně nižší hodnoty – pás spolehlivosti OS bentonitu mimo pás spolehlivosti NS bentonitu.

Parametr „orientace“ v tabulce Tab. 8 je vyplněn pouze pokud jsou intervaly spolehlivosti rovnoběžné a jen částečně se překrývají, nebo když k překryvu nedochází. V případě, že jsou charakteristické čáry rovnoběžné je možné uvažovat o jisté systematičnosti v chování bentonitu v celém rozsahu sledovaných objemových hmotnostech sušiny. Ve většině případů jsou vůči

sobě v obecné poloze, kdy dochází k protnutí, nebo vzájemnému přibližování charakteristických čar. Významné přibližování či oddalování je viditelné v klasifikaci v jednotlivých intervalech.

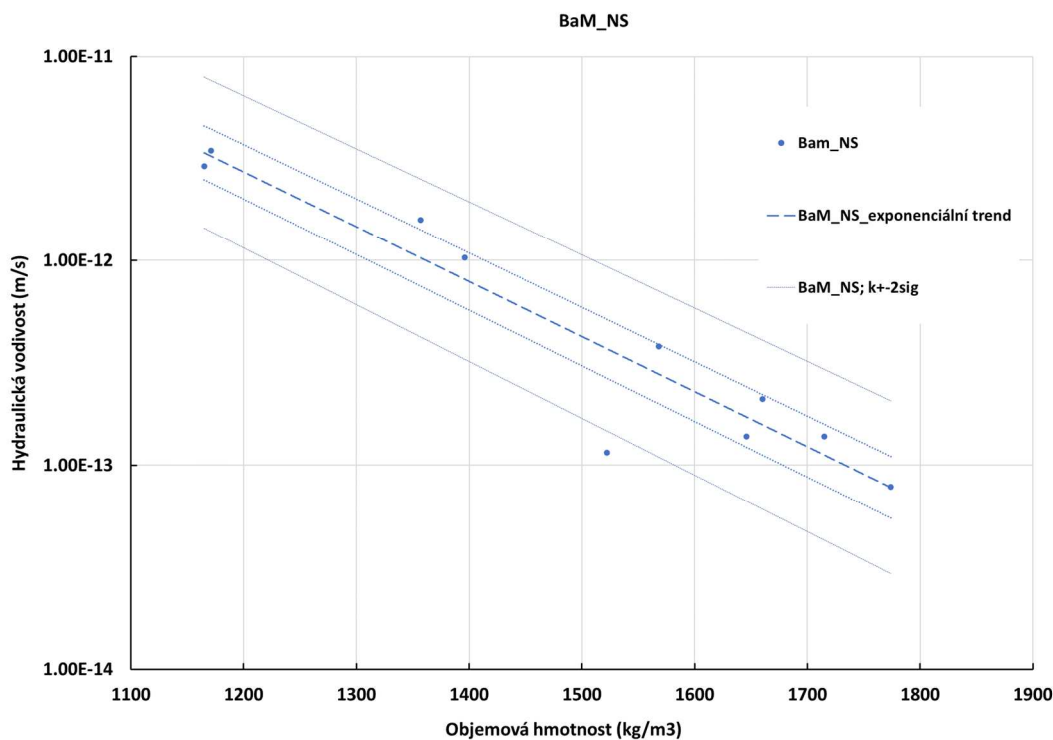
Tab. 8 Klasifikace ovlivnění hydraulické vodivosti tepelným zatížením bentonitu Rokle. Intervaly se vztahují k rozsahu objemových hmotností a k nim vztaženým charakteristickým křivkám zatíženého bentonitu Rokle. n – počet měřených prvků. Velikost intervalu odpovídá $(\rho_{dmax} - \rho_{dmin})/4$. ρ_{dmax} – maximální objemová hmotnost sušiny, ρ_{dmin} – minimální objemová hmotnost sušiny.

název bentonitu	n	ρ_{dmin} (kg/m ³)	ρ_{dmax} (kg/m ³)	zatížený bentonit – č. intervalu			
				1.	2.	3.	4.
Rokle_NS	10	1150	1670				
Rokle_BS_Josef_95 C_3 m	3	1350	1580	0	0	0	0
Rokle_BS_Josef_95 C_6 m	3	1380	1670	0	0	0	0
Rokle_BS_Josef_95 C_12 m	3	1220	1580	0	0	0	0
Rokle_BS_Josef_95 C_18 m	3	1150	1480	0	0	0	0
Rokle_BS_Josef_95 C (všechny OS)	12	1150	1670	0	0	0	0
Rokle_BS_SGW-K_95 C_3 m	3	1190	1550	0	0	0	0
Rokle_BS_SGW-K_95 C_6 m	3	1380	1650	0	0	0	0
Rokle_BS_SGW-K_95 C_12 m	3	1380	1680	0	0	0	0
Rokle_BS_SGW-K_95 C_18 m	3	1150	1520	0	0	0	0
Rokle_BS_SGW-K_95 C (všechny OS)	12	1150	1700	0	0	0	0
Rokle_KB2_Josef_3 m	1	1480		bodová data		0	
Rokle_KB2_Josef_6 m	1	1673		bodová data		0	
Rokle_KB2_Josef_12 m	1	1585		bodová data		0	
Rokle_KB2_Josef_18 m	1	1575		bodová data		0	
Rokle_KB4_Josef_3 m	1	1560		bodová data		0	
Rokle_KB4_Josef_6 m	1	1600		bodová data		0	
Rokle_KB4_Josef_12 m	1	1630		bodová data		0	
Rokle_KB4_Josef_18 m	1	1483		bodová data		0	

Na základě statistického vyhodnocení hydraulické vodivosti bentonitu Rokle nebyly zaznamenány žádné změny tohoto parametru vlivem tepelného zatěžování bentonitu, ani vlivem vystavení in situ podmínkám. Všechna data měřená na ovlivněném bentonitu Rokle a jejich pásy spolehlivosti jsou zahrnuty v intervalu spolehlivosti neovlivněného bentonitu Rokle. Důvodem velkého rozptylu hydraulické vodivosti bentonitu Rokle je její heterogenita, která je způsobena způsobem jejího získání a zpracování. Jedná se o kopaný nehomogenizovaný bentonit.

2.9.3 PROP - BaM

Na bentonitu BaM byly provedeny zkoušky hydraulické vodivosti pouze na bentonitu v nezátíženém stavu (BaM_NS). Data byla získána ze dvou zdrojů, kterými jsou interakční experiment (Svoboda et al. 2019b) a zakázka na laboratorní zkoušky na bentonitu BaM (Vašíček 2017). V grafu na Obr. 113 jsou vyneseny hodnoty BaM_NS spolu s charakteristickými křivkami spolehlivosti.



Obr. 113 Hydraulická vodivost nezátíženého bentonitu BaM.

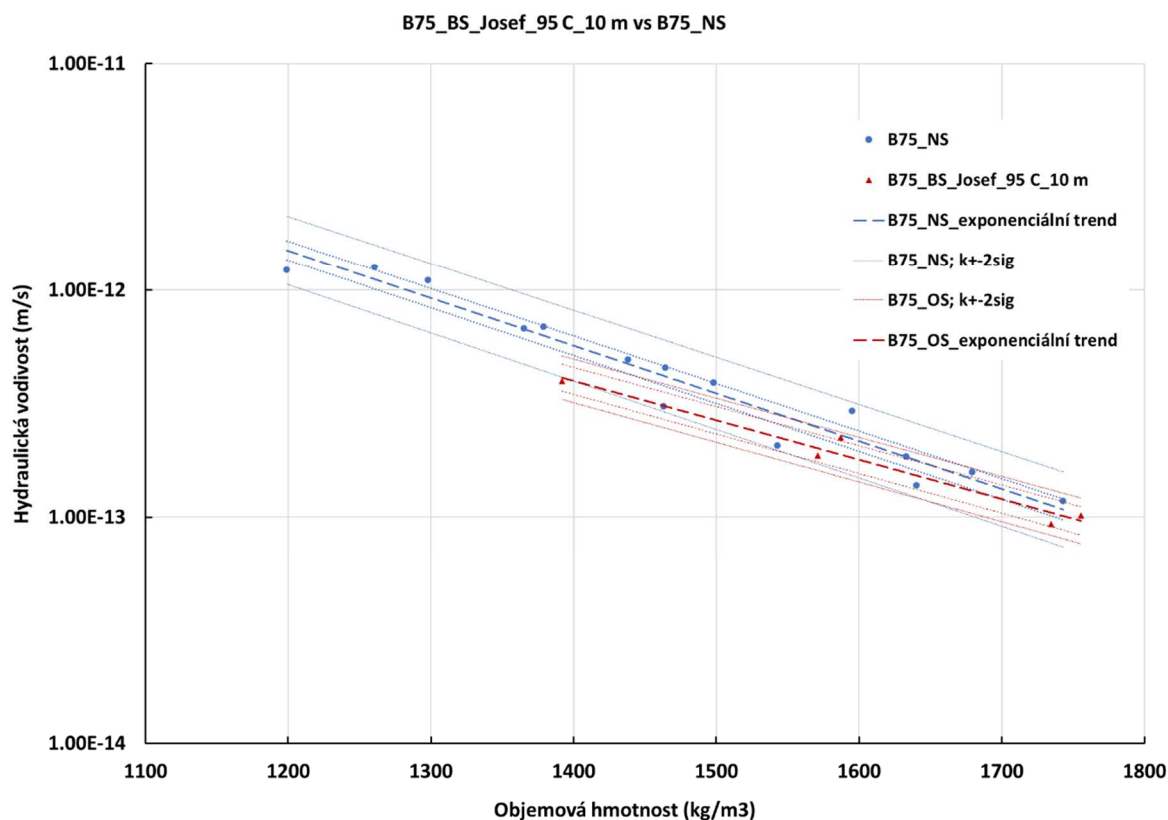
2.9.4 PROP – B75

Výzkum různě zatěžovaného bentonitu B75 byl součástí projektu FR-TI1/362 (MPO TIP), výsledky jsou prezentovány v technických zprávách k projektu (Vašíček et al. 2013, Trpkošová et al. 2014). V tomto projektu byl bentonit zatěžován teplotou 95 °C ve formě suspenze, suspenze s betonovou kostkou, v suchém stavu a lisovaný ve formě krychle. Součástí tohoto projektu byl i in-situ experiment, který spočíval v uložení bentonitových válečků do vrtů nacházejících se v podzemní laboratoři Josef. Do některých vrtů byl umístěn samostatný bentonit a do jiných vrtů byly umístěny bentonitové válečky prostřídáné s cementovými válečky. Výsledky B75_OS jsou

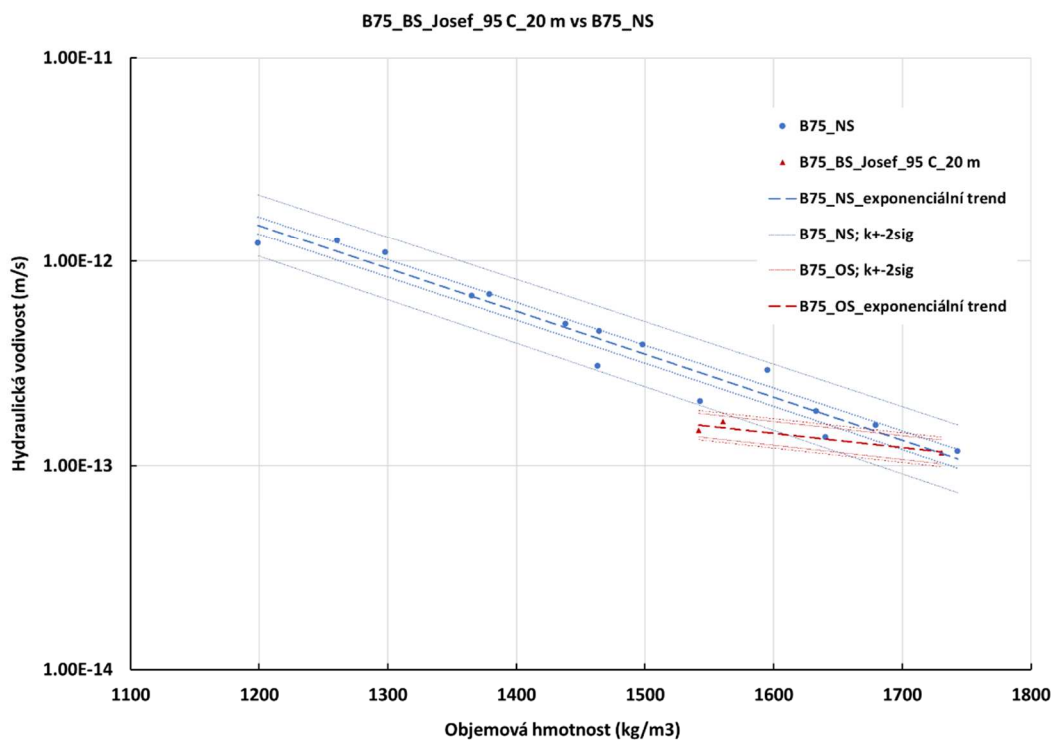
uvedeny ve zprávě (Vašíček et al. 2013), výsledky B75_NS jsou uvedeny v technické zprávě (Trpkošová et al. 2013).

Testování B75 bylo také součástí projektů DOPAS a Mock-up-Josef, výsledky jsou uvedeny v technických zprávách (Vašíček et al. 2014; Šťástka et al. 2018). Data z měření na B75_OS a B75_NS z DOPASu byla ve zprávách (Vašíček et al. 2013, Vašíček et al. 2014; Šťástka et al. 2018) prezentována jen v grafické podobě. Hodnoty byly získány od autorského kolektivu zpráv. Všechna data měřená na ovlivněném bentonitu B75 pochází výhradně z projektu FR-T11/362 (MPO TIP). Zpráva z podetapy E4.2 (Vašíček et al. 2013) obsahuje grafické vyhodnocení a vzájemné porovnání měřených dat. Vyhodnocení a závěry z měření bylo provedeno na základě vizuálního zhodnocení polohy bodů vůči regresní křivce nezatíženého bentonitu.

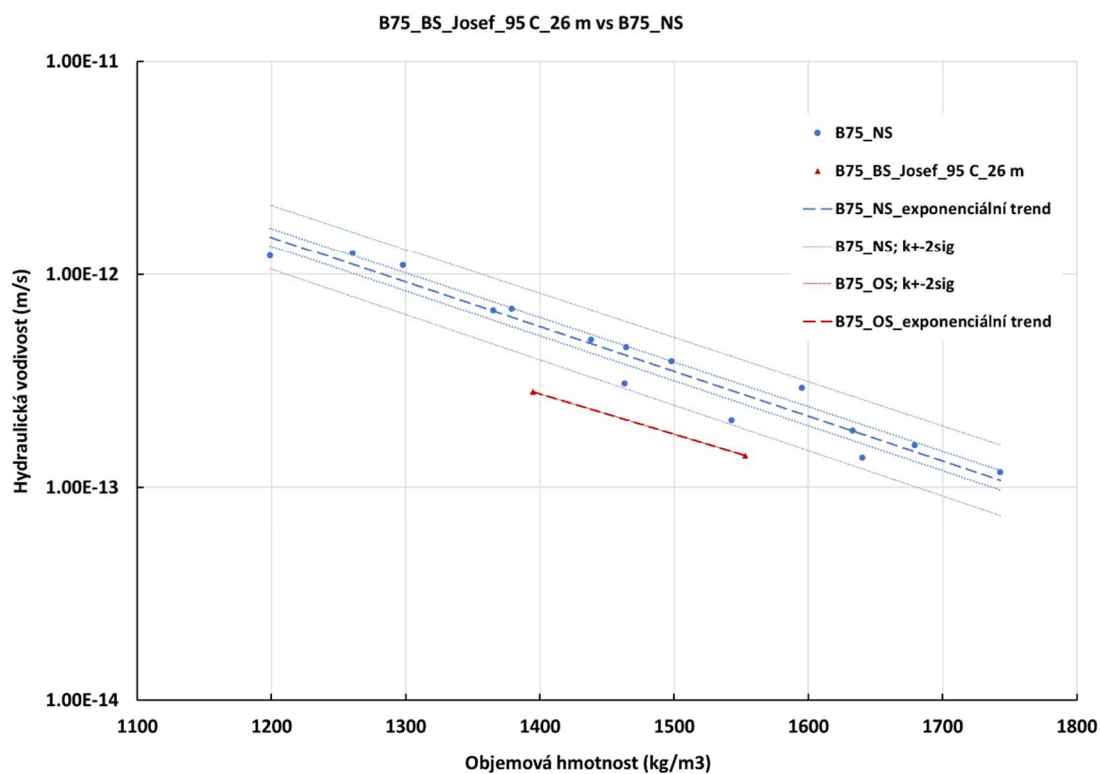
V grafech na Obr. 114 – Obr. 123 je statistické vyhodnocení a grafické zobrazení míry ovlivnění B75_OS vzhledem k B75_NS. Data měřená z in-situ experimentu jsou vložena do jednoho grafu bez vyhodnocení křivek spolehlivosti z důvodu malého množství měřených dat (2 měřené hodnoty) a malého rozsahu měřených objemových hmotností sušiny.



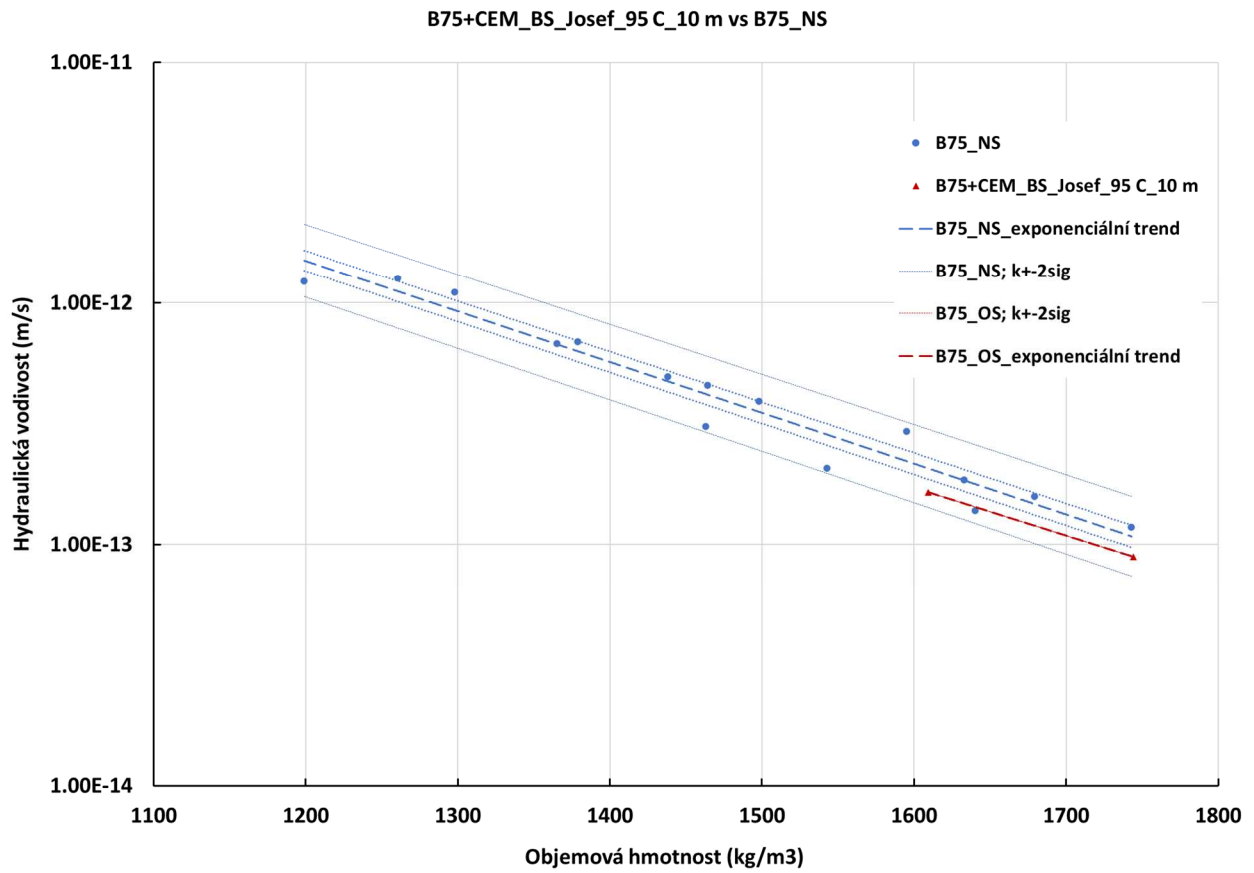
Obr. 114 Hydraulická vodivost nezatíženého bentonitu B75 a bentonitu B75_OS, zatěžovaného po dobu 10 měsíců ve formě suspenze za použití vody „Josef“ v laboratorní peci teplotou 95 °C.



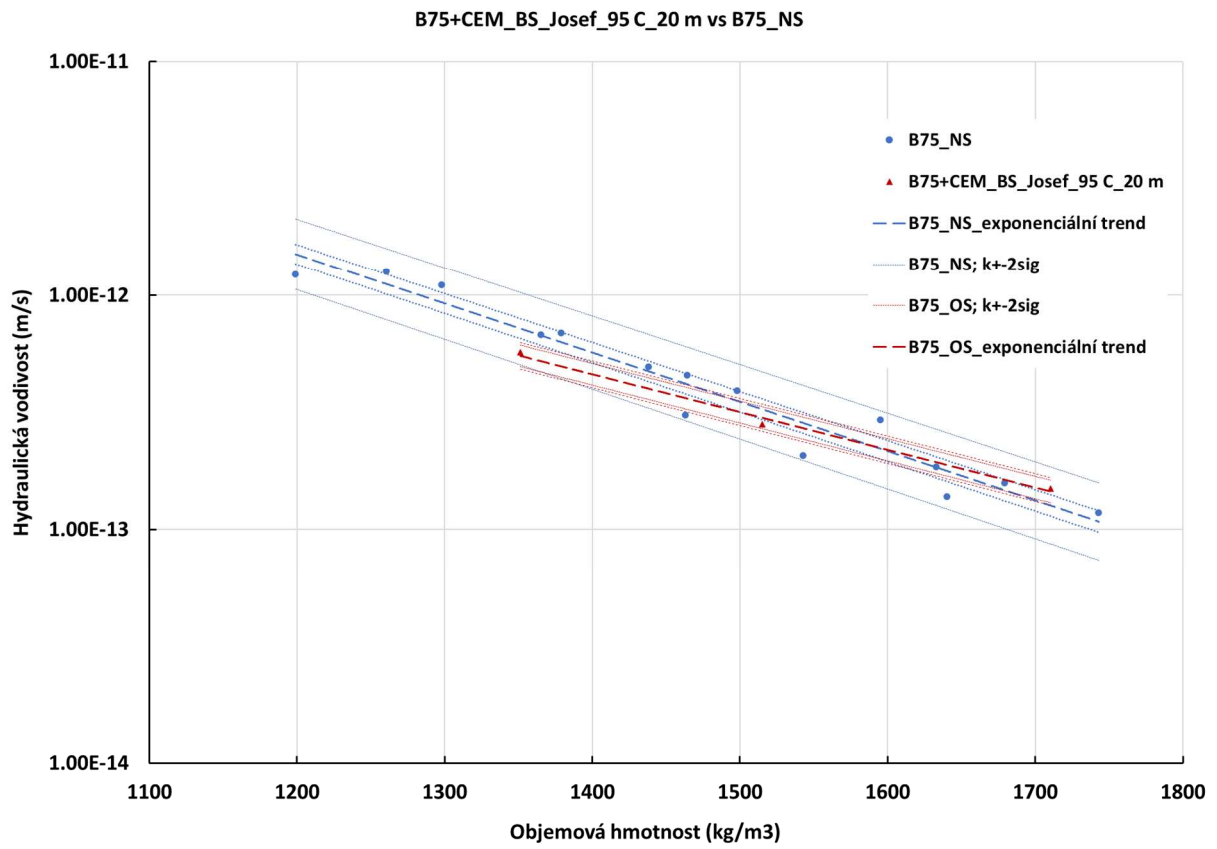
Obr. 115 Hydraulická vodivost nezatíženého bentonitu B75 a bentonitu B75_OS, zatěžovaného po dobu 20 měsíců ve formě suspenze za použití vody „Josef“ v laboratorní peci teplotou 95 °C.



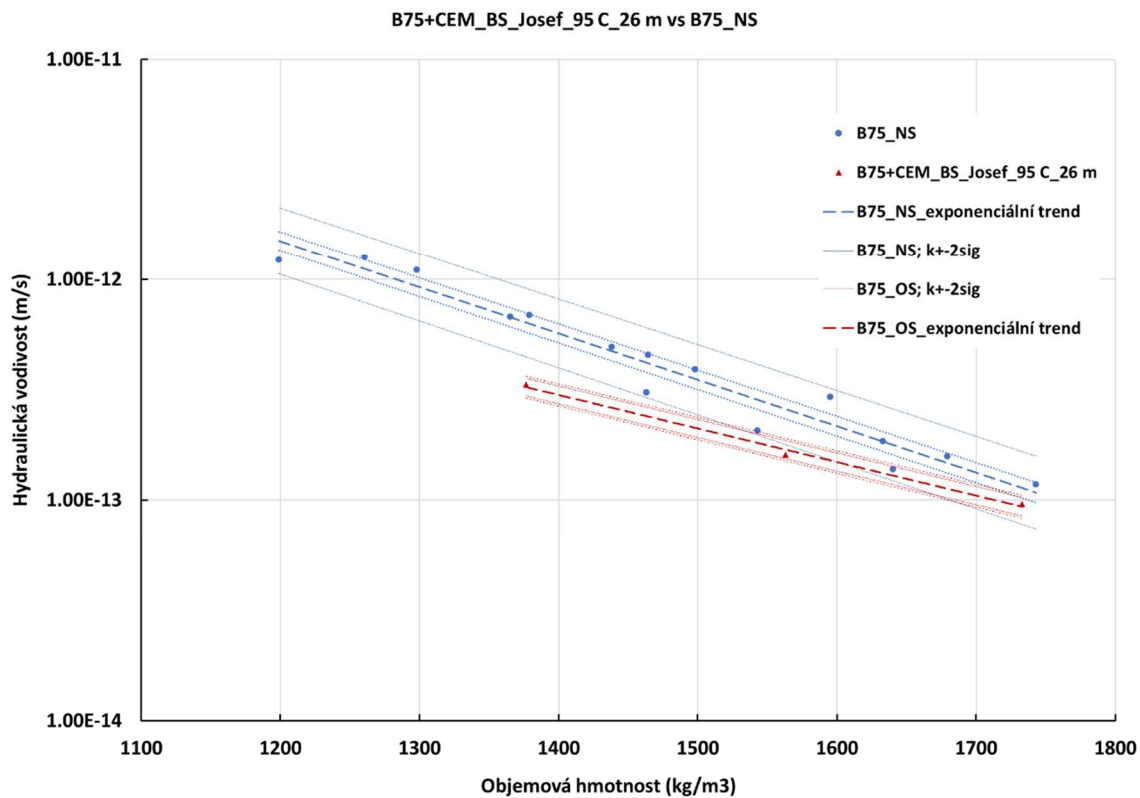
Obr. 116 Hydraulická vodivost nezatíženého bentonitu B75 a bentonitu B75_OS, zatěžovaného po dobu 26 měsíců ve formě suspenze za použití vody „Josef“ v laboratorní peci teplotou 95 °C.



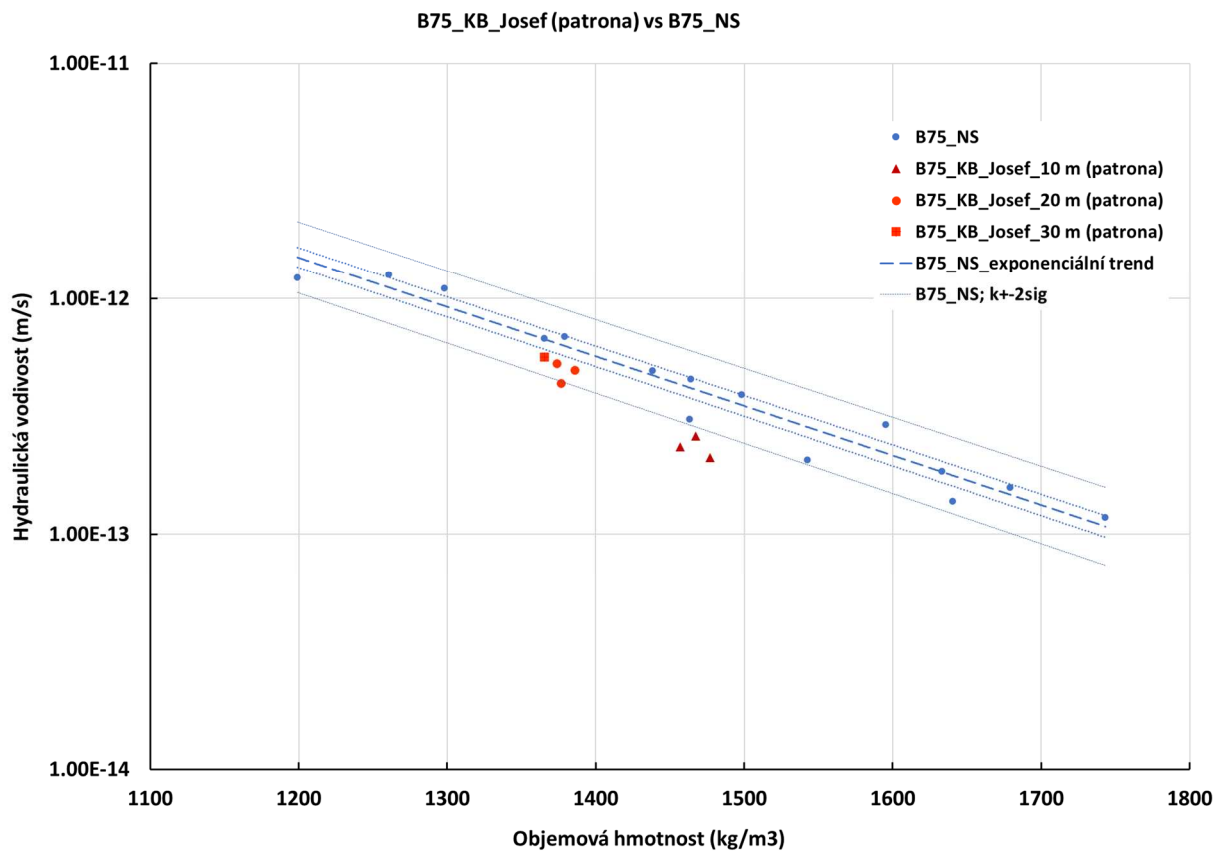
Obr. 117 Hydraulická vodivost nezatíženého bentonitu B75 a bentonitu B75_OS, zatěžovaného po dobu 10 měsíců ve formě suspenze s vloženou cementovou kostkou za použití vody „Josef“ v laboratorní peci teplotou 95 °C.



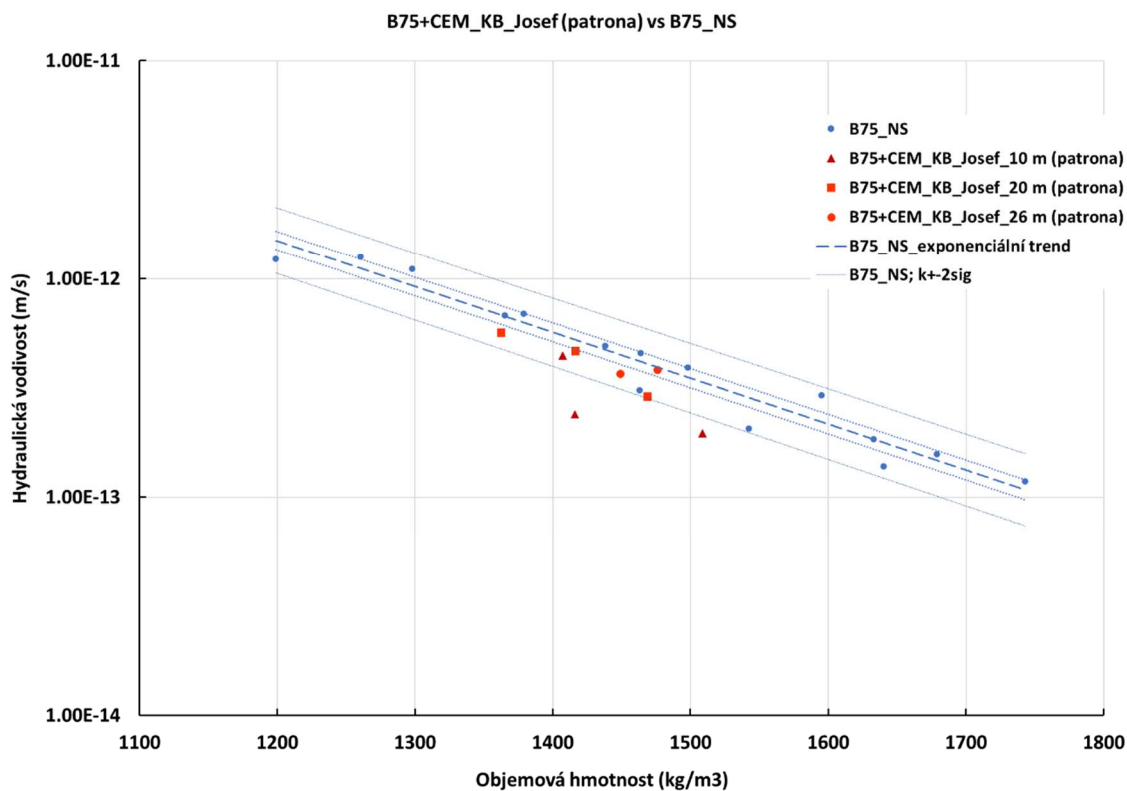
Obr. 118 Hydraulická vodivost nezatíženého bentonitu B75 a bentonitu B75_OS, zatěžovaného po dobu 20 měsíců ve formě suspenze s vloženou cementovou kostkou za použití vody „Josef“ v laboratorní peci teplotou 95 °C.



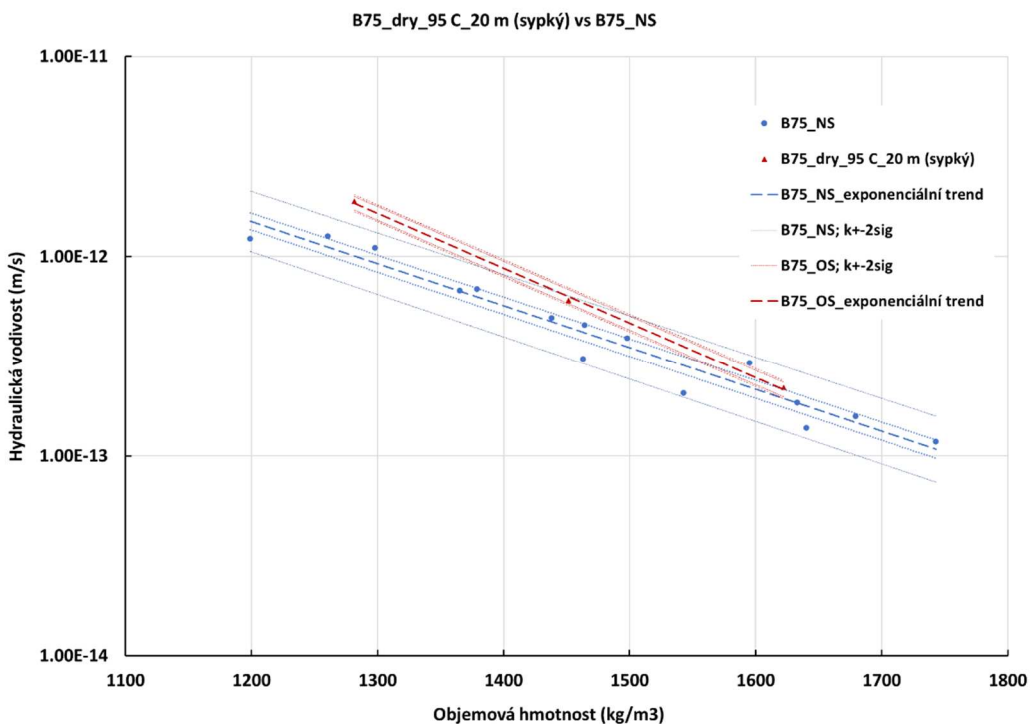
Obr. 119 Hydraulická vodivost nezatíženého bentonitu B75 a bentonitu B75_OS, zatěžovaného po dobu 26 měsíců ve formě suspenze s vloženou cementovou kostkou za použití vody „Josef“ v laboratorní peci teplotou 95 °C.



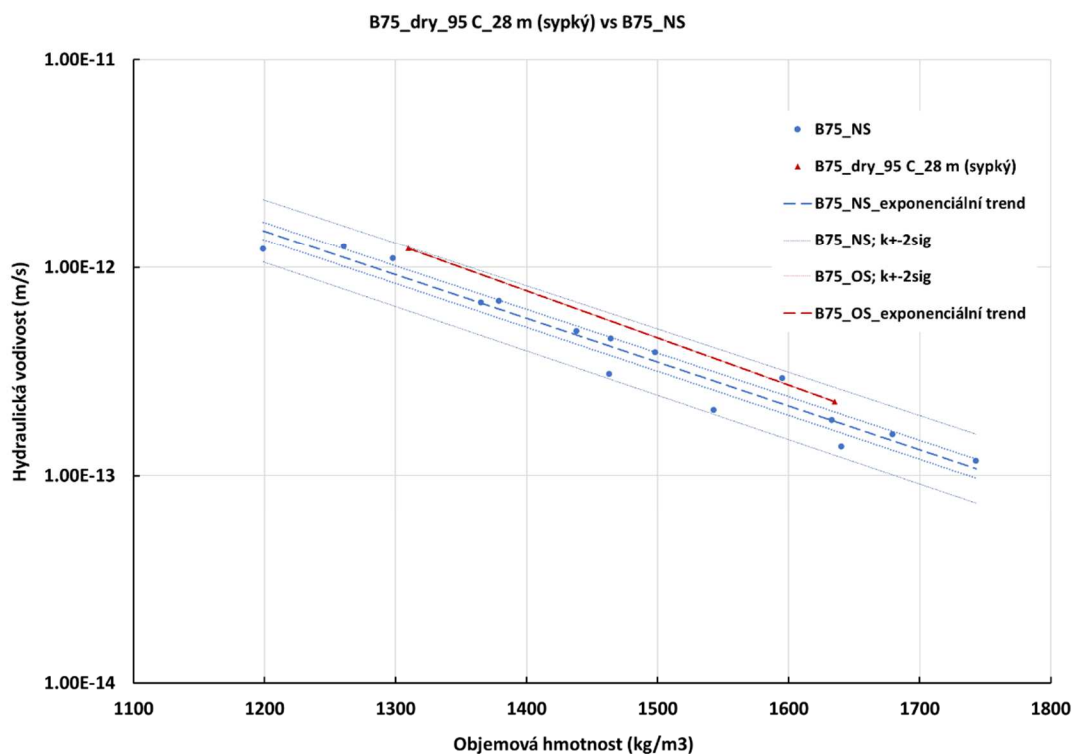
Obr. 120 Hydraulická vodivost nezatíženého bentonitu B75 a bentonitu B75_OS pocházejícího z patron z in-situ experimentu. Výsledky z odběru z vrtu bez přítomnosti cementu po 10, 20 a 30 měsících od umístění.



Obr. 121 Hydraulická vodivost nezatíženého bentonitu B75 a bentonitu B75_OS pocházejícího z patron z in-situ experimentu. Výsledky z odběru z vrtu s přítomností cementu po 10, 20 a 26 měsících od umístění.



Obr. 122 Hydraulická vodivost nezatíženého bentonitu B75 a bentonitu B75_OS, zatěžovaného po dobu 20 měsíců v sykové formě v laboratorní peci teplotou 95 °C.



Obr. 123 Hydraulická vodivost nezatíženého bentonitu B75 a bentonitu B75_OS, zatěžovaného po dobu 28 měsíců v sypké formě v laboratorní peci teplotou 95 °C.

V tabulce Tab. 9 je celkové vyhodnocení ovlivnění hydraulické vodivosti tepelným zatížením bentonitu BCV v suchém a vlhkém stavu.

Hodnocení je vždy vzhledem k nezatíženému bentonitu. Systém hodnocení je následující:

- 0 interval spolehlivost OS bentonitu se nachází z více než 75 % uvnitř intervalu spolehlivosti NS bentonitu.
- + vyšší hodnoty – více než polovina intervalu spolehlivosti nad intervalem spolehlivosti NS bentonitu.
- ++ významně vyšší hodnoty – pás spolehlivosti OS bentonitu mimo pás spolehlivosti NS bentonitu.
- nižší hodnoty – více než polovina intervalu spolehlivosti pod intervalem spolehlivosti NS bentonitu.
- významně nižší hodnoty – pás spolehlivosti OS bentonitu mimo pás spolehlivosti NS bentonitu.

Tab. 9 Klasifikace ovlivnění hydraulické vodivosti tepelným zatížením bentonitu B75. Intervaly se vztahují k rozsahu objemových hmotností a k nim vztaženým charakteristickým křivkám zatíženého bentonitu BCV. N – počet měřených prvků. Velikost intervalu odpovídá $(\rho_{dmax} - \rho_{dmin})/4$. ρ_{dmax} – maximální objemová hmotnost sušiny, ρ_{dmin} – minimální objemová hmotnost sušiny.

název bentonitu	n	ρ_{dmin}	ρ_{dmax}	zatížený bentonit – č. intervalu			
		(kg/m ³)	(kg/m ³)	1	2	3	4
B75_NS							
B75_BS_Josef_95 C_10 m	5	1200	1750	-	0	0	0
B75_BS_Josef_95 C_20 m	3	1550	1750	--	-	0	0
B75_BS_Josef_95 C_26 m	2	1390	1560	--	--	--	--
B75+CEM_BS_Josef_95 C_10 m	3	1610	1750	0	0	0	0
B75+CEM_BS_Josef_95 C_20 m	3	1350	1710	0	0	0	0
B75+CEM_BS_Josef_95 C_26 m	3	1380	1730	--	-	-	0
B75_dry_95 C_20 m	3	1280	1630	++	+	+	0
B75_dry_95 C_28 m	2	1300	1630	+	0	0	0
B75_KB_Josef_10 m	3			bodová data		0	
B75_KB_Josef_20 m	3			bodová data		0	
B75_KB_Josef_30 m	2			bodová data		0	
B75+CEM_KB_Josef_10 m	3			bodová data		0	
B75+CEM_KB_Josef_20 m	3			bodová data		0	
B75+CEM_KB_Josef_26 m	2			bodová data		0	

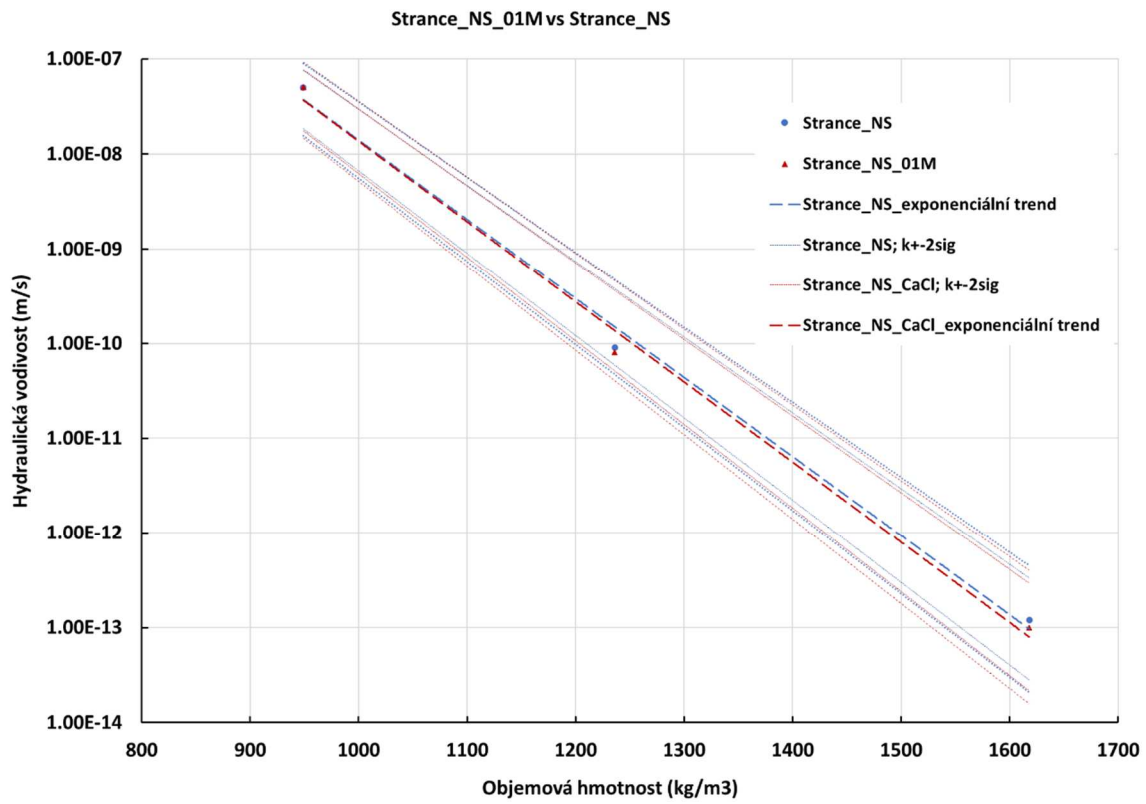
Na základě statistického vyhodnocení lze pozorovat změnu v hydraulické vodivosti bentonitu B75 po tepelném zatížení v suchém i vlhkém stavu. Z vyhodnocení vyplývá vývoj změny hydraulické vodivosti bentonitu zatěžovaného ve vlhkém stavu jako suspenze. S prodlužující se dobou zatížení suspenze bentonitu B75 klesá hydraulická vodivost. Změny se projevují nejdříve v oblasti nízkých objemových hmotností a poté s postupující dobou zatížení je možné pozorovat pokles hydraulické vodivosti v celém definičním oboru objemových hmotností sušiny. V případě bentonitové suspenze s vloženou cementovou kostkou se pokles hydraulické vodivosti projeví za delší časový interval. V tomto případě je pokles hydraulické vodivosti zaznamenán až po 26 měsících.

Hydraulická vodivost bentonitu B75 zatěžovaného v suchém stavu má opačný trend. Zde dochází naopak k nárůstu hydraulické vodivosti vlivem zatěžování.

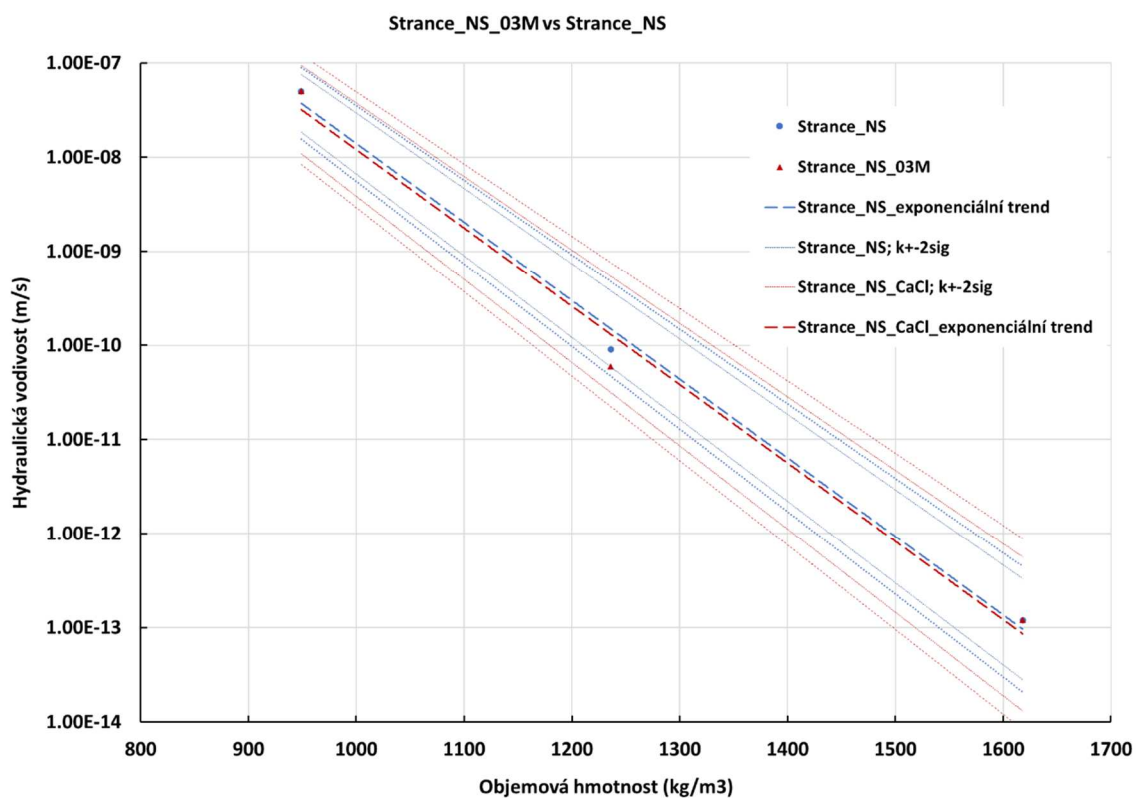
2.9.5 PROP – Stránce

Na bentonitu Stránce byly provedeny zkoušky pouze na neovlivněném bentonitu (Stránce_NS). Zkoušky byly provedeny v zahraniční laboratoři pro SKB (Karnland et al. 2006). Zkoumán byl vliv saturačních médií o různé koncentrací solného roztoku na hydraulické a geotechnické vlastnosti bentonitu. Bentonit Stránce_NS byl sycen solným roztokem o koncentraci 0,1 M mol/L, 0,3 M mol/L, 1,0 M mol/L 3,0 M mol/L a jedna sada vzorků byla sycena destilovanou vodou. Hydraulická vodivost za použití jednotlivých koncentrací saturačního media je v grafech na Obr. 124 - Obr. 127 porovnávána s výsledky měření s destilovanou vodou. Na bentonitu byly vždy změřeny tři

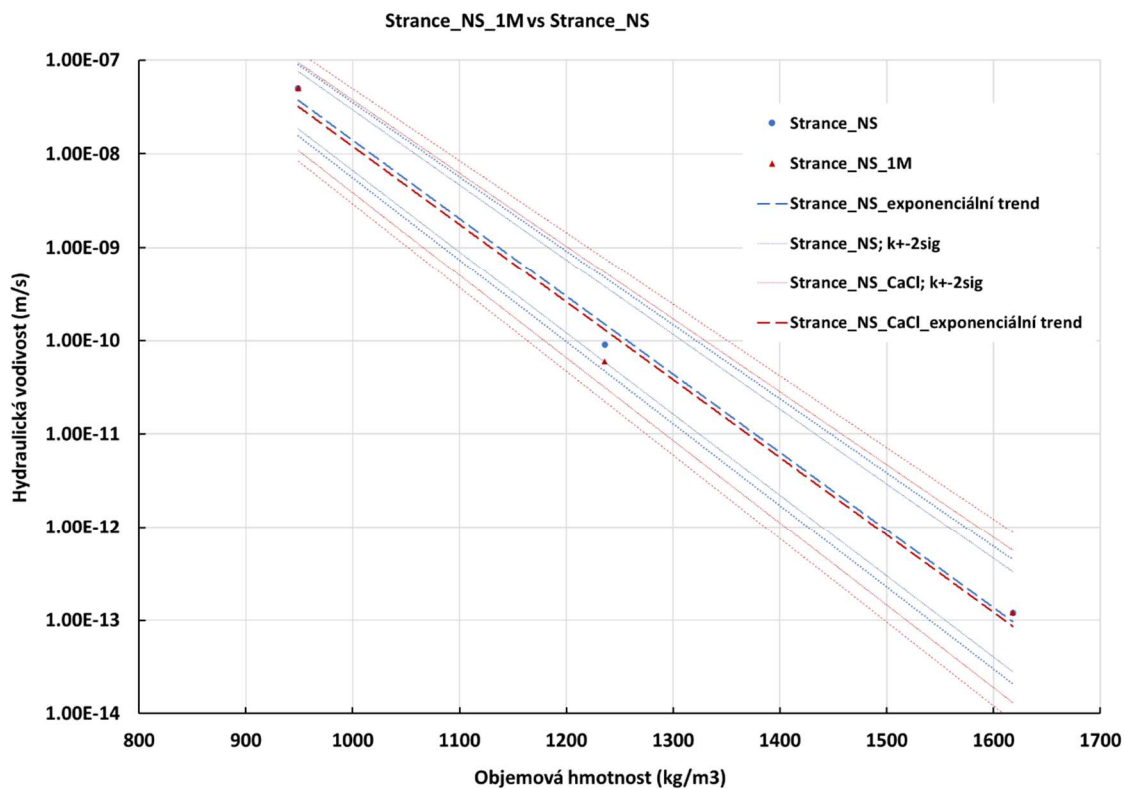
hodnoty hydraulické vodivosti pro tři objemové hmotnosti sušiny pro jednotlivé koncentrace saturačního roztoku.



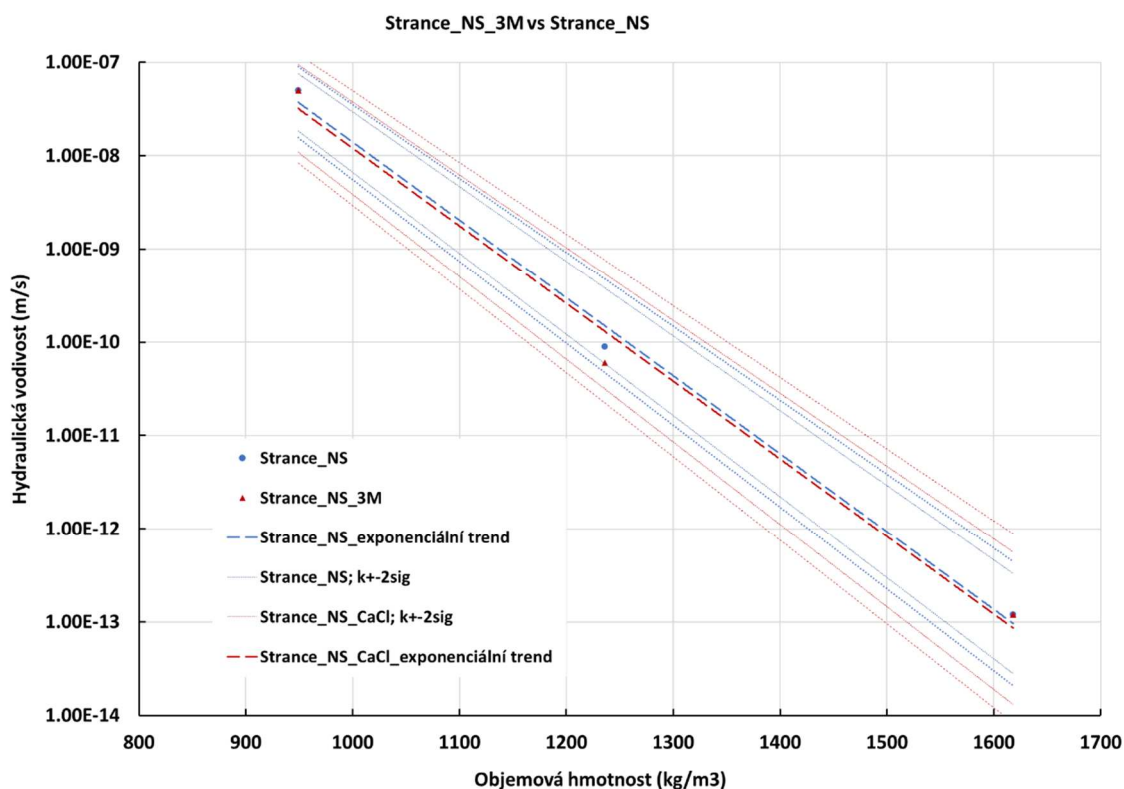
Obr. 124 Porovnání hydraulické vodivosti bentonitu Strance při použití destilované vody a téhož bentonitu při použití saturačního media o koncentraci 0,1 M mol/l NaCl.



Obr. 125 Porovnání hydraulické vodivosti bentonitu Strance při použití destilované vody a téhož bentonitu při použití saturačního media o koncentraci 0,3 M mol/l NaCl.



Obr. 126 Porovnání hydraulické vodivosti bentonitu Strance při použití destilované vody a téhož bentonitu při použití saturačního media o koncentraci 1 M mol/l NaCl.



Obr. 127 Porovnání hydraulické vodivosti bentonitu Stránce při použití destilované vody a téhož bentonitu při použití saturačního media o koncentraci 3 M mol/l NaCl.

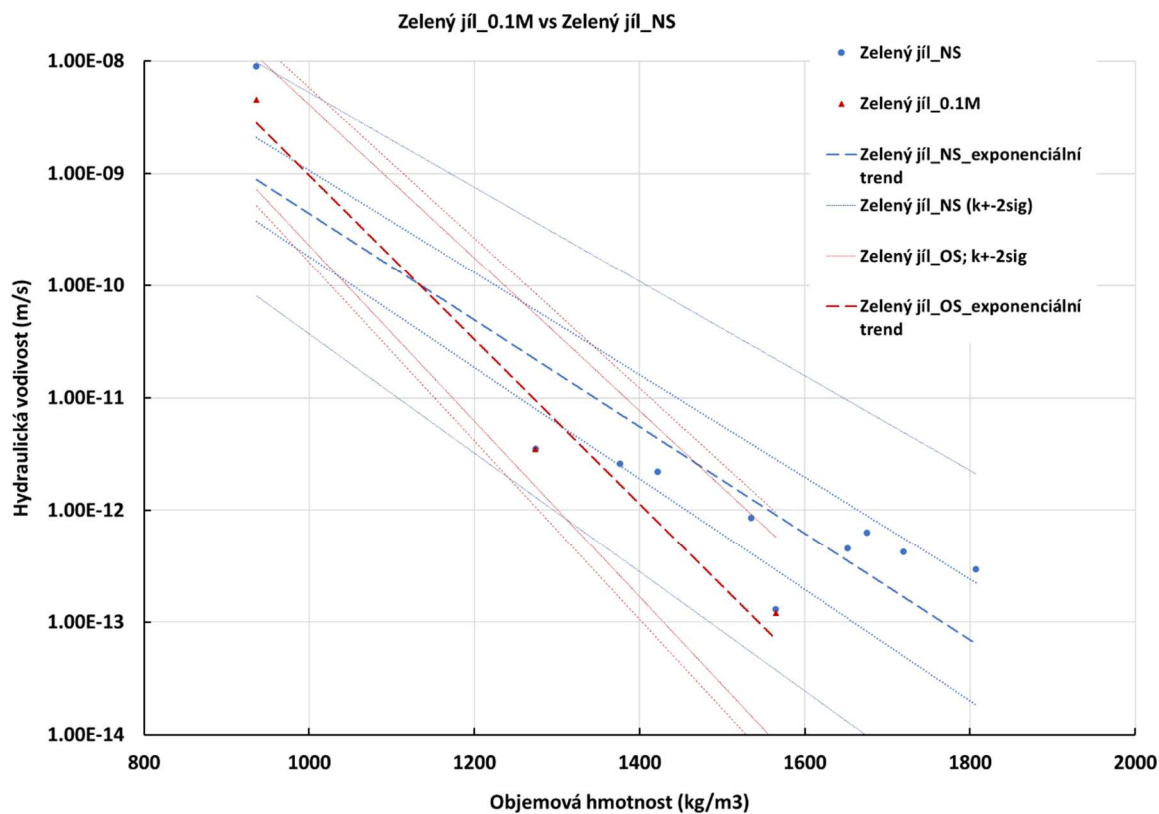
Pro bentonit Stránce nebyla vyhodnocována hydraulická vodivost bentonitu v ovlivněném stavu. Dostupná jsou pouze data měřená na neovlivněném bentonitu Stránce a hydraulická vodivost neovlivněného bentonitu při použití různých druhů saturačních médií. Analýza prokázala, že se hydraulická vodivost bentonitu Stránce nemění při použití jako sytícího media NaCl o koncentraci 0,1 – 3 M mol/l.

2.9.6 PROP – Zelený jíl

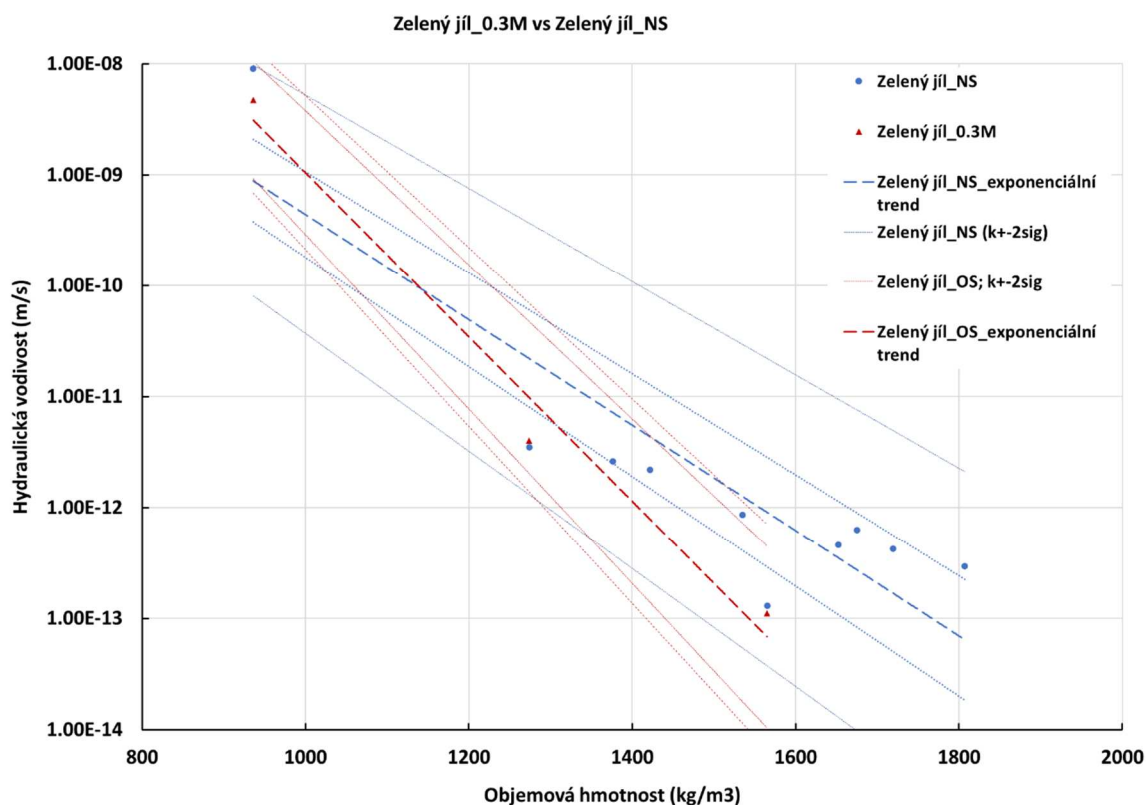
Data pro vyhodnocení hydraulické vodivosti bentonitu Zelený jíl pochází ze dvou zdrojů:

- V rámci analýzy mineralogie a těsnících vlastností bentonitů bylo pro instituci SKB provedeno pracovištěm CT měření hydraulické vodivosti bentonitu Zelený jíl při použití saturačního roztoku CaCl_2 o různých koncentracích. Byly použity koncentrace 0,1 M mol/L, 0,3 M mol/L, 1 M mol/L a 3 M mol/L. V rámci studie byla také měřena hydraulická vodivost na sadě neovlivněných vzorků Zeleného jílu při použití destilované vody jako saturačního media (Karnland et al. 2006).
- Data pro vyhodnocení hydraulické vodivosti ovlivněného bentonitu Zelený jíl byla měřena v rámci projektu „Geotechnický výzkum přírodních zelených jílu miocenního cypřisového souvrství z lokality Skalná Nová ves“. Náplní projektu bylo měření hydraulické vodivosti bentonitu ve formě suspenze, suchého prášku a prefabrikátů po tepelném zatížení teplotou 95 °C po dobu 3 a 6 měsíců. Bentonitová suspenze byla namíchána z práškového bentonitu Zelený jíl a vody odebrané z vrtů podzemní laboratoře Josef. Fyzikální model se skládal z prefabrikátu vyrobeného z bentonitu Zelený jíl, který byl nalísován do tlakových nádob na objemovou hmotnost sušiny 1600 kg/m³. Měřen byl také

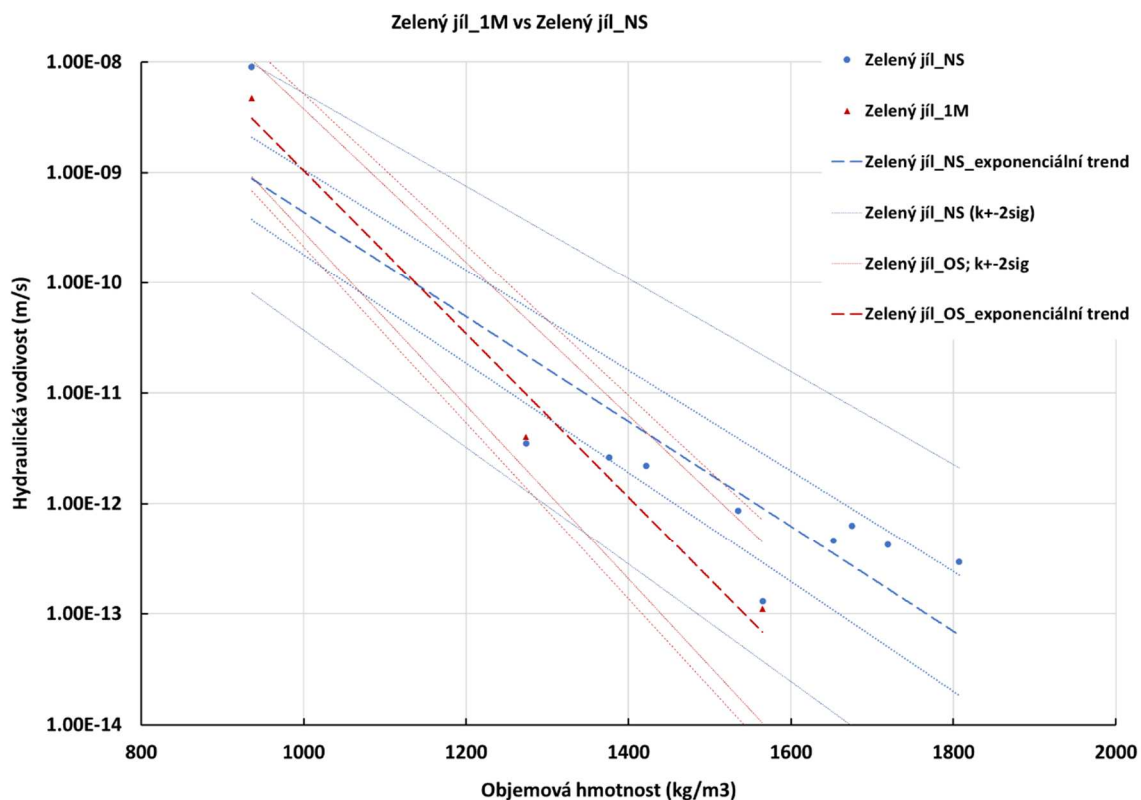
bobtnací tlak na sadě vzorků neovlivněného bentonitu Zelený jíł (Pacovský et al. 2011). Měřena byla také hydraulická vodivost na sadě vzorků neovlivněného bentonitu Zelený jíł (Pacovský et al. 2011).



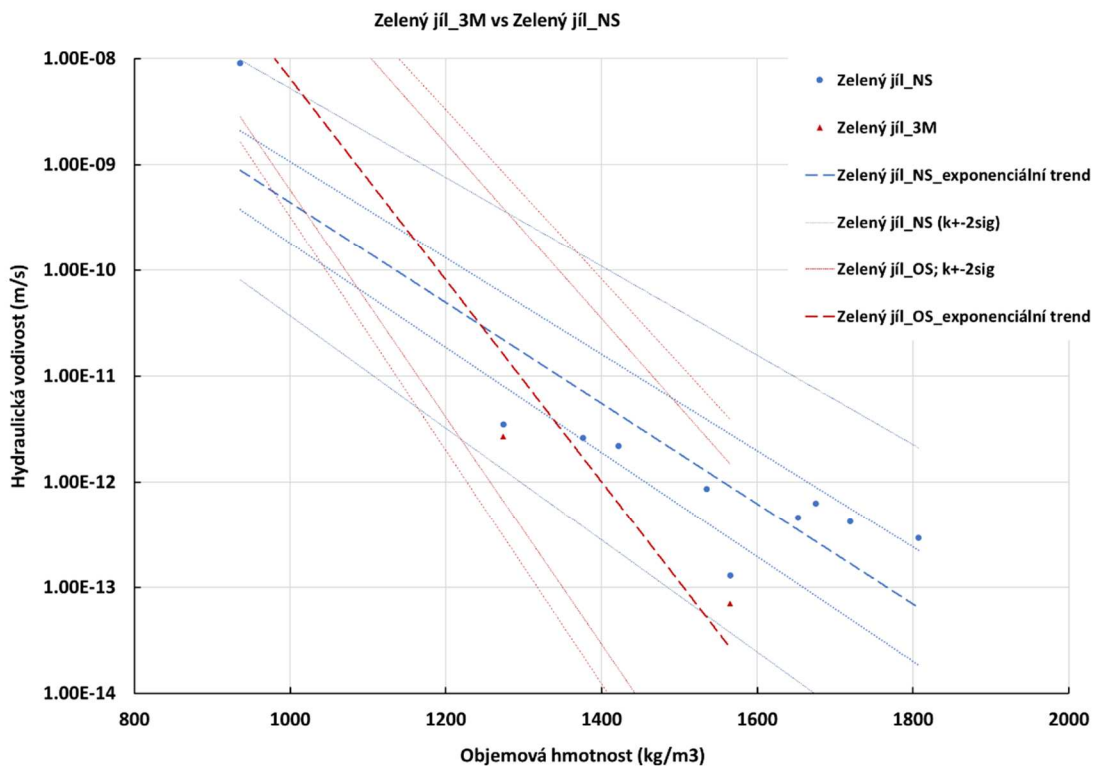
Obr. 128 Porovnání hydraulické vodivosti bentonitu Zelený jíł_NS a Zelený jíł_NS při použití jako saturačního media CaCl₂ o koncentraci 0,1 M mol/L (označeno Zelený jíł_0,1 M).



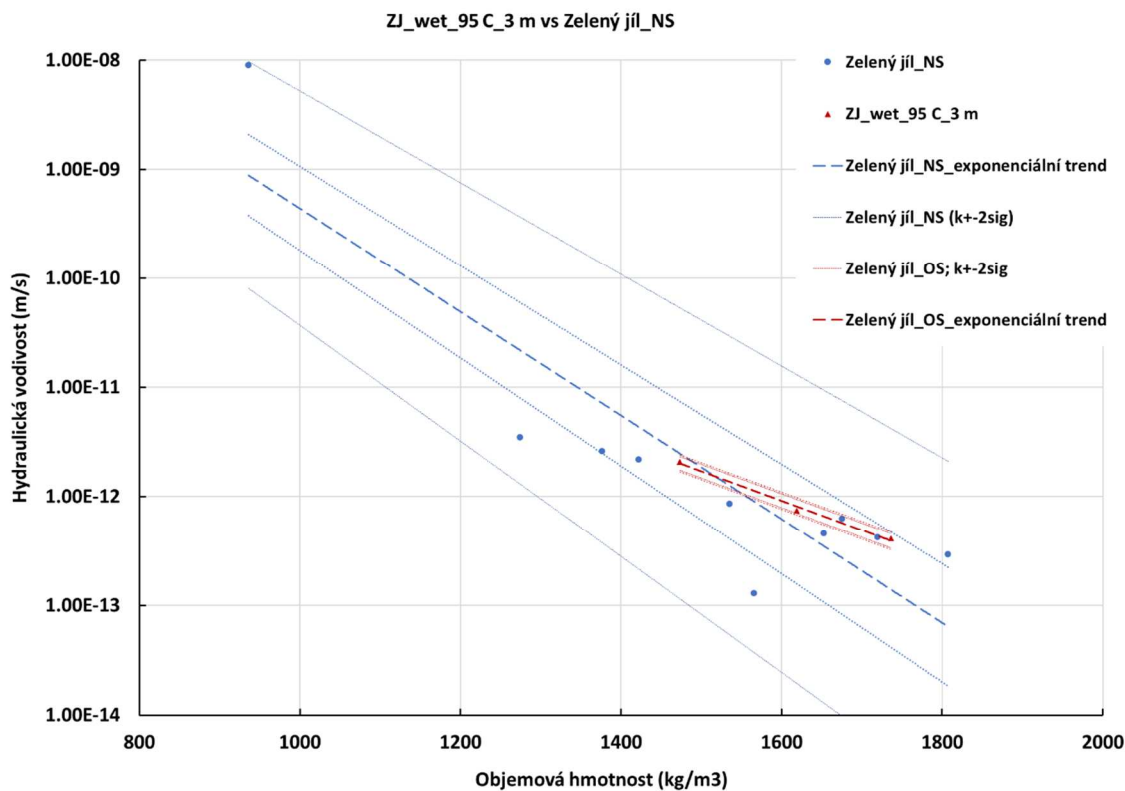
Obr. 129 Porovnání hydraulické vodivosti bentonitu Zelený jíł_NS a Zelený jíł_0,3M při použití jako saturačního média CaCl₂ o koncentraci 0,3 M mol/L (označeno Zelený jíł_0,3M).



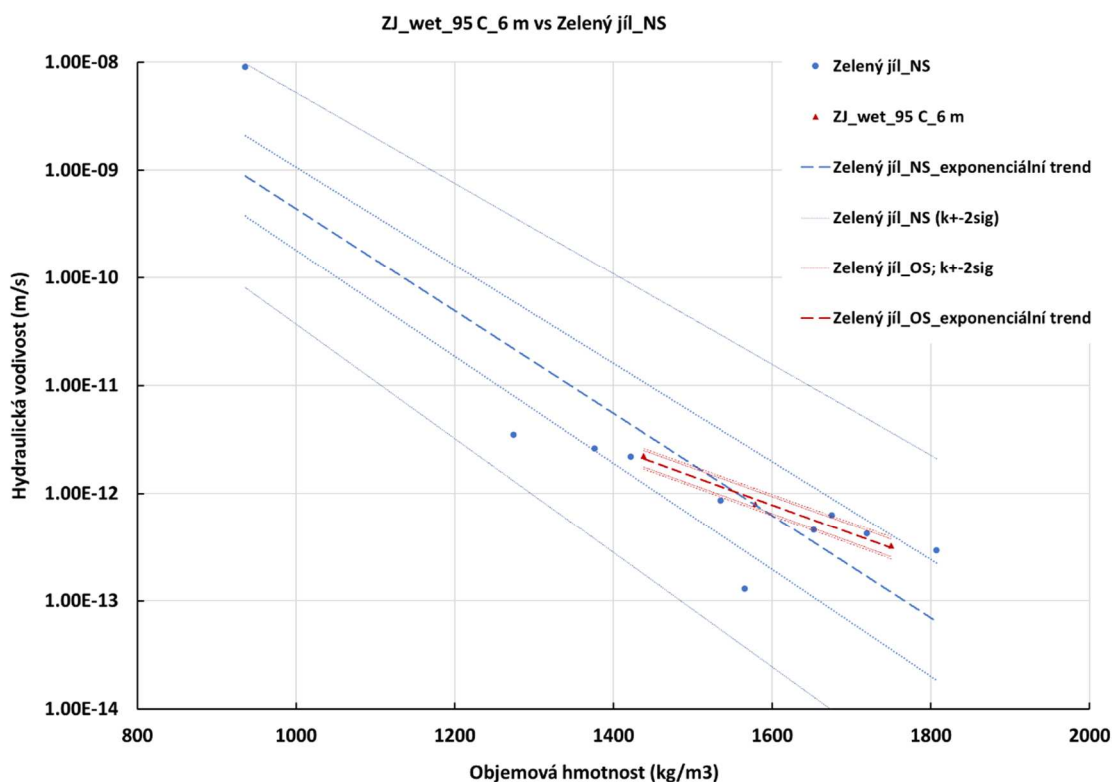
Obr. 130 Porovnání hydraulické vodivosti bentonitu Zelený jíł_NS a Zelený jíł_1M při použití jako saturačního média CaCl₂ o koncentraci 1 M mol/L (označeno Zelený jíł_1M).



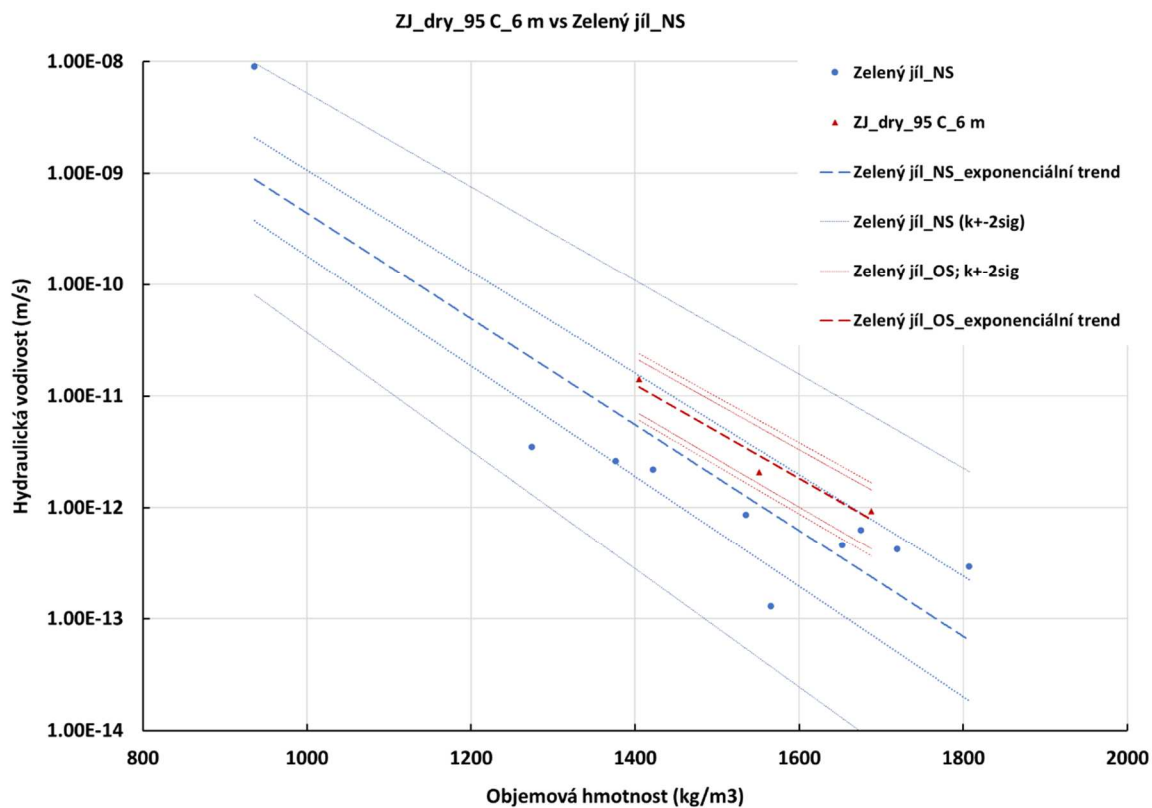
Obr. 131 Porovnání hydraulické vodivosti bentonitu Zelený jíl_NS a Zelený jíl_3M při použití jako saturačního média CaCl₂ o koncentraci 3 M mol/L (označeno Zelený jíl_3M).



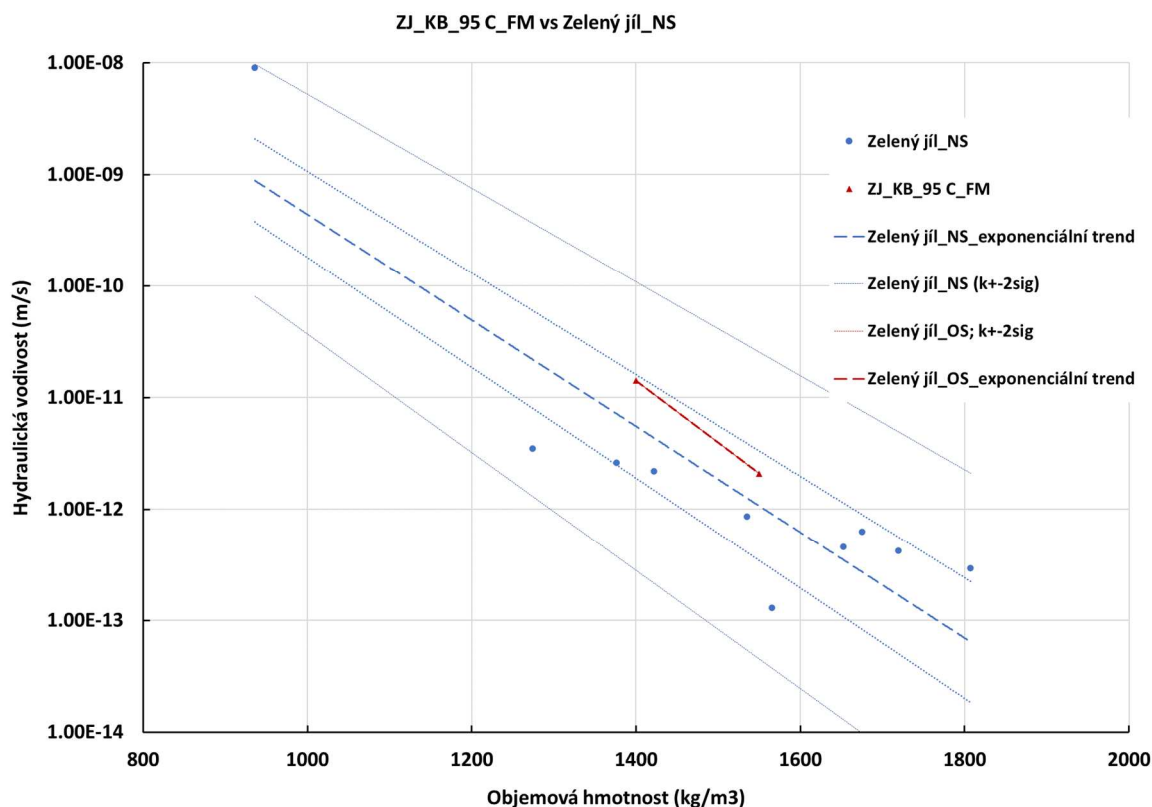
Obr. 132 Porovnání hydraulické vodivosti bentonitu Zelený jíl_NS a ovlivněného bentonitu Zelený jíl po zatížení teplotou 95 °C ve formě suspenze po dobu 3 měsíce (označeno ZJ_wet_95 C_6 m).



Obr. 133 Porovnání hydraulické vodivosti bentonitu Zelený jíł_NS a ovlivněného bentonitu Zelený jíł po zatížení teplotou 95 °C ve formě suspenze po dobu 6 měsíců (označeno ZJ_wet_95 C_6 m).



Obr. 134 Porovnání hydraulické vodivosti bentonitu Zelený jíł_NS a ovlivněného bentonitu Zelený jíł po zatížení teplotou 95 °C v suchém stavu po dobu 6 měsíců (označeno ZJ_dry_95 C_6 m).



Obr. 135 Porovnání hydraulické vodivosti bentonitu Zelený jíł_NS a vzorku odebraného z fyzikálního experimentu, který se skládal z prefabrikátu vyrobeného z lisovaného bentonitu Zelený jíł (ZJ_KB_95C_FM).

V tabulce Tab. 17 je celkové vyhodnocení ovlivnění hydraulické vodivosti tepelným zatížením bentonitu BCV v suchém a vlhkém stavu.

Hodnocení je vždy vzhledem k nezatíženému bentonitu. Systém hodnocení je následující:

- 0 interval spolehlivosti OS bentonitu se nachází z více než 75 % uvnitř intervalu spolehlivosti NS bentonitu.
- + vyšší hodnoty – více než polovina intervalu spolehlivosti nad intervalem spolehlivosti NS bentonitu.
- ++ významně vyšší hodnoty – pás spolehlivosti OS bentonitu mimo pás spolehlivosti NS bentonitu.
- nižší hodnoty – více než polovina intervalu spolehlivosti pod intervalem spolehlivosti NS bentonitu.
- významně nižší hodnoty – pás spolehlivosti OS bentonitu mimo pás spolehlivosti NS bentonitu.

Parametr „orientace“ v tabulce Tab. 17 je vyplněn pouze pokud jsou intervaly spolehlivosti rovnoběžné a jen částečně se překrývají, nebo když k překryvu nedochází. V případě, že jsou charakteristické čáry rovnoběžné je možné uvažovat o jisté systematickosti v chování bentonitu v celém rozsahu sledovaných objemových hmotnostech sušiny. Ve většině případů jsou vůči sobě v obecné poloze, kdy dochází k protnutí, nebo vzájemnému přibližování charakteristických čar. Významné přibližování či oddalování je viditelné v klasifikaci v jednotlivých intervalech.

Tab. 10 Klasifikace ovlivnění bobtnacího tlaku tepelným zatížením bentonitu Zelený jíł. Intervaly se vztahují k rozsahu objemových hmotností a k nim vztaženým charakteristickým křivkám zatíženého bentonitu Zelený jíł. n – počet měřených prvků. Velikost intervalu odpovídá $(\rho_{dmax} - \rho_{dmin})/4$.

název bentonitu	n	ρ_{dmin} (kg/m ³)	ρ_{dmax} (kg/m ³)	zatížený bentonit – č. intervalu			
				1.	2.	3.	4.
Zelený jíł_NS	10	900	1800				
ZJ_wet_95 C_3 m	3	1450	1750	0	0	0	0
ZJ_wet_95 C_6 m	3	1450	1730	0	0	0	0
ZJ_dry_95 C_6 m	3	1400	1700	0	0	0	0
ZJ_KB_95 C_FM	2	1400	1550	0	0	0	0

Na základě statistické analýzy nebyly zaznamenány změny hydraulické vodivosti bentonitu Zelený jíł vlivem tepelného zatížení v suchém, ani vlhkém stavu.

2.9.7 Metodické a statistické zhodnocení

Pro každý typ bentonitu byly určeny charakteristické křivky vyjadřující interval spolehlivosti regresní křivky a interval spolehlivosti měřených bodů. Hodnocení ovlivnění je provedeno na základě vzájemné polohy pásů spolehlivosti neovlivněného a ovlivněného bentonitu. Porovnávání je nezátížený bentonit vůči jednomu druhu zatíženého bentonitu. Klasifikace je navržena tak, že je odstupňována míra překryvu jednotlivých pásů spolehlivosti. To umožňuje sledovat vývoj hydraulické vodivosti jednotlivých bentonitů vůči sobě prostřednictvím vývoje vzájemné polohy charakteristických křivek vůči nezátíženému bentonitu.

Obecně platí, že čím je interval spolehlivosti větší, tím větší je rozptyl dat. Zejména data měřena na neovlivněných bentonitech Rokle, Stránce a Zelený jíł vykazují velký rozptyl. To má za následek široký interval spolehlivosti, který pojme prakticky všechny řady dat měřených na ovlivněném bentonitu. Malý počet dat může mít dvojí důsledek ve zkrácení statistického vyhodnocení. V případě, že hodnoty vykazují malý rozptyl, je velmi úzký i interval spolehlivosti. Interval spolehlivosti vyhodnocený ze třech a méně hodnot může tedy dát velmi úzký interval spolehlivosti a důsledkem je, že porovnávané řady ovlivněného bentonitu jsou falešně vyhodnoceny jako ovlivněné. Opačným jevem, který lze pozorovat v případě bentonitu Stránce, kde byly měřeny pouze tři hodnoty na neovlivněném bentonitu, je velmi široký interval spolehlivosti. Tím v podstatě všechny pásy spolehlivosti ovlivněného bentonitu padnou do pásu spolehlivosti neovlivněného bentonitu a jakékoli ovlivnění je vyloučené.

Z důvodu velmi širokých intervalů spolehlivosti neovlivněného bentonitu je problematické vyhodnocení bentonitu Zelený jíł, Rokle a Stránce. Velké rozptyly jsou dány heterogenitou těchto bentonitů, která je způsobena procesem jejich získání, jelikož se jedná o bentonity kopané, nehomogenizované. Na BaM neproběhlo žádné měření jeho ovlivněné formy. Pro vyhodnocení jsou použitelná data z měření na BCV a B75. Na základě statistického vyhodnocení byly zaznamenány změny v hydraulické vodivosti bentonitu BCV i B75 po tepelném zatížení v suchém i vlhkém stavu. Trend vývoje hydraulické vodivosti bentonitu zatěžovaného ve vlhkém stavu je opačný než trend vývoje hydraulické vodivosti bentonitu zatěžovaného v suchém stavu. Bentonit zatěžovaný za sucha ve formě prášku vykazuje vyšší hydraulickou vodivost v oblasti nízkých objemových hmotností po 6 měsících tepelného zatěžování. Po 12 měsících je patrný nárůst

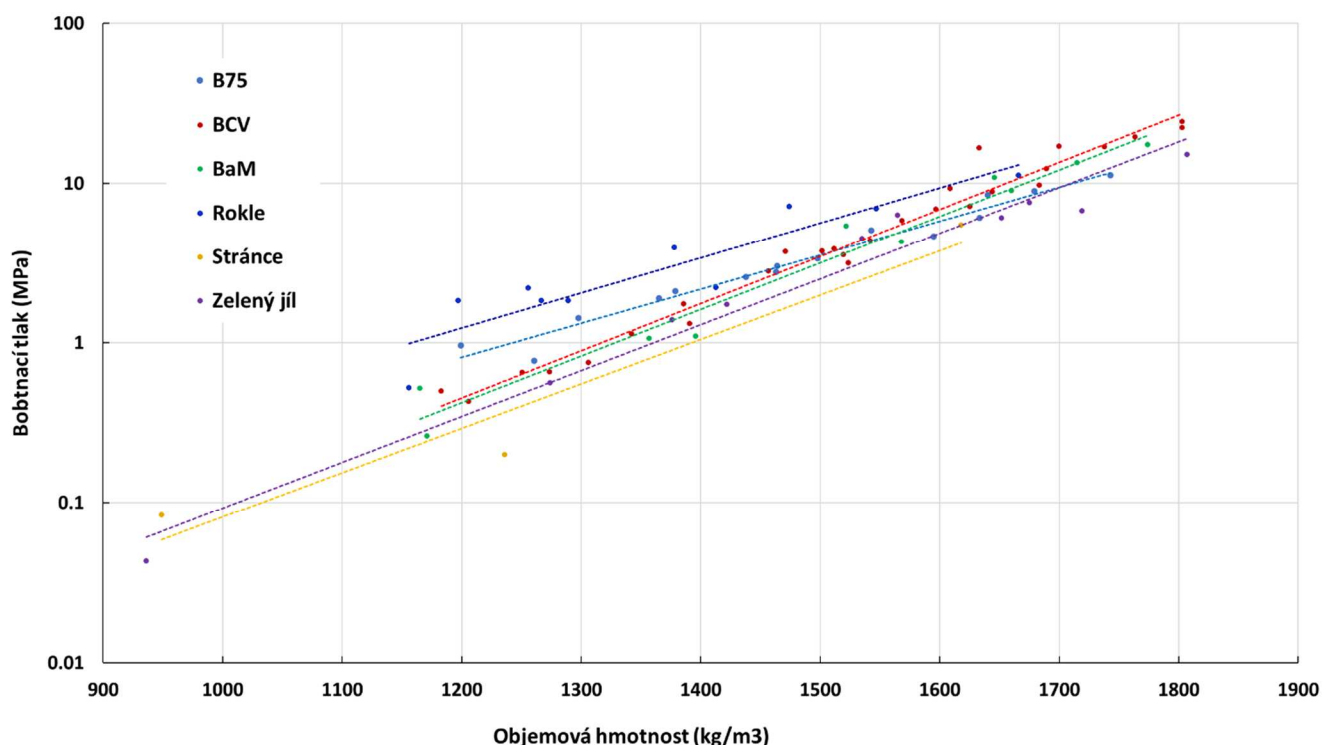
hydraulické vodivosti i v oblasti vyšších objemových hmotností s tím, že k dalšímu nárůstu v oblasti nízkých objemových hmotností již nedochází. U bentonitu zatěžovaného ve formě suspenze je trend opačný. Po 6 měsících tepelného zatěžování došlo k systematickému poklesu hydraulické vodivosti v celém definičním oboru objemových hmotností sušiny u obou bentonitů (B75 a BCV).

2.10 Bobtnací tlak

Bobtnací tlak je jedním z parametrů, na které se kladou nároky spojené s dlouhodobou bezpečností hlubinného úložiště RAO, kde bude bentonit použit. Případné změny bobtnacího tlaku závisí na geochemii prostředí a případné změně mineralogie.

Koncept statistického vyhodnocení a klasifikace ovlivnění bobtnacího tlaku je shodná s vyhodnocením hydraulické vodivosti. V obou případech se jedná o dvourozměrná data. V případě bobtnacího tlaku byla jako best fit vyhodnocena exponenciální aproximační funkce, na rozdíl od hydraulické vodivosti, kde byla zvolena aproximace přímkou.

Graf na Obr. 136 zobrazuje shrnutí dat měřených na bentonitech v neovlivněném stavu metodou konstantního objemu, která je popsána v metodikách (Vašíček et al. 2021). V následujících kapitolách je porovnání bobtnacího tlaku neovlivněného a ovlivněného bentonitu po jednotlivých typech.

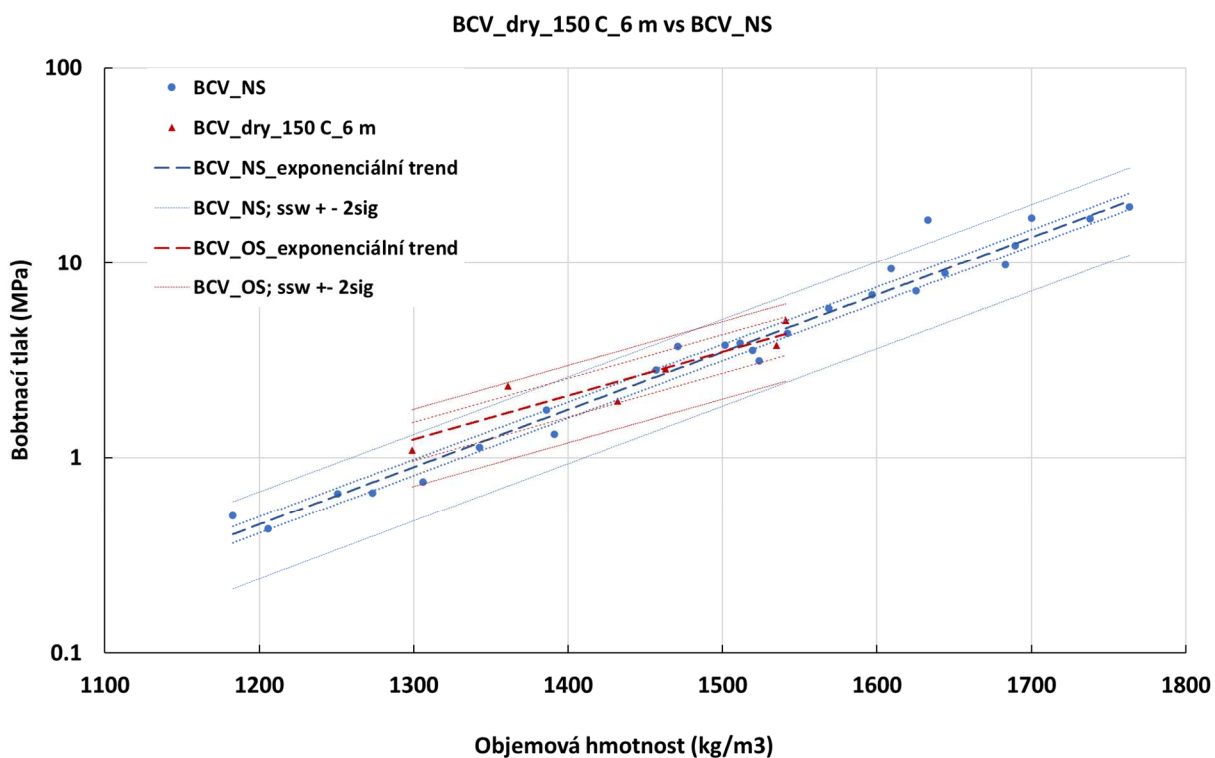


Obr. 136 Bobtnací tlak všech předmětných bentonitů v neovlivněném stavu.

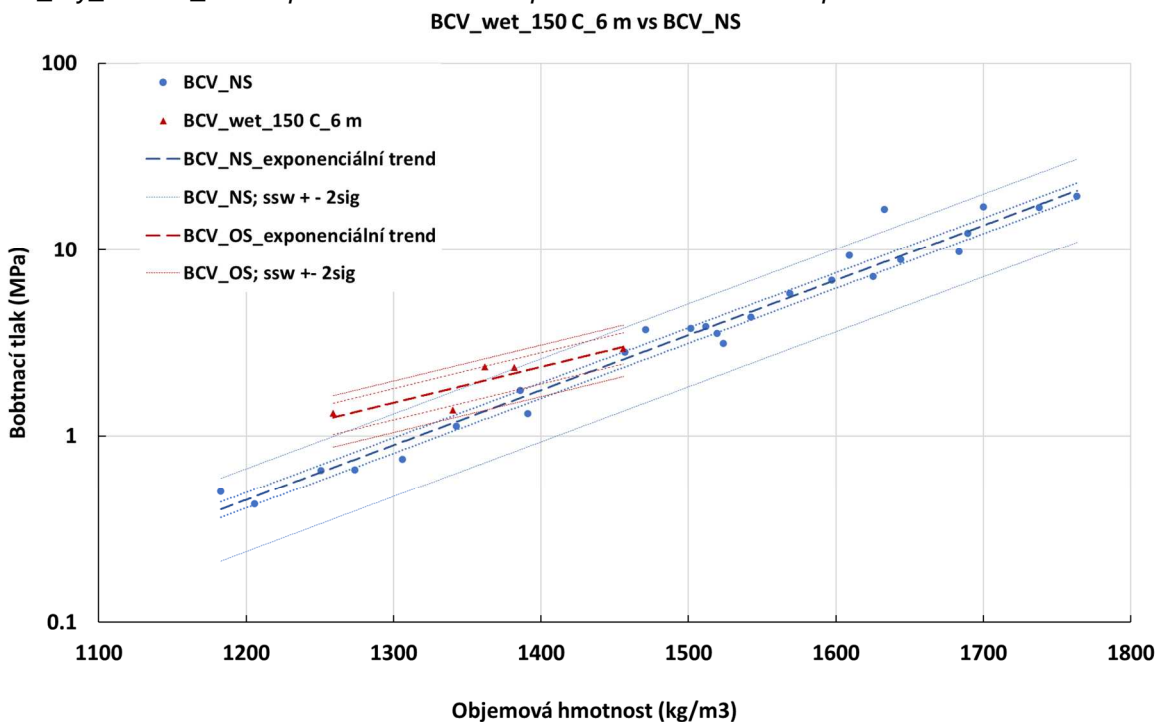
2.10.1 SWEP - BCV

Data pro vyhodnocení bobtnacího tlaku pochází ze sedmi zdrojů:

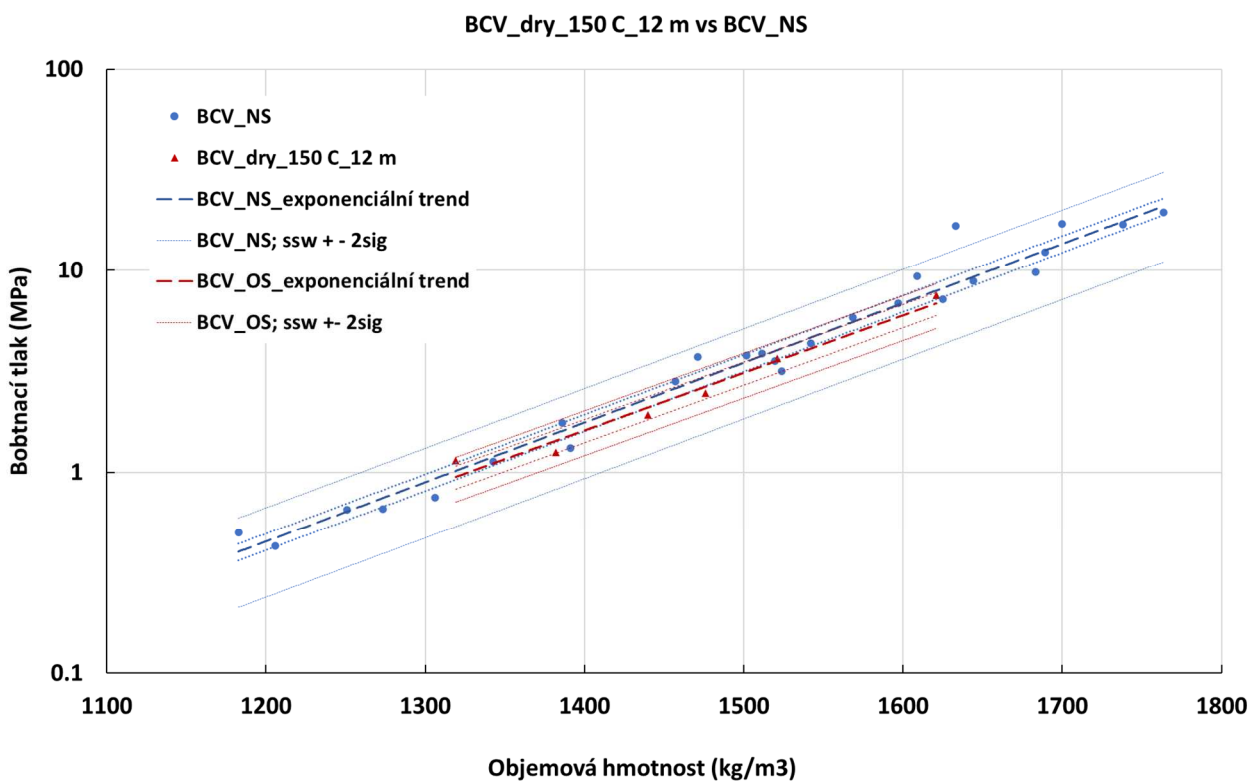
- V rámci projektu zaměřeném na kompletní charakterizaci bentonitu BCV 2017 byl určen bobtnací tlak BCV_NS (Červinka et al. 2018).
- Projekt Geotechnická charakterizace homoionních forem bentonitu BCV 2017 byl zaměřen na charakterizaci různých forem BCV bentonitu (Na – BCV, Ca-BCV, Na/Ca-BCV). Bentonit nebyl tepelně ovlivněn. Byla určena vždy jedna sada dat o různých objemových hmotnostech sušiny pro každou formu (Vašíček et al. 2019).
- V rámci projektu EURAD HITEC jsou určovány hydraulické a geotechnické charakteristiky bentonitu BCV po 6, 12 a 24 měsících tepelného zatížení teplotou 150 °C. Bentonit je zatěžován ve vlhkém stavu, kdy je zalit destilovanou vodou a v suchém stavu. Z tohoto projektu pochází sady dat bobtnacího tlaku pro různé objemové hmotnosti sušiny po 6 a 12 měsících zahřívání v suchém stavu a po 6 měsících zahřívání ve vlhkém stavu (Černochová et al. 2021).
- Bobtnací tlak BCV_NS a peletizovaného BCV byl určen také v rámci projektu Interakční experiment (Svoboda et al. 2019b).
- Cílem projektu zaměřeném na laboratorní zkoušky bentonitu BCV za zvýšené teploty bylo měření hydraulických a geotechnických charakteristik v průběhu tepelného zatěžování. Na sadách vzorků BCV byl měřen bobtnací tlak při současném zahřívání teplotou 40 °C, 60 °C a 80 °C. V projektu byl také měřen bobtnací tlak na sadě vzorků neovlivněného BCV o různé objemové hmotnosti sušiny. (Najser et al. 2020, Najser et al. 2021).



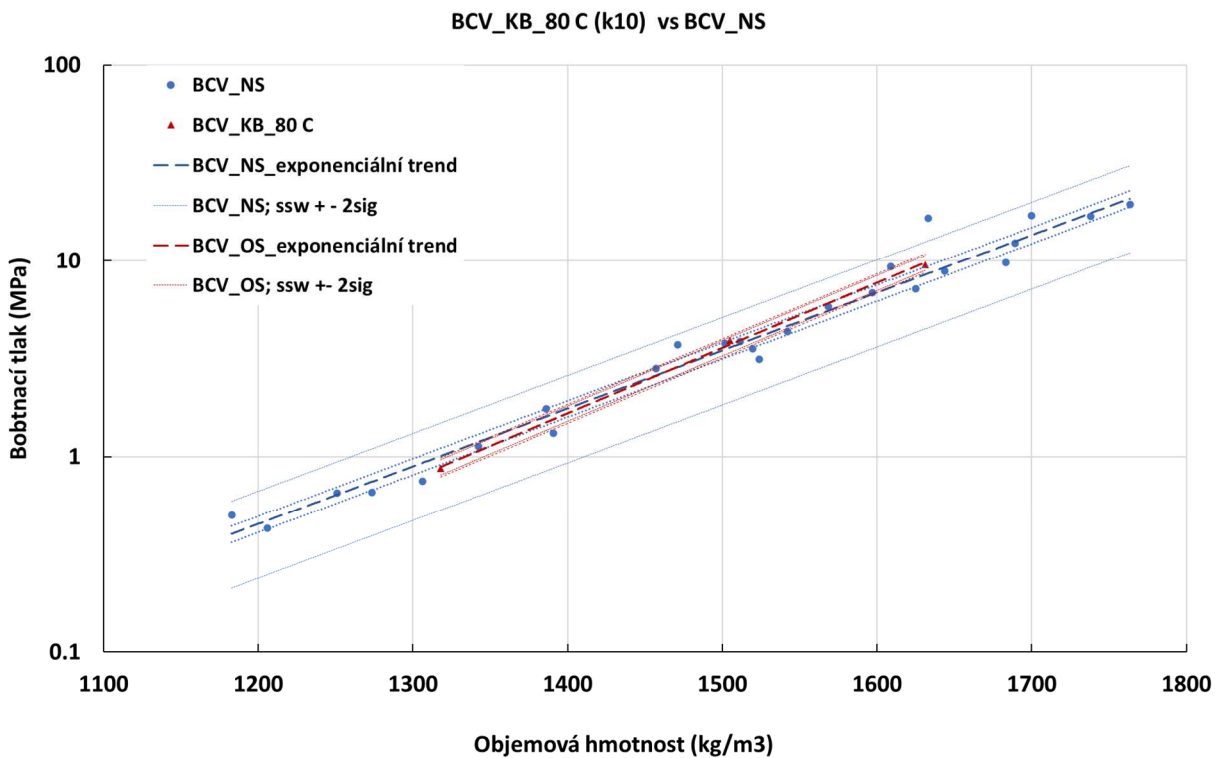
Obr. 137 Porovnání bobtnacího tlaku a charakteristických křivek bentonitu BCV_NS a bentonitu BCV_dry_150 C_6 m po 6 měsících tepelného zatěžování teplotou 150 °C v suchém stavu.



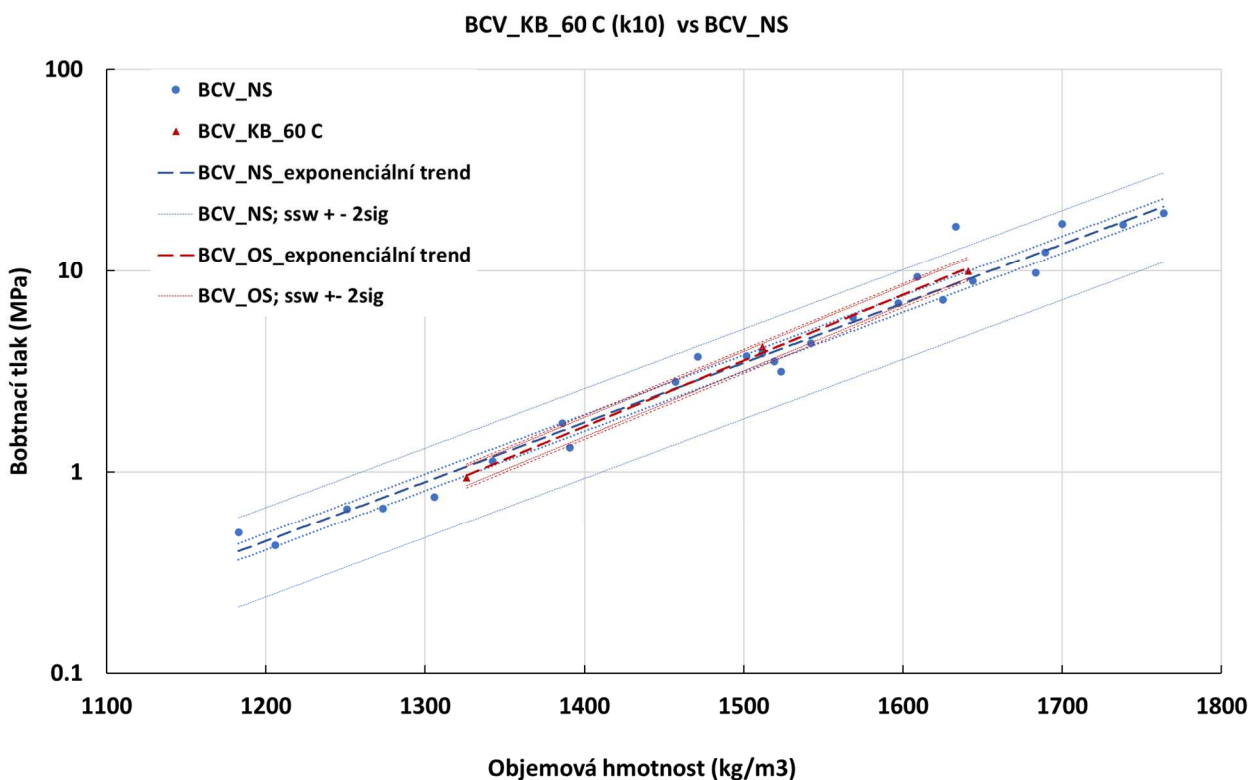
Obr. 138 Porovnání bobtnacího tlaku a charakteristických křivek bentonitu BCV_NS a bentonitu BCV_wet_150 C_6 m po 6 měsících tepelného zatěžování teplotou 150 °C ve vlhkém stavu.



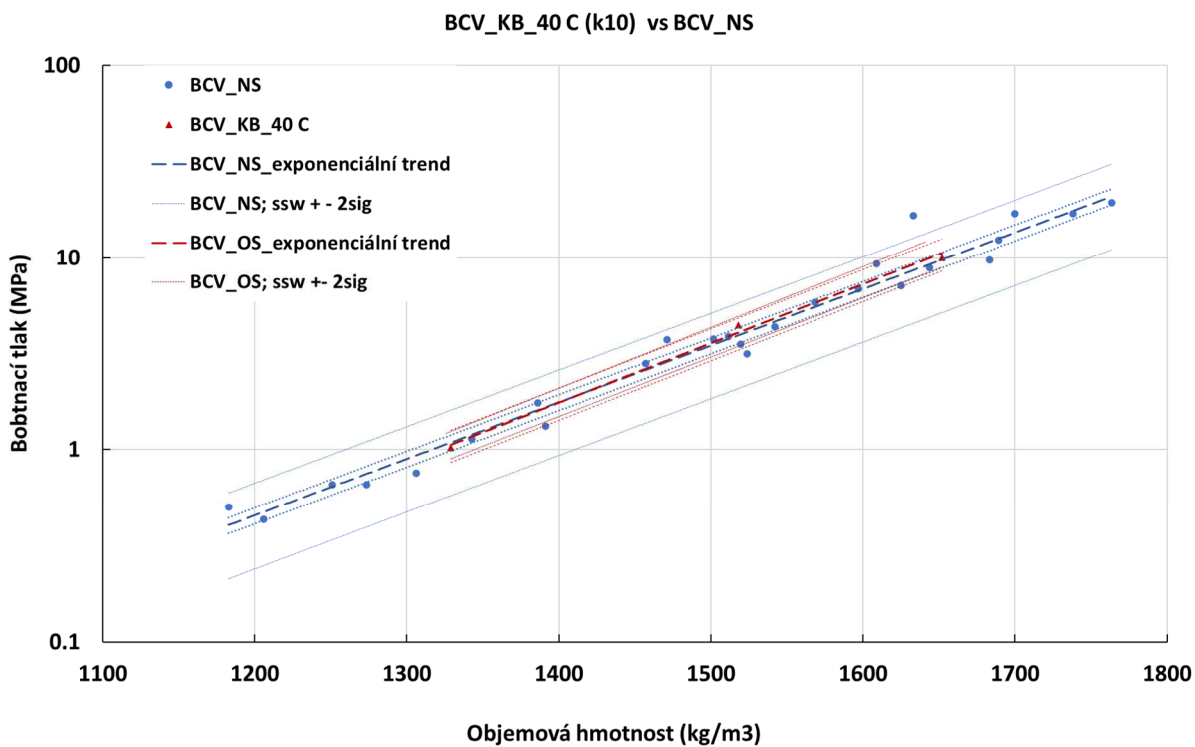
Obr. 139 Porovnání bobtnacího tlaku a charakteristických křivek bentonitu BCV_NS a bentonitu BCV_dry_150 C_12 m po 12 měsících tepelného zatěžování teplotou 150 °C v suchém stavu.



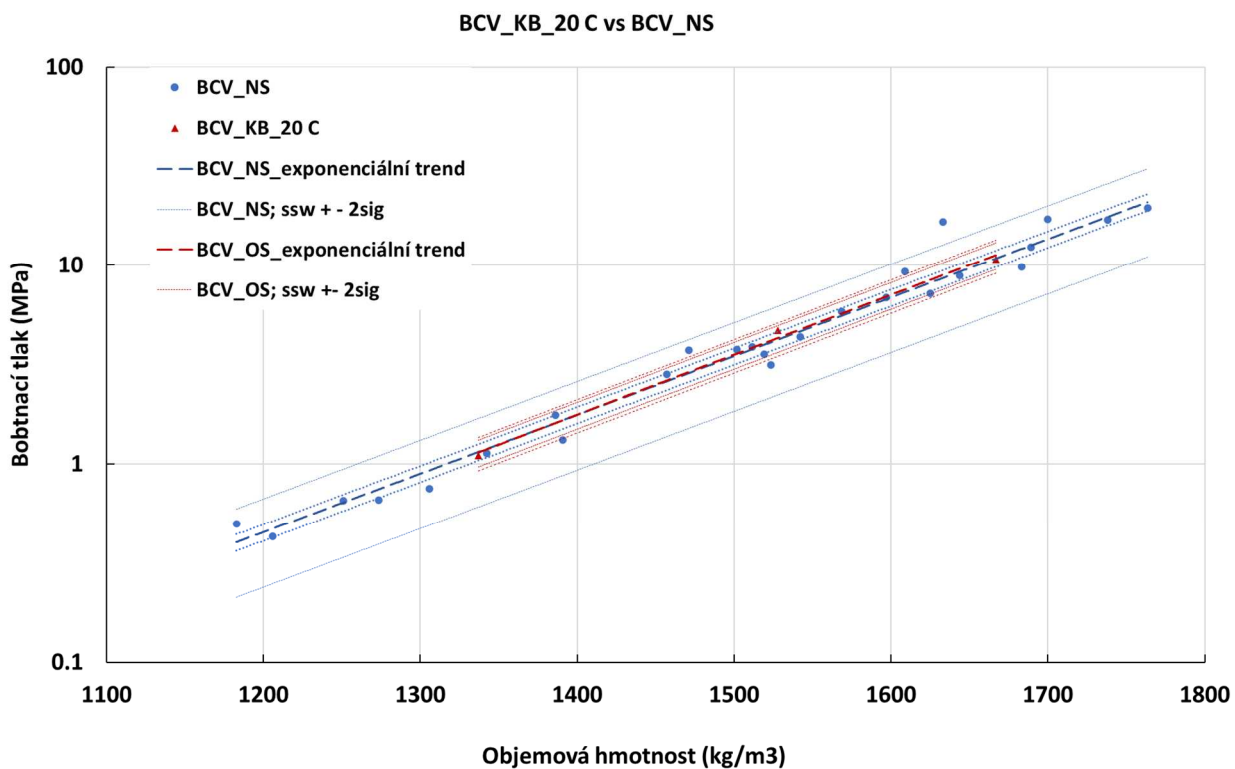
Obr. 140 Porovnání bobtnacího tlaku a charakteristických křivek bentonitu BCV_NS a bobtnacího tlaku BCV v průběhu zahřívání teplotou 80 °C.



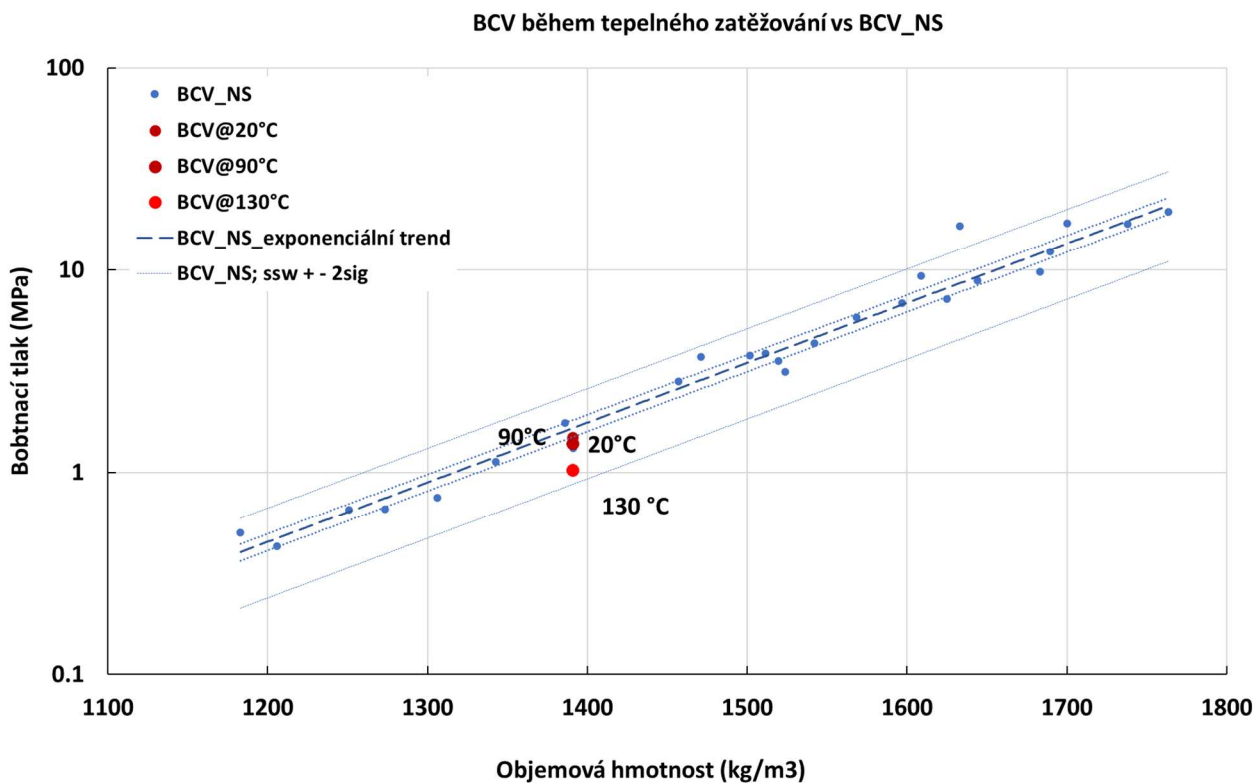
Obr. 141 Porovnání bobtnacího tlaku a charakteristických křivek bentonitu BCV_NS a bobtnacího tlaku BCV v průběhu zahřívání teplotou 60 °C.



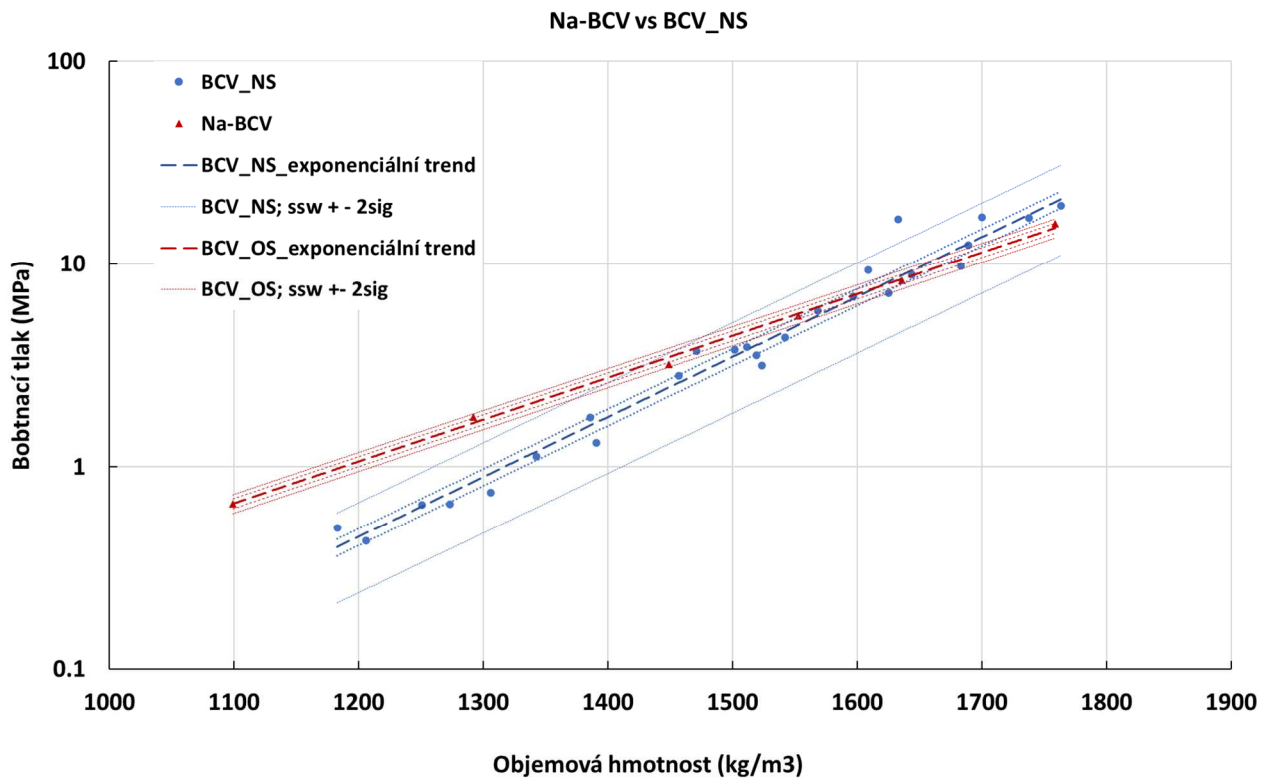
Obr. 142 Porovnání bobtnacího tlaku a charakteristických křivek bentonitu BCV_NS a bobtnacího tlaku BCV v průběhu zahřívání teplotou 40 °C.



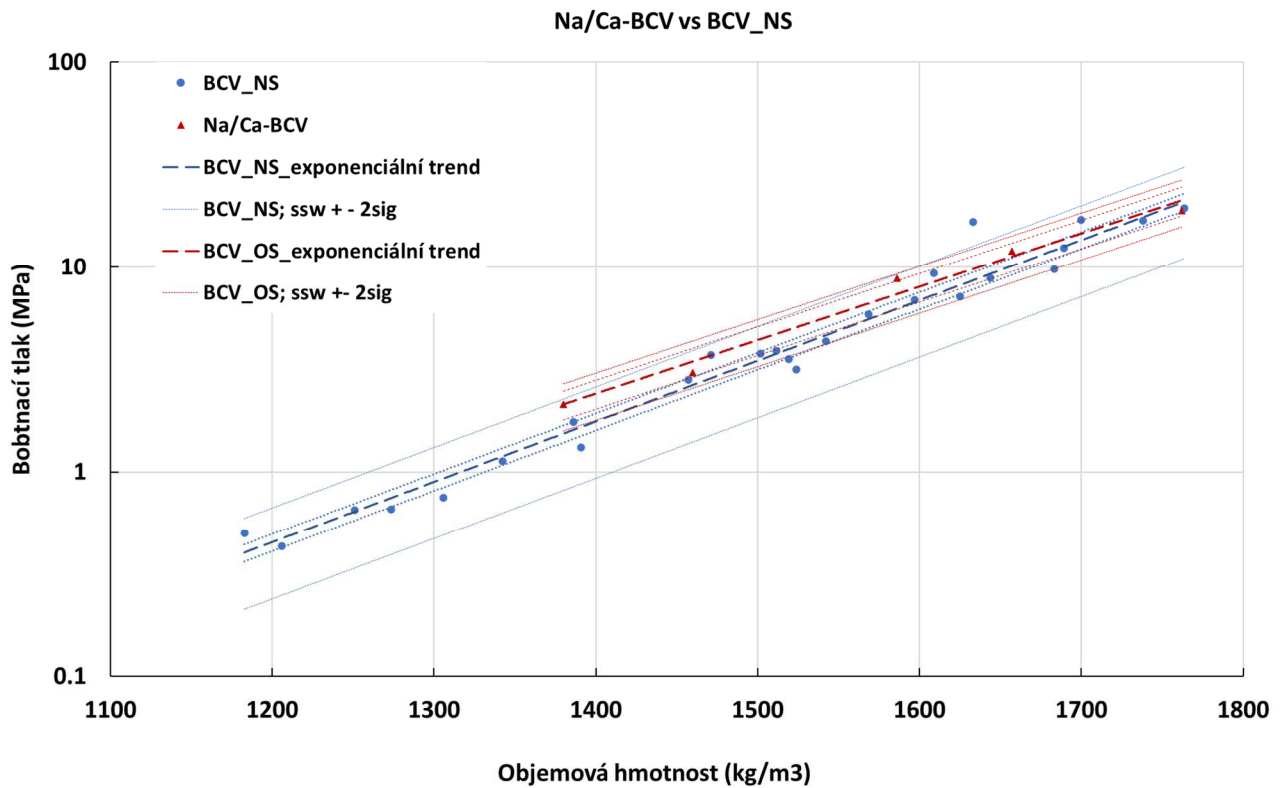
Obr. 143 Porovnání bobtnacího tlaku a charakteristických křivek bentonitu BCV_NS a bobtnacího tlaku BCV při teplotě 20 °C.



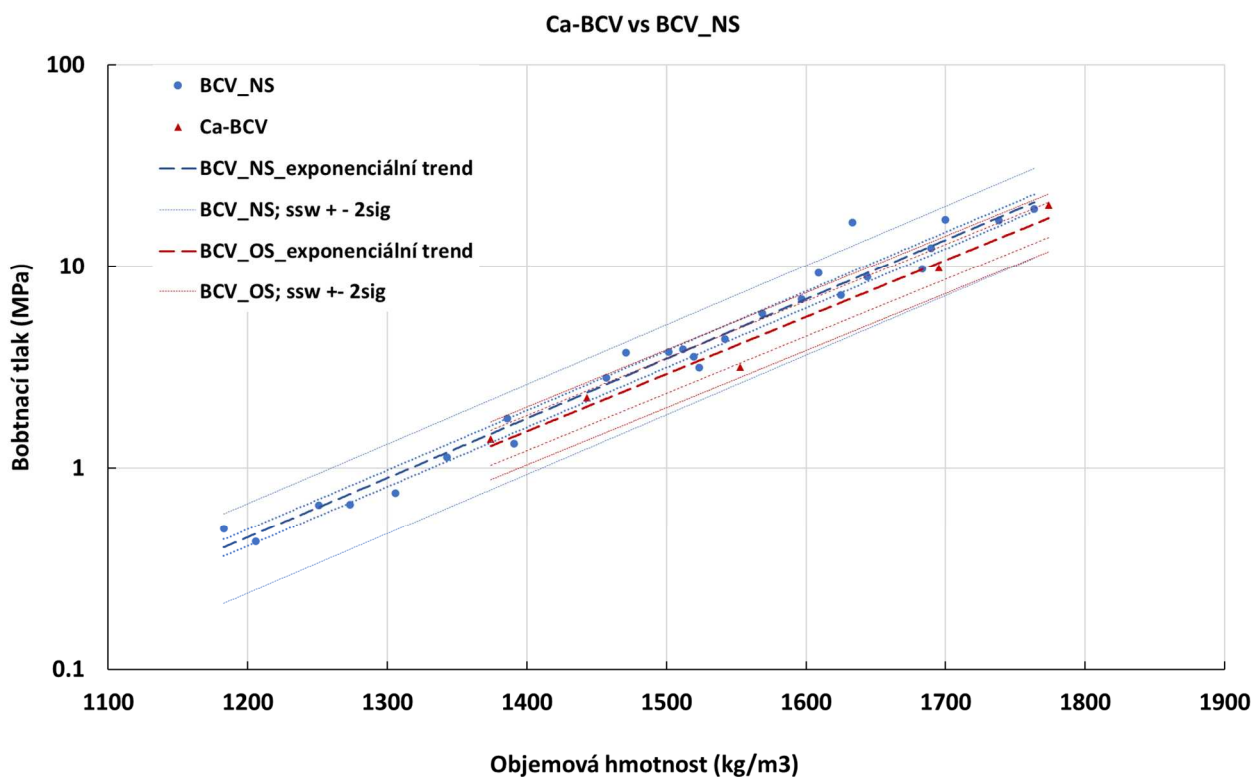
Obr. 144 Porovnání bobtnacího tlaku a charakteristických křivek bentonitu BCV_NS a bobtnacího tlaku BCV v průběhu zahřívání teplotou 20 °C, 90 °C a 130 °C.



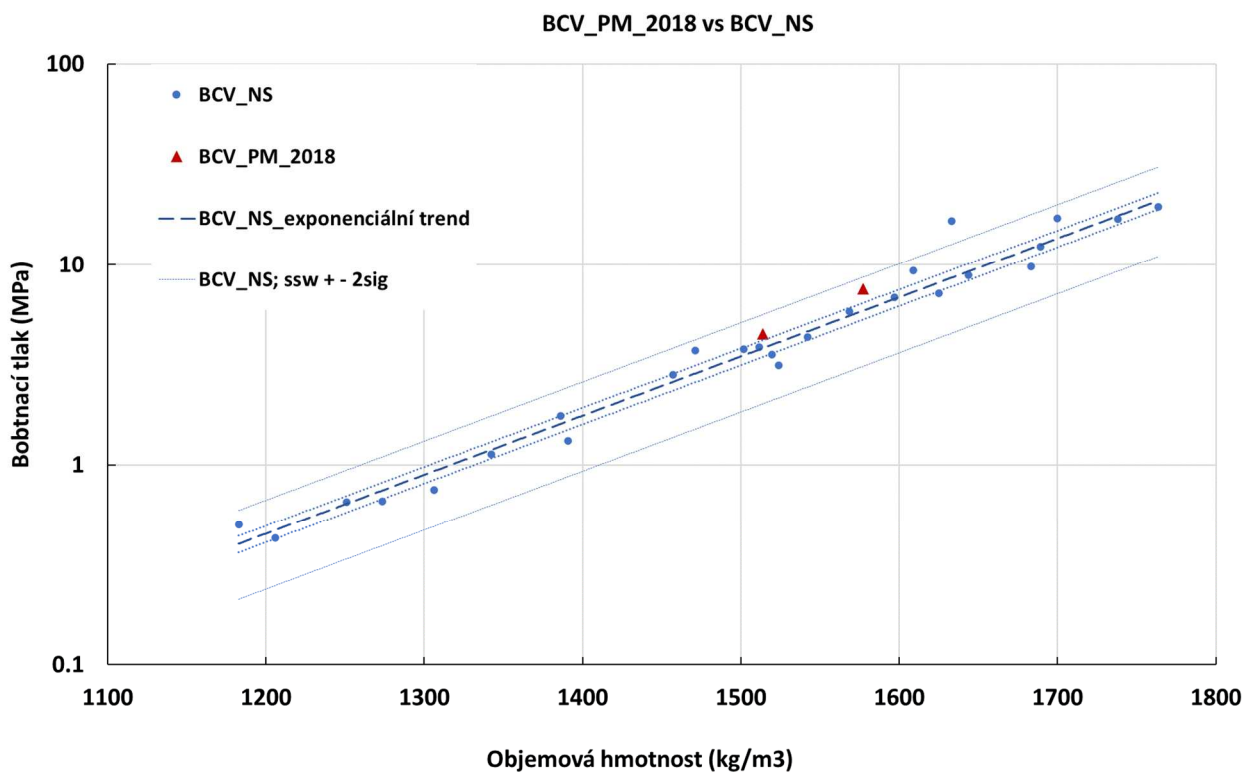
Obr. 145 Porovnání bobtnacího tlaku bentonitu BCV_NS a Na formy BCV_NS (označeno Na-BCV).



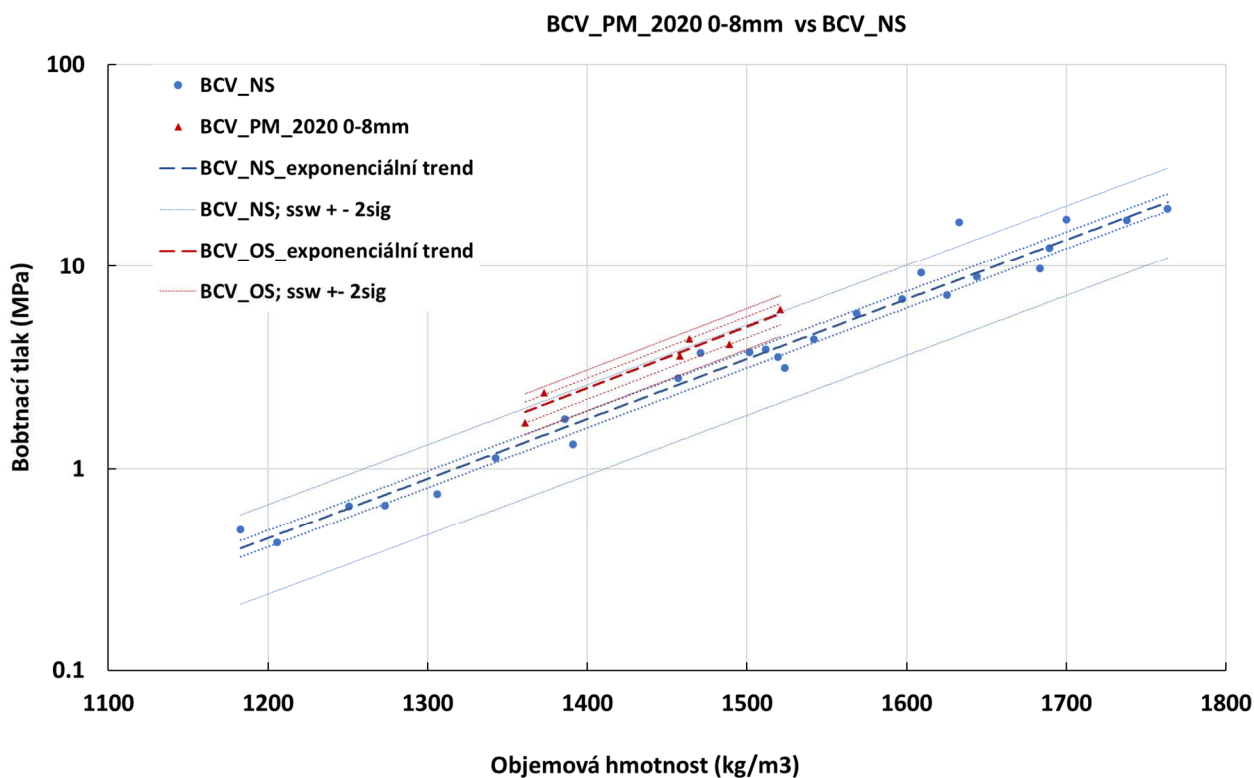
Obr. 146 Porovnání bobtnacího tlaku bentonitu BCV_NS a Na/Ca formy BCV_NS (označeno Na/Ca-BCV).



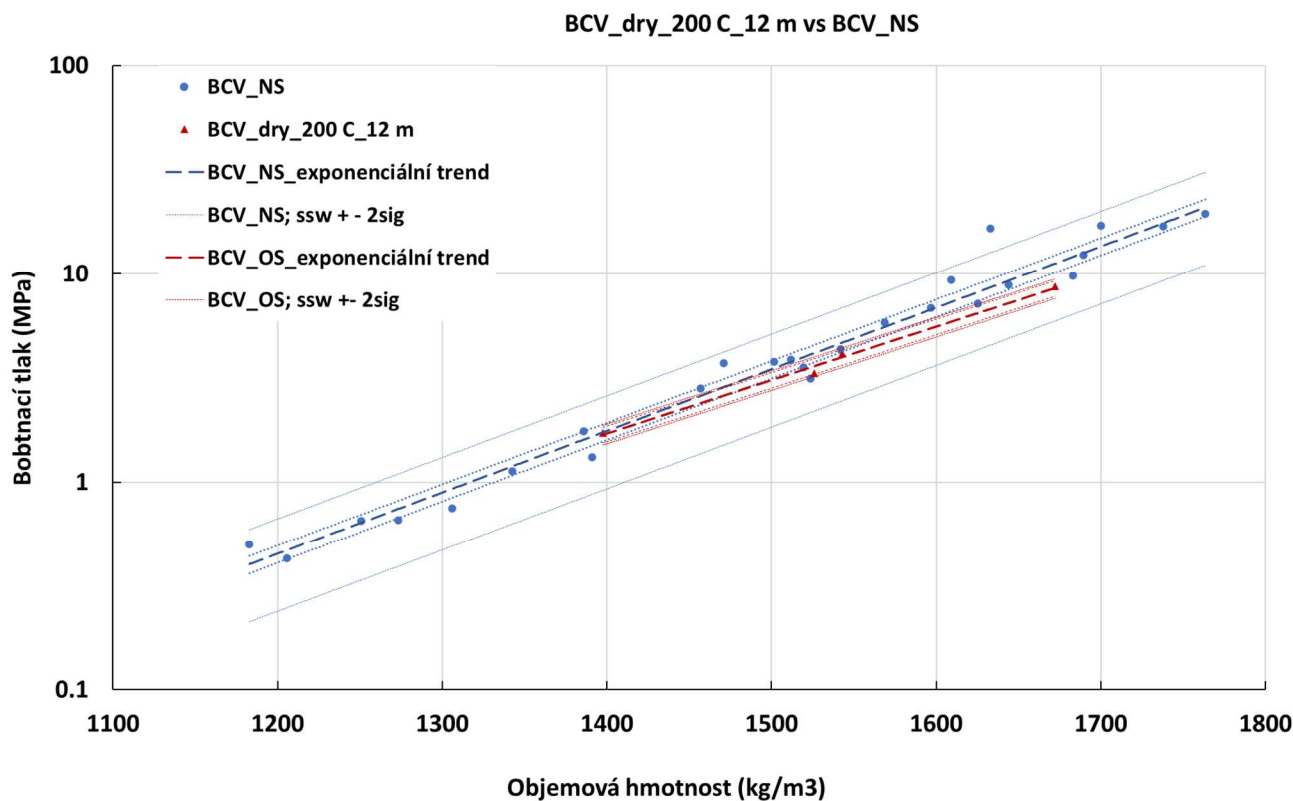
Obr. 147 Porovnání bobtnacího tlaku bentonitu BCV_NS a Ca formy BCV_NS (označeno Ca-BCV).



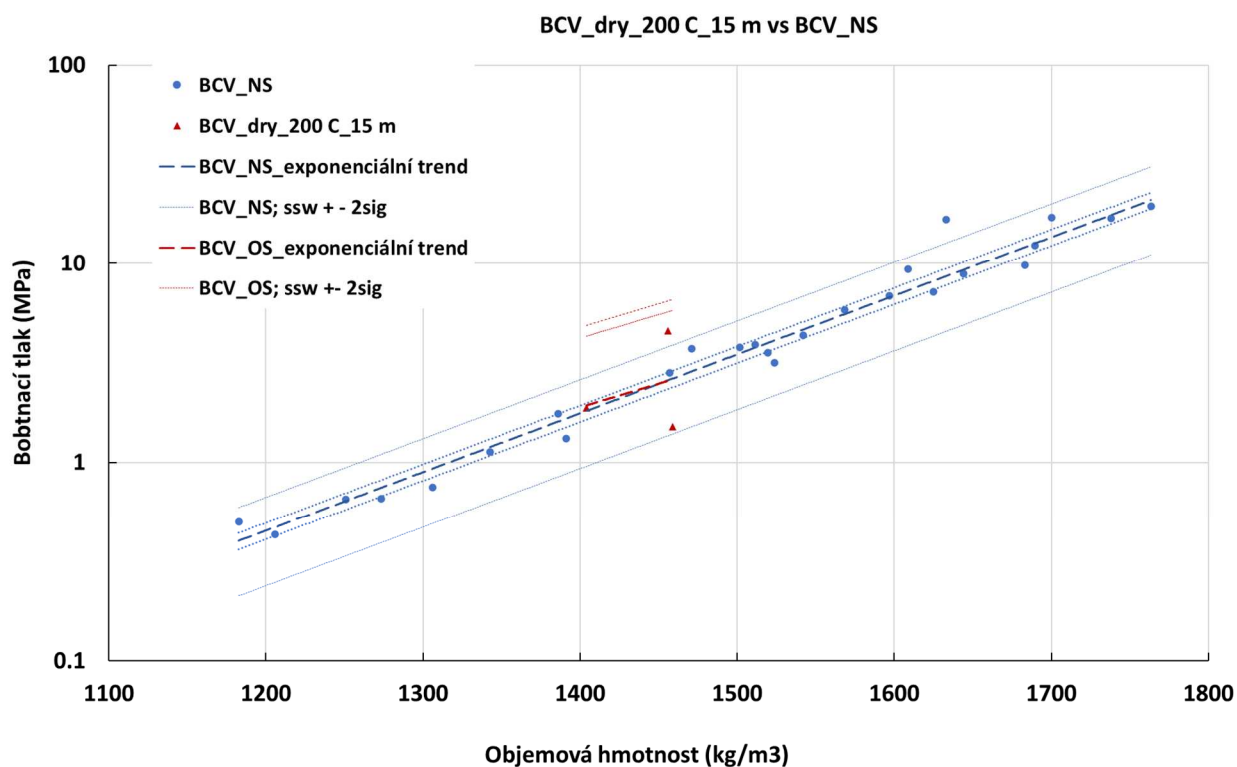
Obr. 148 Porovnání bobtnacího tlaku a charakteristických křivek bentonitu BCV_NS a peletizovaného bentonitu (BCV_PM_2018).



Obr. 149 Porovnání bobtnacího tlaku a charakteristických křivek bentonitu BCV_NS a peletizovaného bentonitu o frakci 0 – 8 mm (BCV_PM_2020 mm).



Obr. 150 Porovnání bobtnacího tlaku a charakteristických křivek bentonitu BCV_NS a bentonitu BCV_dry_200 C_12 m po 12 měsících tepelného zatěžování teplotou 200 °C v suchém stavu.



Obr. 151 Porovnání bobtnacího tlaku a charakteristických křivek bentonitu BCV_NS a bentonitu BCV_dry_200 C_15 m po 15 měsících tepelného zatěžování teplotou 200 °C v suchém stavu.

V tabulce Tab. 11 je celkové vyhodnocení ovlivnění bobtnacího tlaku tepelným zatížením bentonitu BCV v suchém a vlhkém stavu.

Hodnocení je vždy vzhledem k nezatíženému bentonitu. Systém hodnocení je následující:

- 0 interval spolehlivost OS bentonitu se nachází z více než 75 % uvnitř intervalu spolehlivosti NS bentonitu.
- + vyšší hodnoty – více než polovina intervalu spolehlivosti nad intervalem spolehlivosti NS bentonitu.
- ++ významně vyšší hodnoty – pás spolehlivosti OS bentonitu mimo pás spolehlivosti NS bentonitu.
- nižší hodnoty – více než polovina intervalu spolehlivosti pod intervalem spolehlivosti NS bentonitu.
- významně nižší hodnoty – pás spolehlivosti OS bentonitu mimo pás spolehlivosti NS bentonitu.

Parametr „orientace“ v tabulce Tab. 11 je vyplněn pouze pokud jsou intervaly spolehlivosti rovnoběžné a jen částečně se překrývají, nebo když k překryvu nedochází. V případě, že jsou charakteristické čáry rovnoběžné je možné uvažovat o jisté systematickosti v chování bentonitu v celém rozsahu sledovaných objemových hmotnostech sušiny. Ve většině případů jsou vůči sobě v obecné poloze, kdy dochází k protnutí, nebo vzájemnému přibližování charakteristických čar. Významné přibližování či oddalování je viditelné v klasifikaci v jednotlivých intervalech.

Tab. 11 Klasifikace ovlivnění bobtnacího tlaku tepelným zatížením bentonitu BCV. Intervaly se vztahují k rozsahu objemových hmotností a k nim vztaženým charakteristickým křivkám zatíženého bentonitu BCV. n – počet měřených prvků. Velikost intervalu odpovídá $(\rho_{dmax} - \rho_{dmin})/4$. Orientace udává vzájemnou polohu pásů spolehlivosti, v případě, kdy není uvedeno „rovnoběžné“ je poloha obecná. ρ_{dmax} – maximální objemová hmotnost sušiny, ρ_{dmin} – minimální objemová hmotnost sušiny.

název bentonitu	n	ρ_{dmin} (kg/m ³)	ρ_{dmax} (kg/m ³)	zatížený bentonit – č. intervalu				orientace
				1.	2.	3.	4.	
BCV_NS	26	1170	1780					
BCV_dry_150 C_6 m	9	1300	1550	+	0	0	0	
BCV_wet_150 C_6 m	5	1250	1450	+	+	+	0	
BCV_dry_150 C_12 m	9	1310	1620	0	0	0	0	
BCV_KB_80 C	3	1320	1650	0	0	0	0	
BCV_KB_60 C	3	1320	1650	0	0	0	0	
BCV_KB_40 C	3	1320	1650	0	0	0	0	
BCV_KB_20 C	3	1320	1650	0	0	0	0	
BCV@20		1393		bodová data		0		
BCV@90		1393		bodová data		0		
BCV@130		1393		bodová data		0		
Na-BCV	6	1100	1770	++	++	0	0	
Na/Ca-BCV	5	1380	1750	0	0	0	0	
Ca-BCV	5	1380	1780	0	0	0	0	
BCV_dry_200 C_12 m	4	1400	1680	0	0	0	0	
BCV_dry_200 C_15 m	3	1400	1450	0	0	0	0	

Tepelné zatížení má vliv na bobtnací tlak bentonitu BCV zatěžovaného v suchém i vlhkém stavu. Ale jen po 6 měsících zatěžování teplotou 150 °C. Teplota 200 °C dle statistického vyhodnocení vliv nemá. Změna bobtnacích schopností dle naměřených dat není trvalá, ani není zaznamenána žádný vývoj změny. Po 12 měsících zatěžování se opět vrací do intervalu spolehlivosti neovlivněného BCV. Nárůst bobtnacího tlaku po tepelném zatížení se projevil pouze v oblasti nižších objemových hmotnostech sušiny. Změna není významná a trvalá.

2.10.2 SWEP - Rokle

Data pro OS Rokle pocházejí z laboratorních a in-situ experimentů. Data pochází z jednoho zdroje.

V projektu zaměřeném na saturační media (Pacovský et al. 2010a) byl bentonit v obou případech vystavován kombinovaným zatížením teplem a dvěma typům saturačního media. Přirozené podzemní vodě „Josef“ a syntetické „SGW-K“. Testovány byly dva typy bentonitů založené na bentonitu Rokle.

- Čistá Rokle.
- Substrát Mock-Up-CZ (směs bentonitu Rokle, křemenného písku a grafitu) po zatížení teplotou 60-70 °C po dobu 4 let.

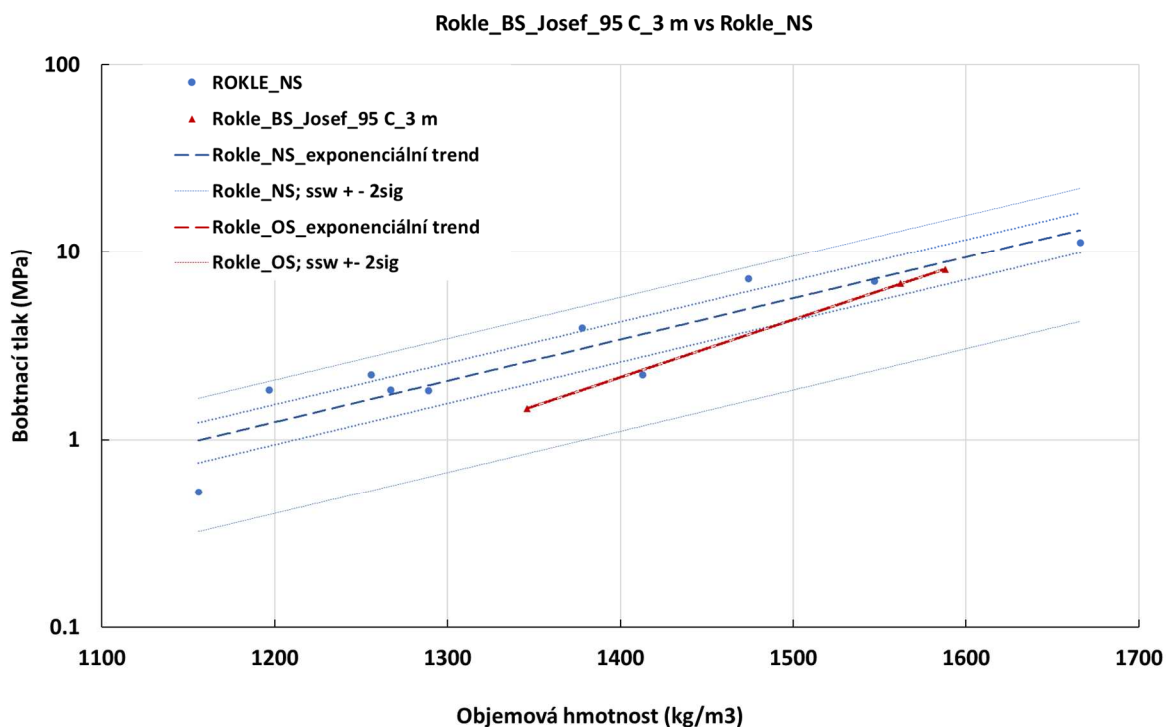
Laboratorní experimenty

- Vzorky bentonitů byly umístěny v tlakových nádobách a zality saturačním médiem (vodou „Josef“ či „SGW-K“). Procedura spočívala v zahřívání (zatěžování) tlakových nádob teplotou 95 °C po dobu 13 dnů a následném vystavení nádob běžné laboratorní teplotě (1 den). Odběry byly poté provedeny po 3, 6, 12 a 18 měsících (Pacovský et al. 2010a)

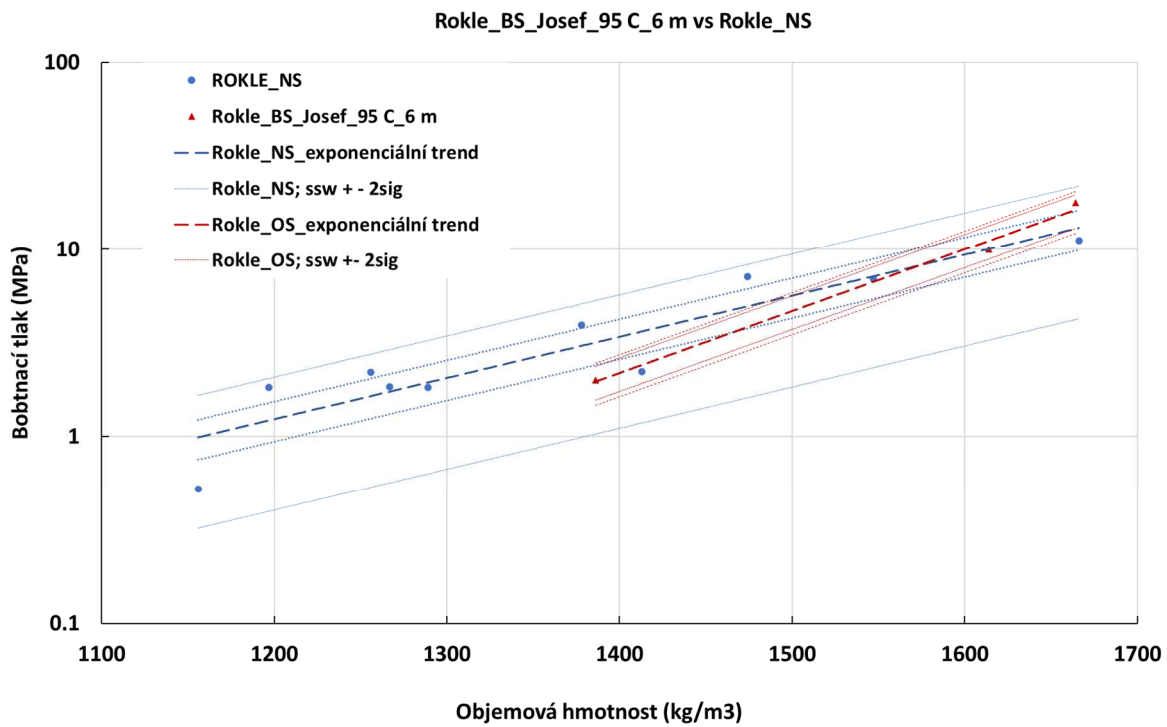
In-situ experimenty

- Do vrtu v podzemí v blízkosti tepelného zdroje byly umístěny perforované patrony s bentonitovou náplní (Rokle, Mock-Up-CZ). Bentonit byl vystavován přirozenému podzemnímu prostředí. Saturačním médiem byla přirozená voda „Josef“. Náplň patron byla zatěžována teplotou do 100°C. Odběry byly poté provedeny po 3, 6, 12 a 18 měsících a vzorky testovány (Pacovský et al. 2010a). V rámci tohoto projektu byly také měřeny hydraulické vodivosti neovlivněného bentonitu Rokle.

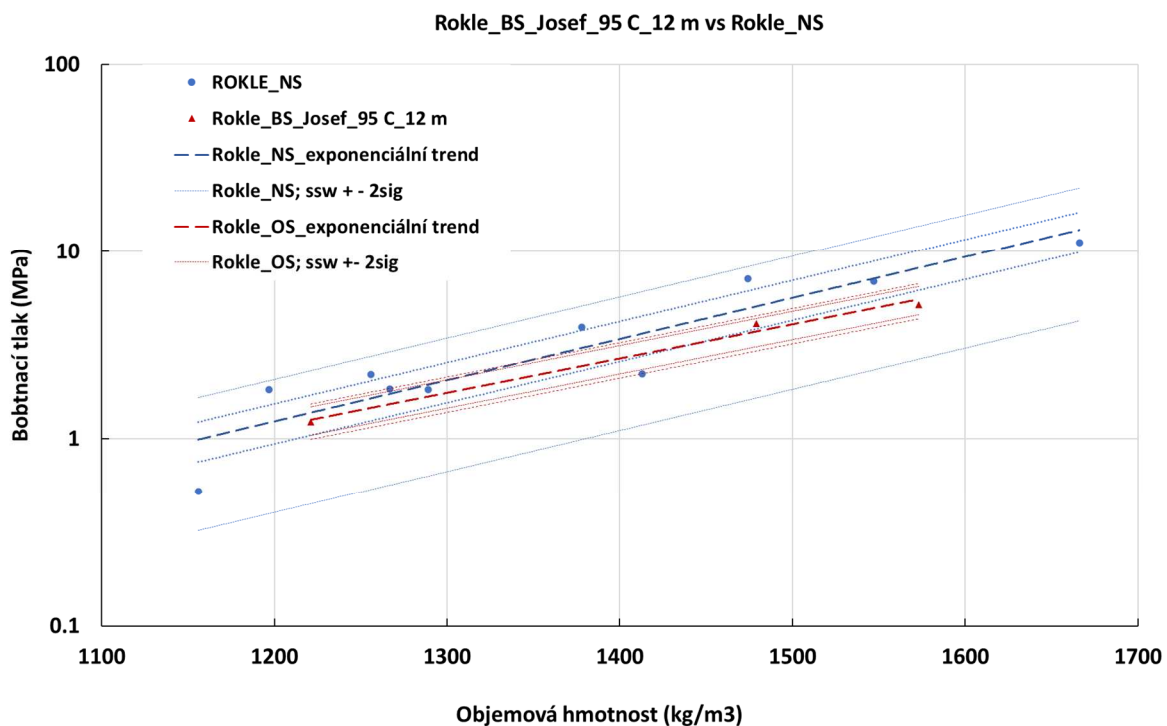
Dalším zdrojem dat měřených na neovlivněném bentonitu jsou hodnoty získané v rámci analýzy mineralogie a těsnících vlastností bentonitů, která byla pro instituci SKB provedena pracovištěm CT (Clay Technology AB). Bobtnací tlak byl měřen při použití destilované vody jako saturačního média.



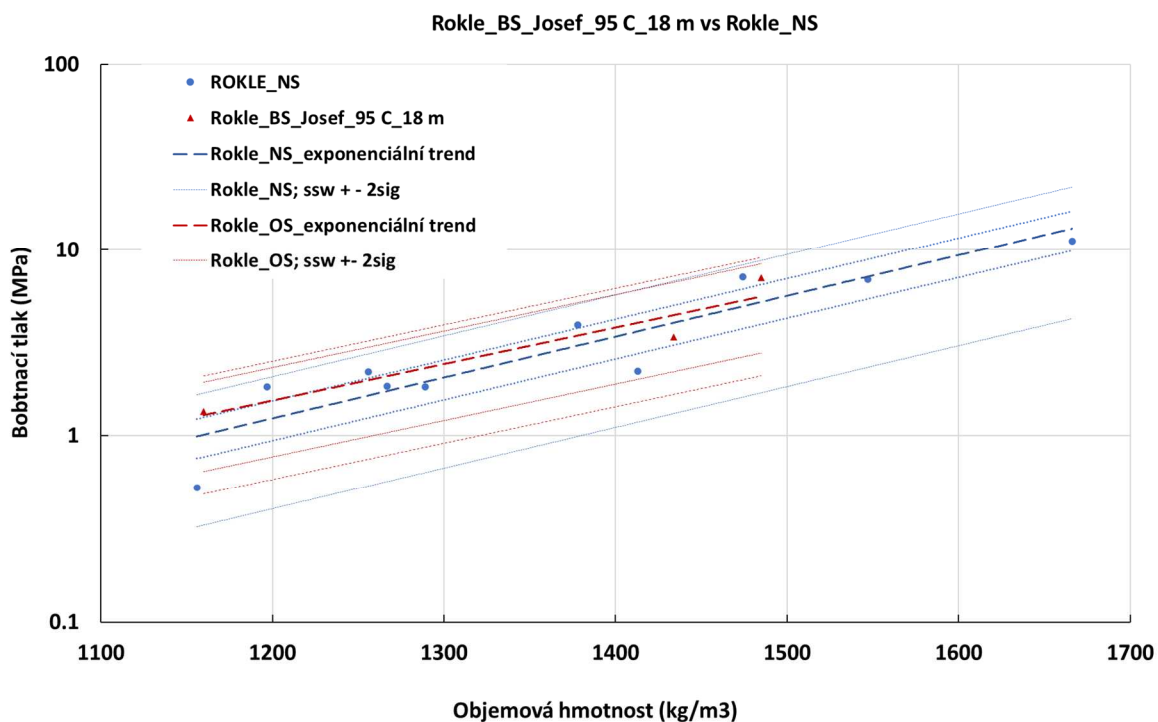
Obr. 152 Porovnání bobtnacího tlaku Rokle_NS a Rokle_BS_Josef_95 C_3 m po 3 měsících tepelného zatěžování při 95 °C a vystavení vodě Josef.



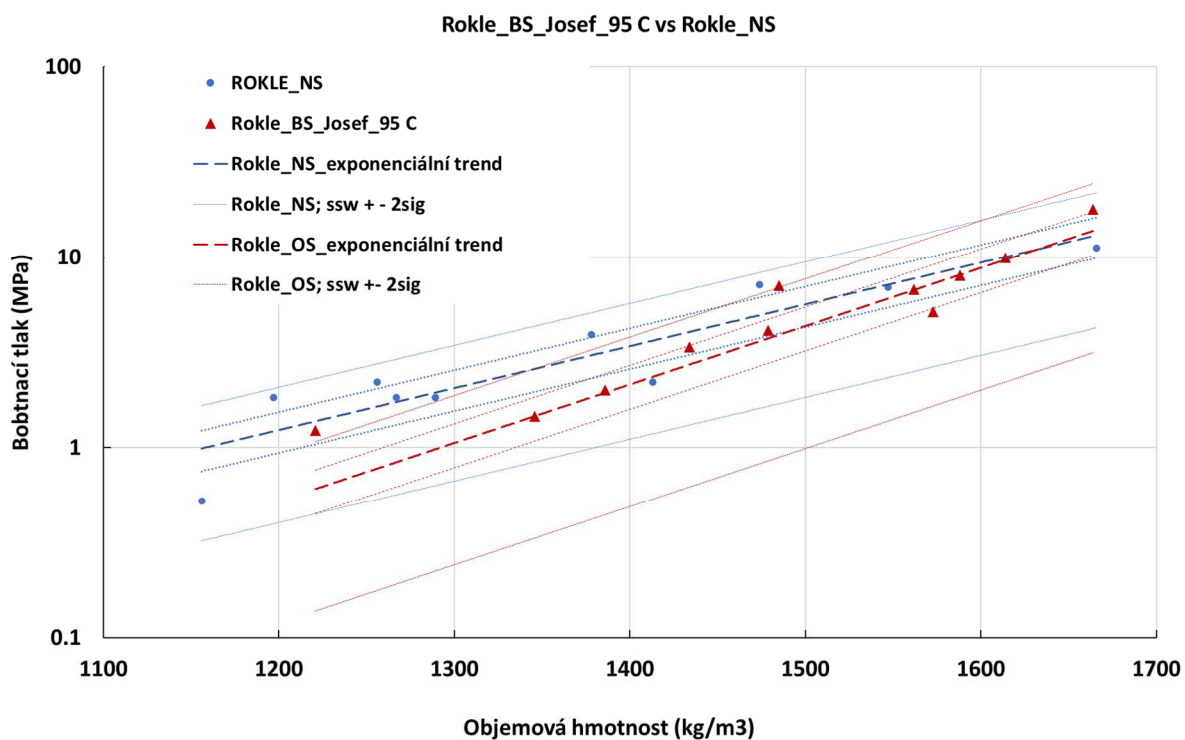
Obr. 153 Porovnání bobtnacího tlaku Rokle_NS a Rokle_BS_Josef_95 C_6 m po 6 měsících tepelného zatěžování při 95 °C a vystavení vodě Josef.



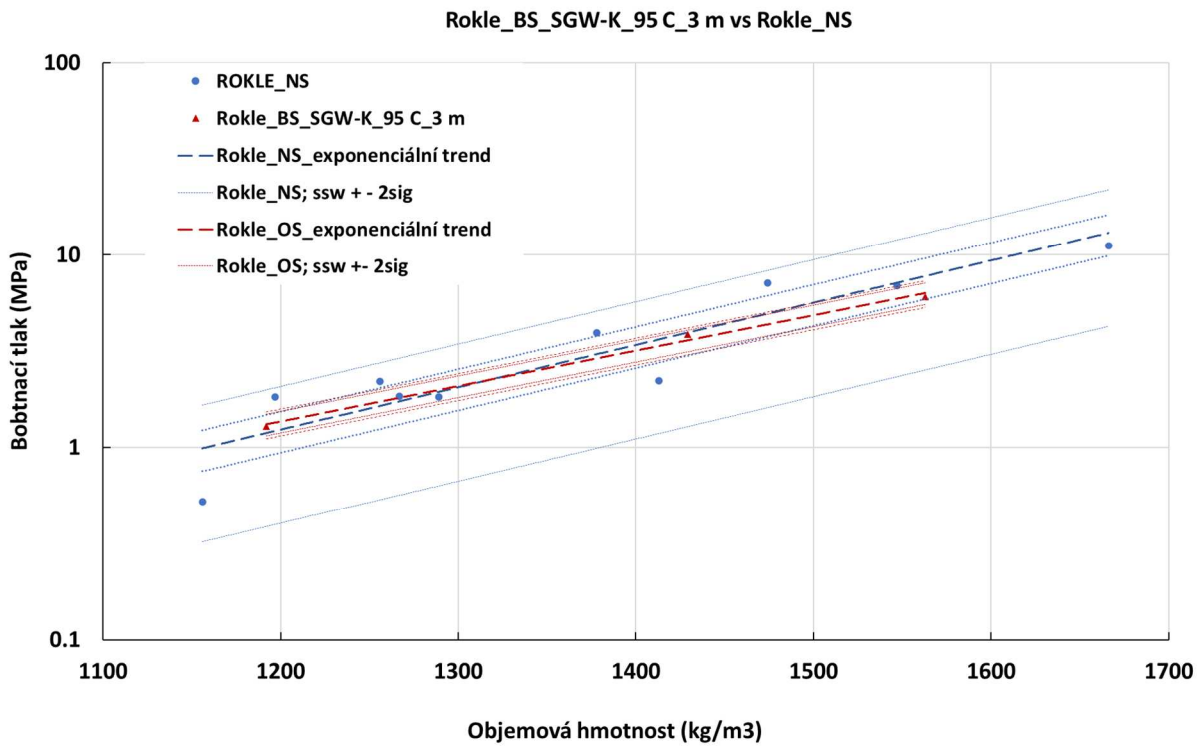
Obr. 154 Porovnání bobtnacího tlaku Rokle_NS a Rokle_BS_Josef_95 C_12 m po 12 měsících tepelného zatěžování při 95 °C a vystavení vodě Josef.



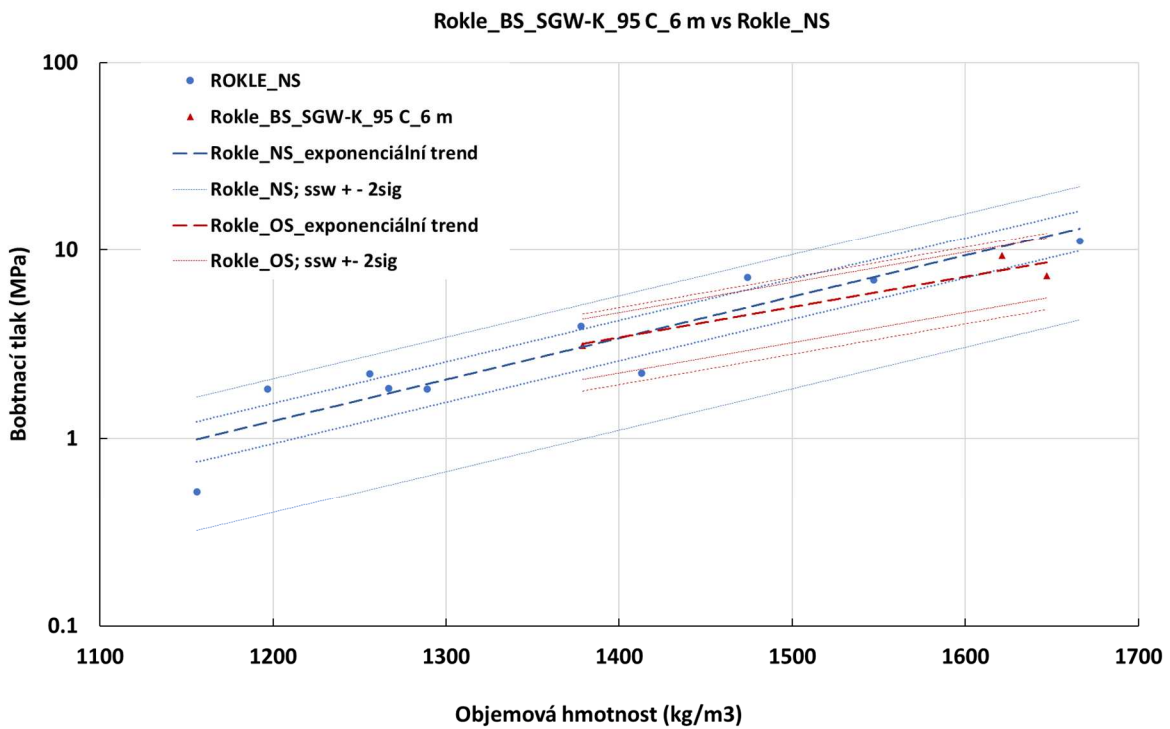
Obr. 155 Porovnání bobtnacího tlaku Rokle_NS a Rokle_BS_Josef_95 C_18 m po 18 měsících tepelného zatěžování při 95 °C a vystavení vodě Josef.



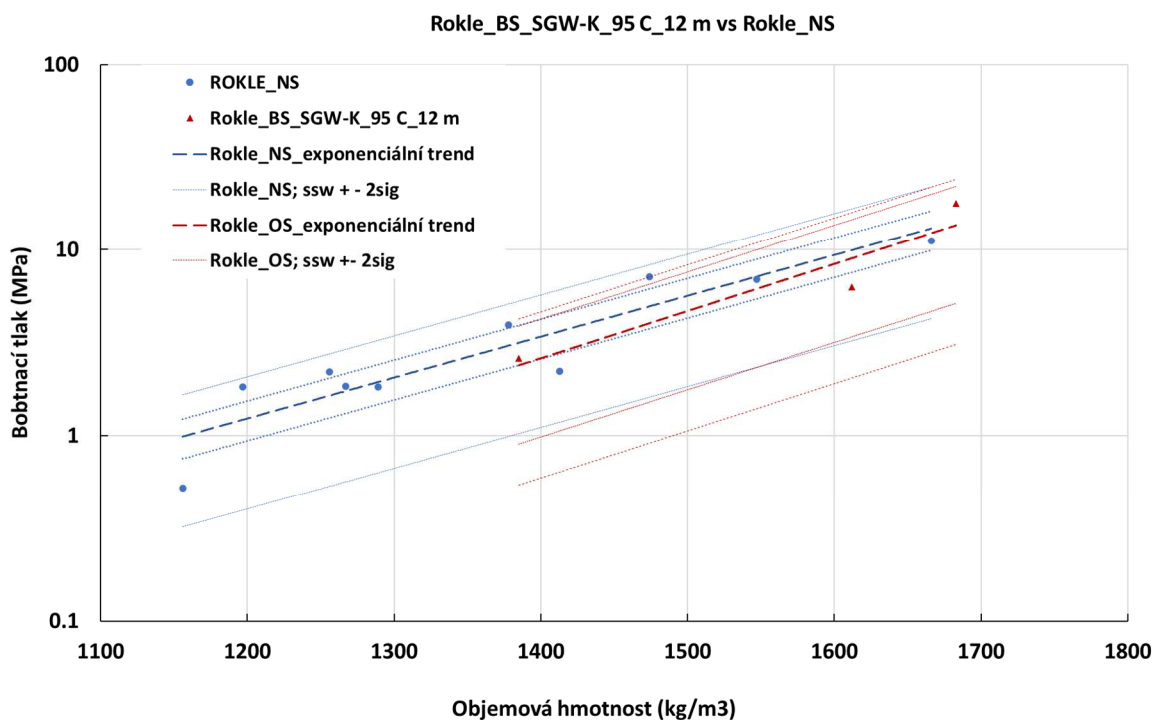
Obr. 156 Porovnání bobtnacího tlaku Rokle_NS a všech vzorků Rokle po tepelném zatěžování při 95 °C, po všech intervalech (3-18 měsíců) a vystavení vodě Josef.



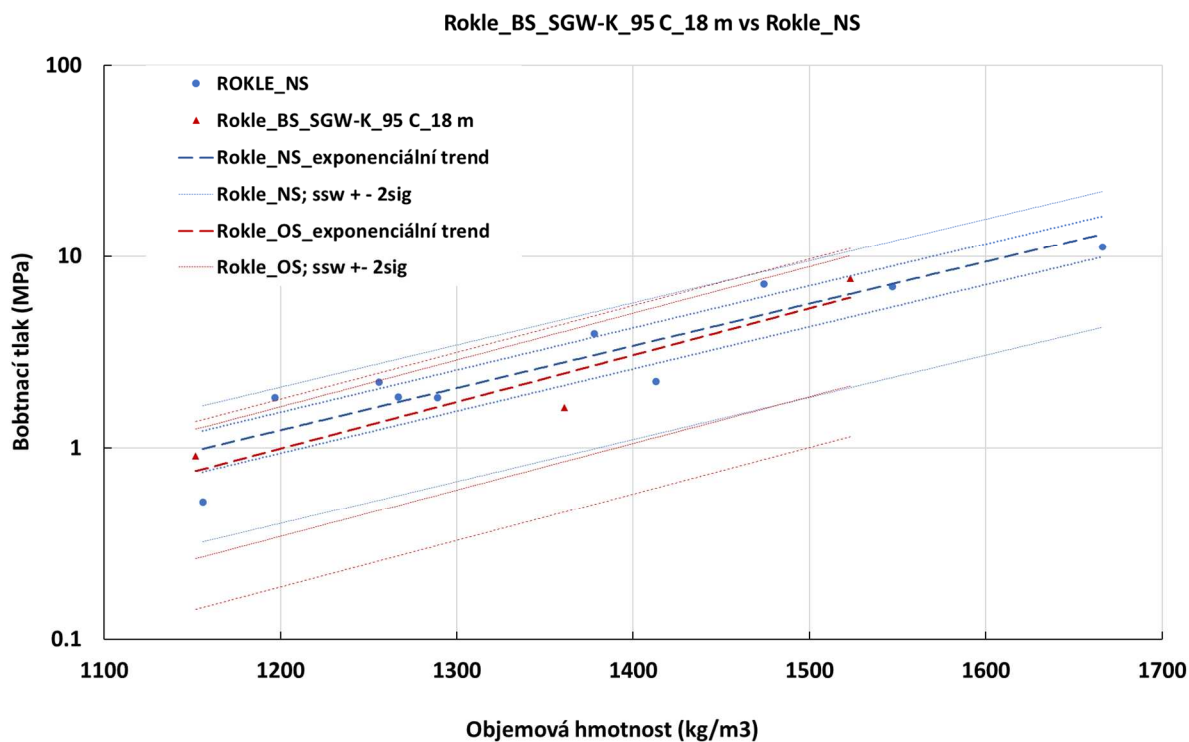
Obr. 157 Porovnání bobtnacího tlaku Rokle_NS a Rokle_BS_SGW-K_95 C_3 m po 3 měsících tepelného zatěžování při 95 °C a vystavení vodě SGW-K.



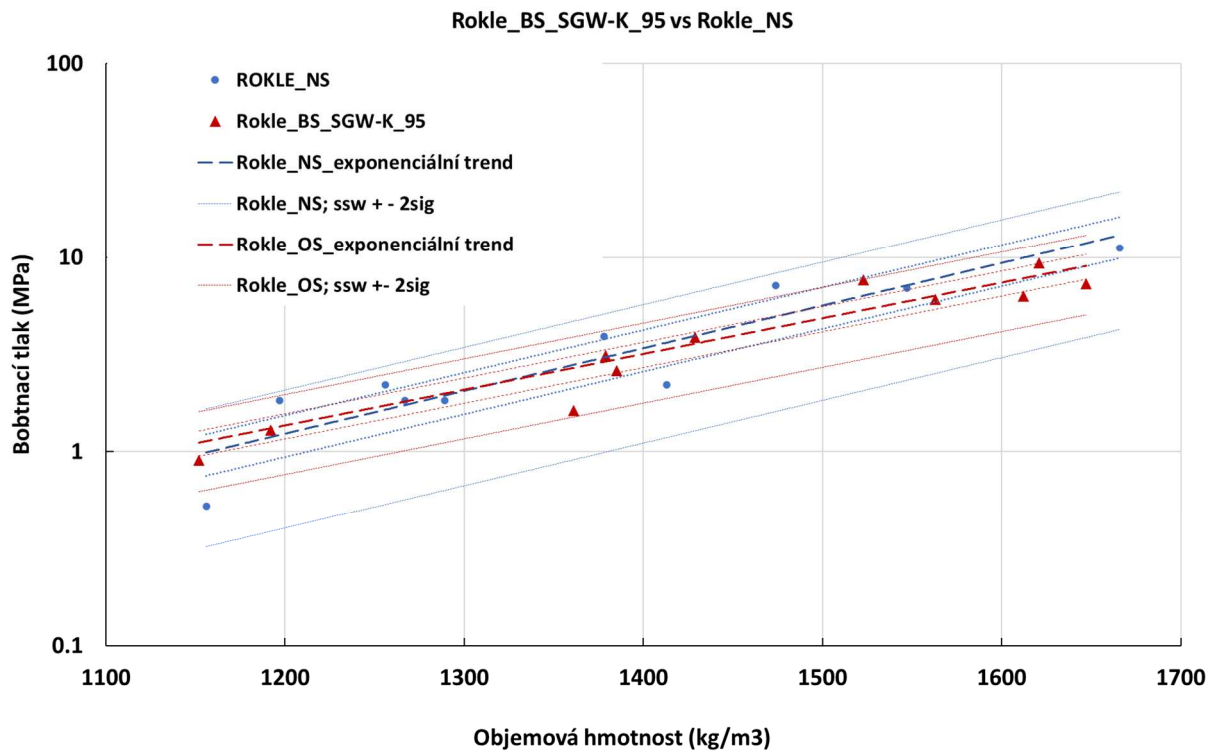
Obr. 158 Porovnání bobtnacího tlaku Rokle_NS a Rokle_BS_SGW-K_95 C_6 m po 6 měsících tepelného zatěžování při 95 °C a vystavení vodě SGW-K.



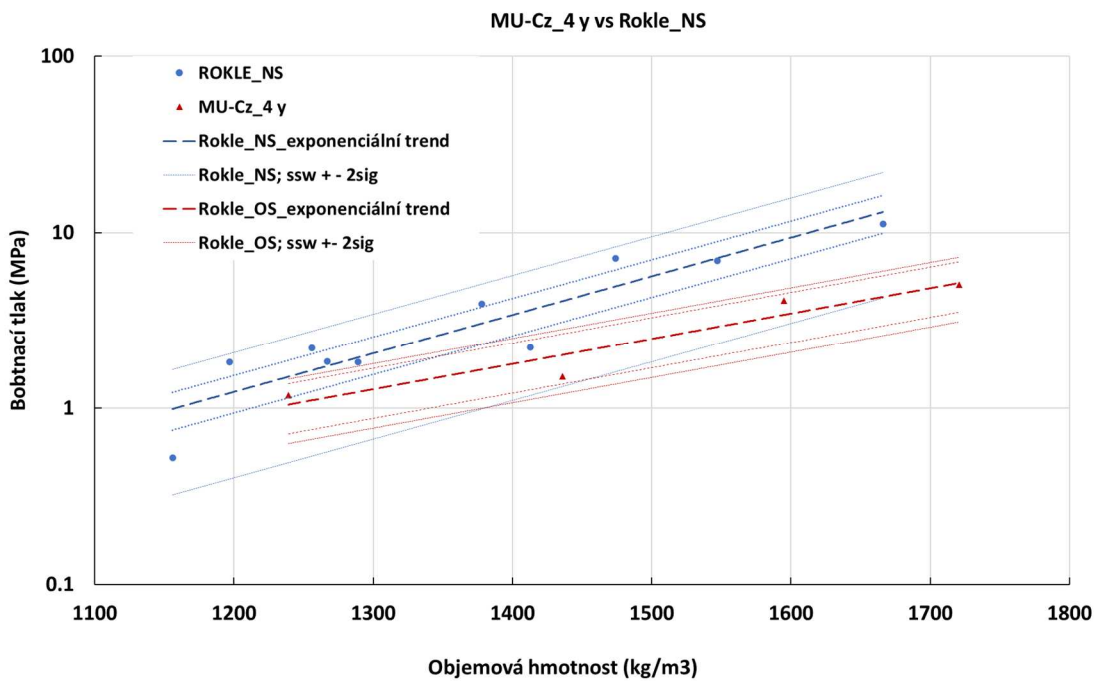
Obr. 159 Porovnání bobtnacího tlaku Rokle_NS a Rokle_BS_SGW-K_95 C_12 m po 12 měsících tepelného zatěžování při 95 °C a vystavení vodě SGW-K.



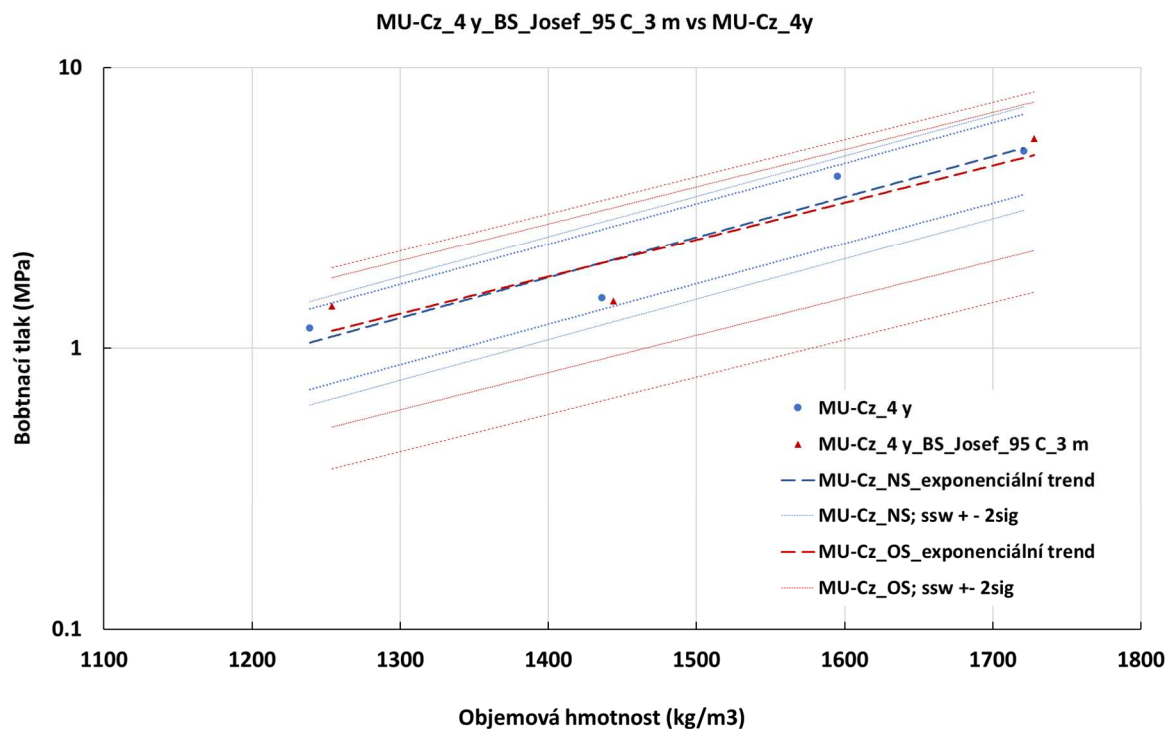
Obr. 160 Porovnání bobtnacího tlaku Rokle_NS a Rokle_BS_SGW-K_95 C_18 m po 18 měsících tepelného zatěžování při 95 °C a vystavení vodě SGW-K.



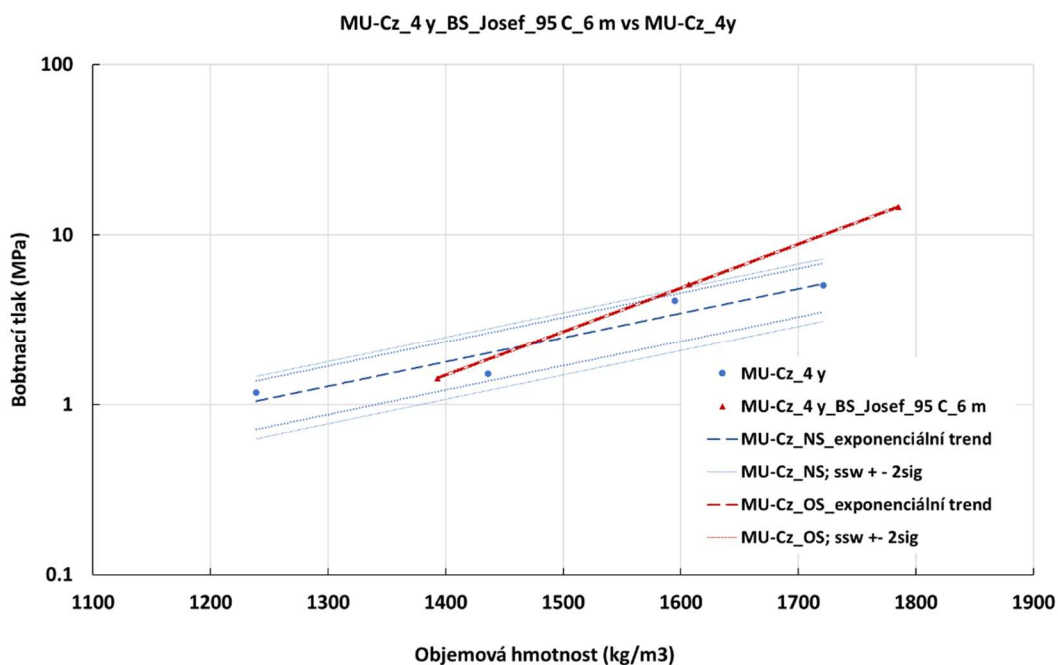
Obr. 161 Porovnání bobtnacího tlaku Rokle_NS a všech vzorků Rokle po tepelném zatěžování při 95 °C, po všech intervalech (3-18 měsíců) a vystavení vodě SGW-K.



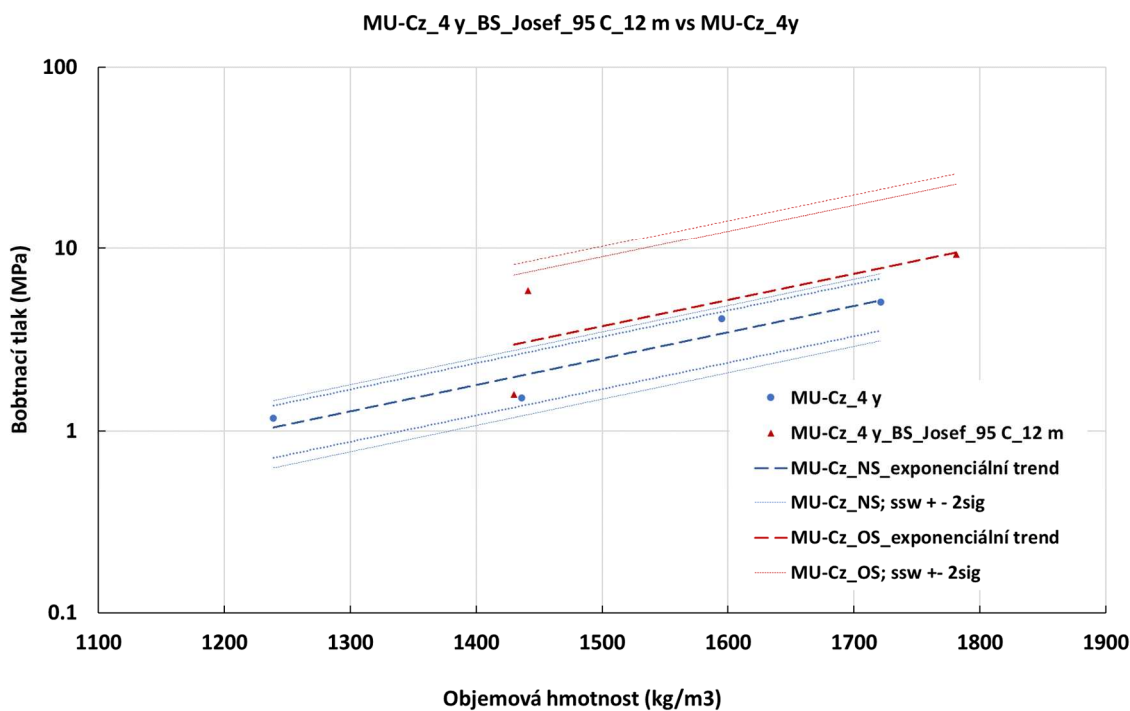
Obr. 162 Porovnání bobtnacího tlaku bentonitu Rokle_NS a směsi Mock-Up-Cz (MU-Cz_4 y).



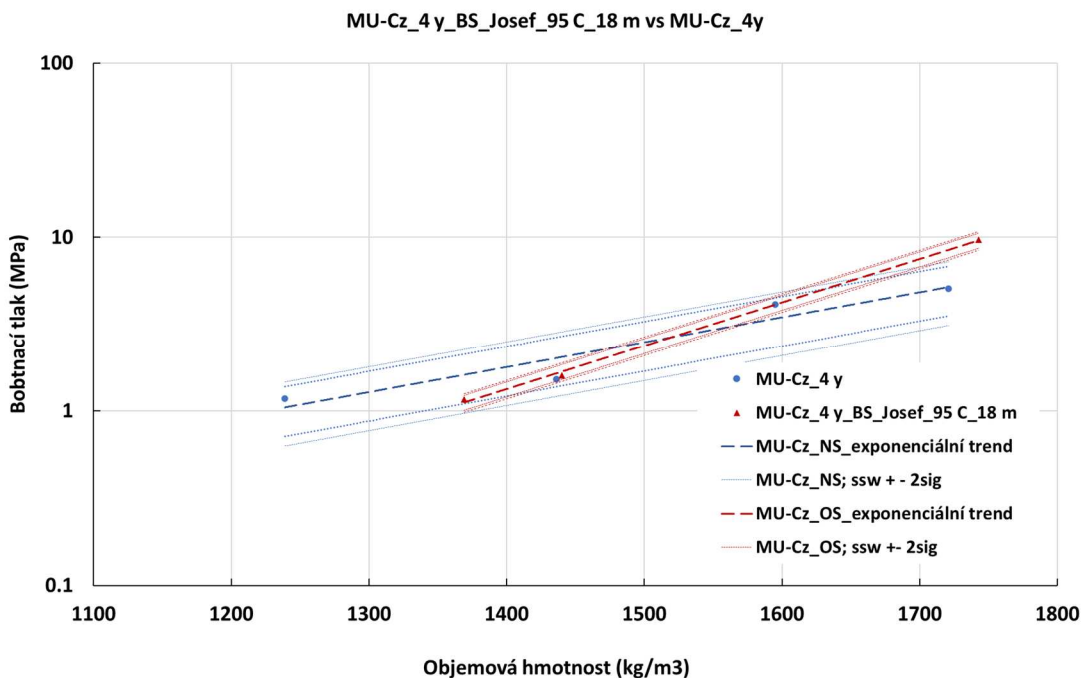
Obr. 163 Porovnání bobtnacího tlaku směsi Mock-Up CZ_NS (označeno MU-Cz_4y) a Mock-Up-CZ po 3 měsících tepelného zatěžování při 95 °C a vystavení vodě Josef (označení MU-Cz_4y_BS_Josef_95 C_3m).



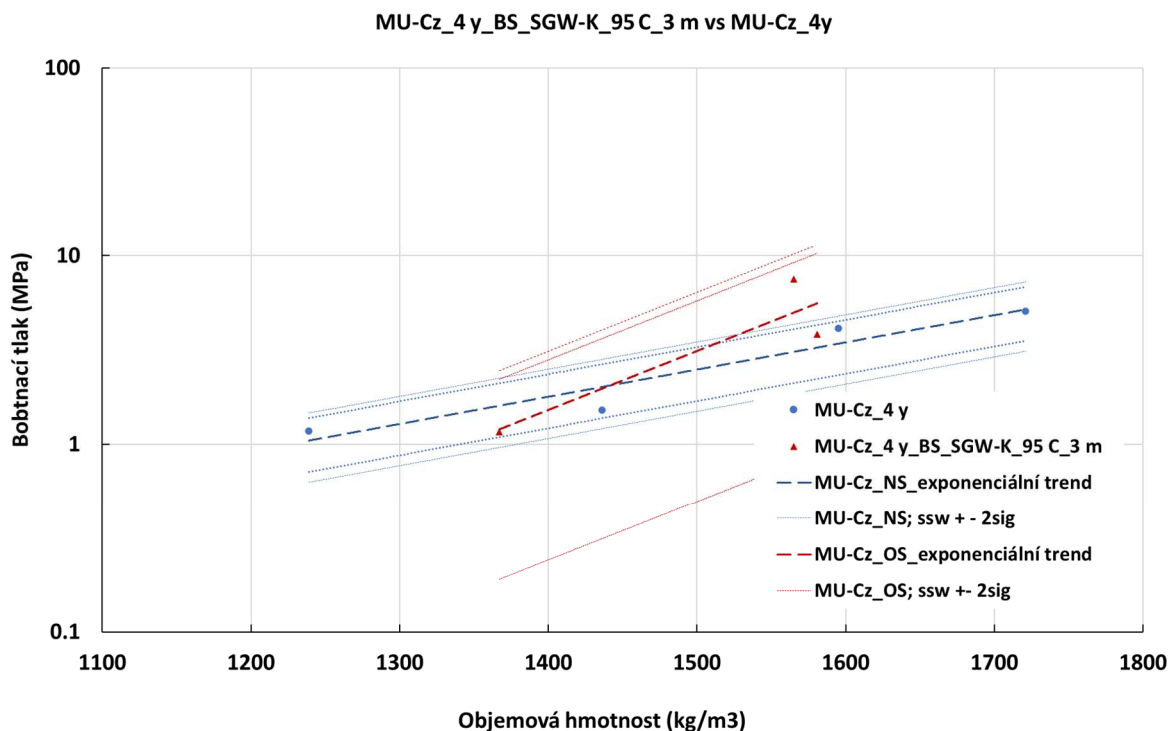
Obr. 164 Porovnání bobtnacího tlaku směsi Mock-Up CZ_NS (označeno MU-Cz_4y) a Mock-Up-CZ po 6 měsících tepelného zatěžování při 95 °C a vystavení vodě Josef (označení MU-Cz_4y_BS_Josef_95 C_6m).



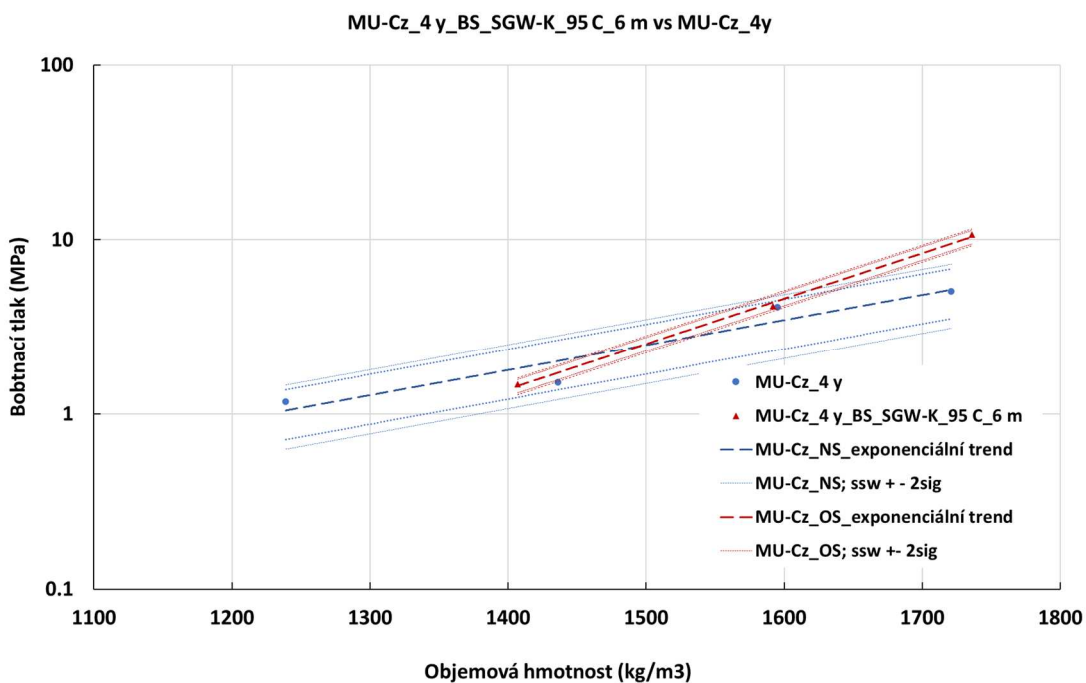
Obr. 165 Porovnání bobtnacího tlaku směsi Mock-Up CZ_NS (označeno MU-Cz_4y) a Mock-Up-CZ po 12 měsících tepelného zatěžování při 95 °C a vystavení vodě Josef (označení MU-Cz_4y_BS_Josef_95 C_12m).



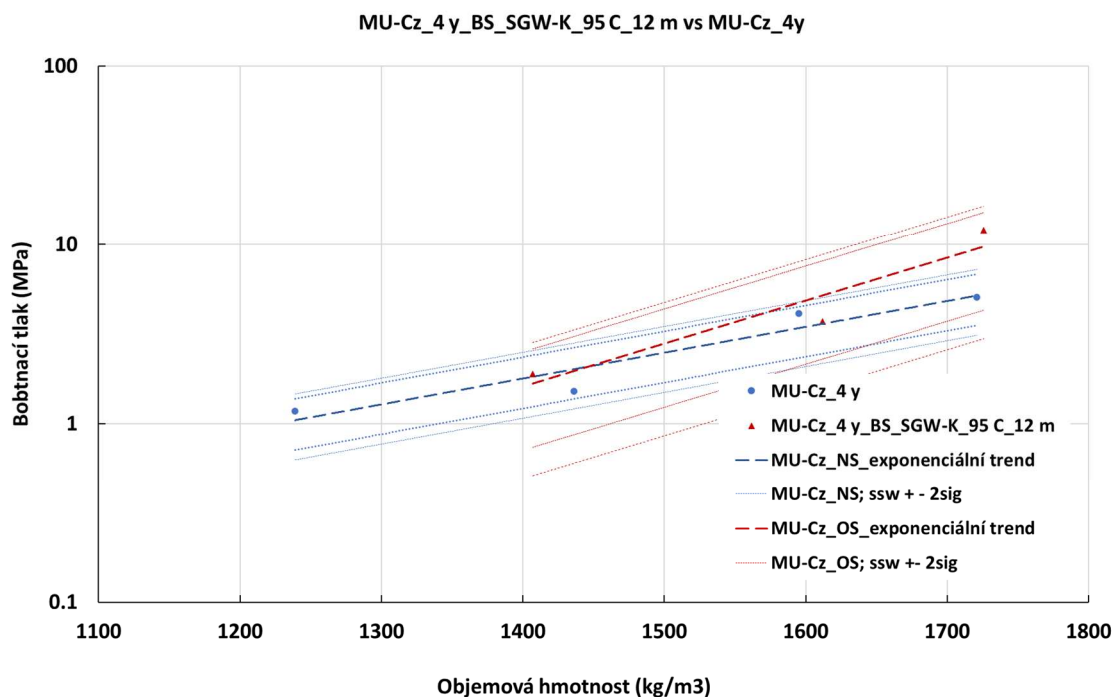
Obr. 166 Porovnání bobtnacího tlaku směsi Mock-Up CZ_NS (označeno MU-Cz_4y) a Mock-Up-CZ po 18 měsících tepelného zatěžování při 95 °C a vystavení vodě Josef (označení MU-Cz_4y_BS_Josef_95 C_18m).



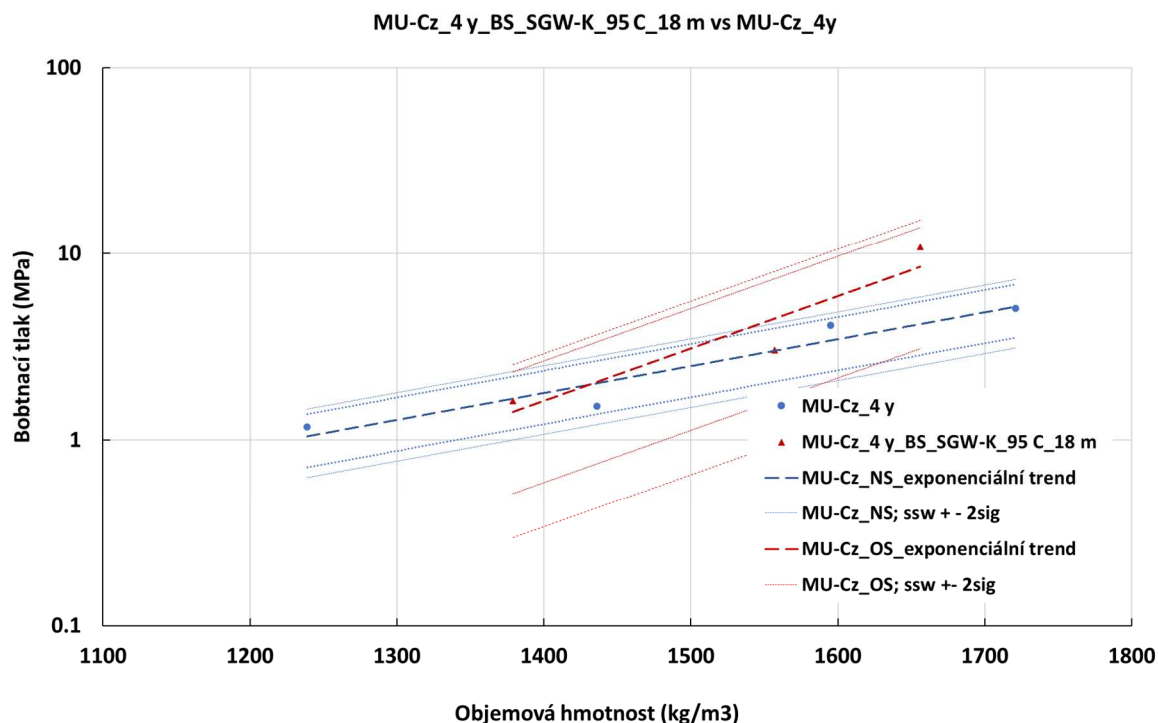
Obr. 167 Porovnání bobtnacího tlaku směsi Mock-Up CZ_NS (označeno MU-Cz_4y) a Mock-Up-CZ po 3 měsících tepelného zatěžování při 95 °C a vystavení vodě SGW-K (označení MU-Cz_4y_BS_SGW-K_95 C_3m).



Obr. 168 Porovnání bobtnacího tlaku směsi Mock-Up CZ_NS (označeno MU-Cz_4y) a Mock-Up-CZ po 6 měsících tepelného zatěžování při 95 °C a vystavení vodě SGW-K (označení MU-Cz_4y_BS_SGW-K_95 C_6m).

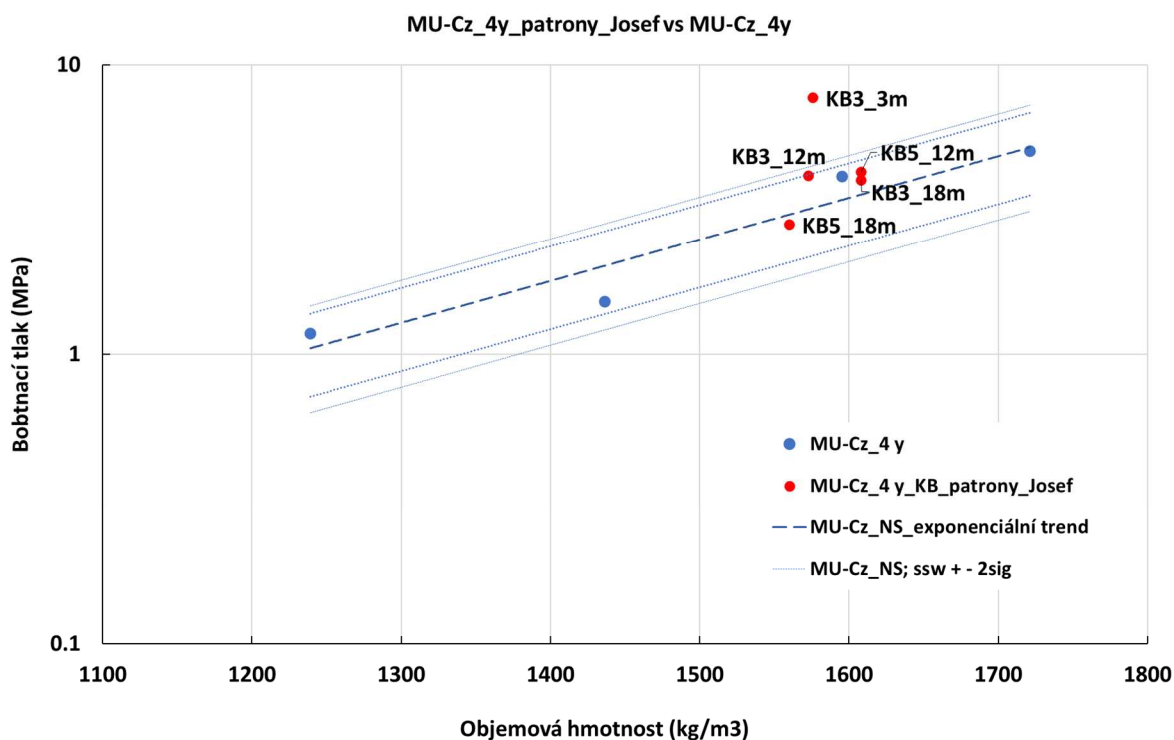


Obr. 169 Porovnání bobtnacího tlaku směsi Mock-Up CZ_NS (označeno MU-Cz_4y) a Mock-Up-CZ po 12 měsících tepelného zatěžování při 95 °C a vystavení vodě SGW-K (označení MU-Cz_4y_BS_SGW-K_95 C_12m).

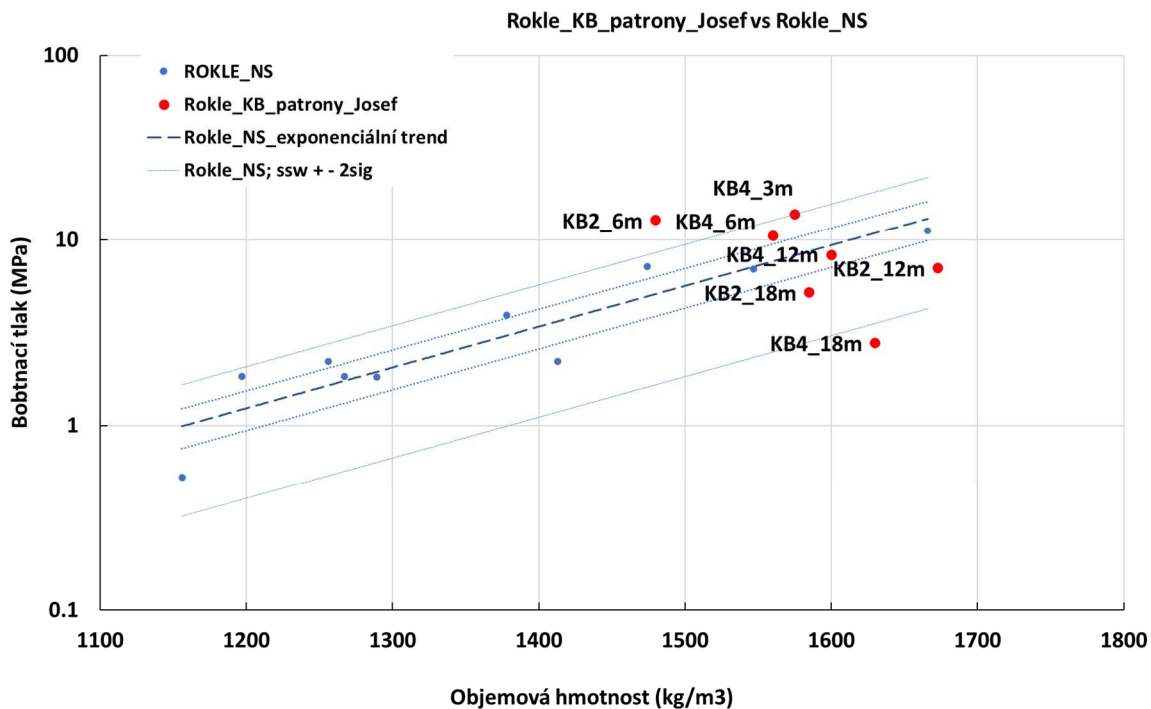


Obr. 170 Porovnání bobtnacího tlaku směsi Mock-Up CZ_NS (označeno MU-Cz_4y) a Mock-Up-CZ po 18 měsících tepelného zatěžování při 95 °C a vystavení vodě SGW-K (označení MU-Cz_4y_BS_SGW-K_95 C_18m).

V grafech na Obr. 171 a Obr. 172 je grafické vyhodnocení vzorků odebraných z in-situ experimentu, kdy byl bentonit vystavován podzemnímu prostředí a vodě „Josef“. V podzemí byl umístěn bentonit Rokle a Mock-up. Z jednotlivých patron byl vyhodnocován vždy jen jeden vzorek pro daný časový úsek zatěžování. Z důvodu nedostatku dat není možné vytvořit charakteristické křivky OS bentonitu a porovnávají jsou pouze jednotlivé hodnoty vůči nezatíženému materiálu (Rokle_NS, Mock-up_NS). V grafech se u jednotlivých bodů nachází informace o čísle patrony (KB) a době zatěžování.

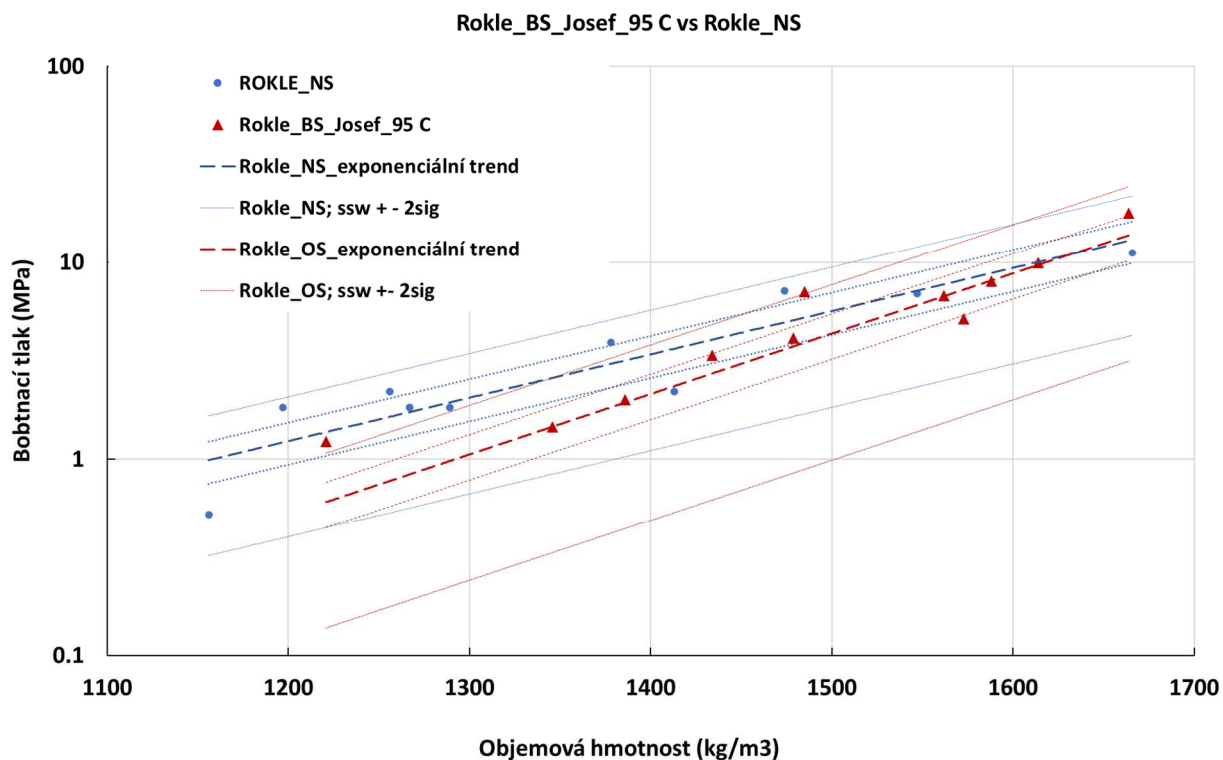


Obr. 171 Porovnání bobtnacího tlaku směsi Mock-Up-Cz_NS (MU-Cz_4y) a směsi MU-Cz_4y_patrony_Josef umístěného v perforovaných patronách a vystaveného in situ podmínkám v podzemí a vodě Josef. Popisek dat se vztahuje k číslu patrony (KB#) a době zatěžování.

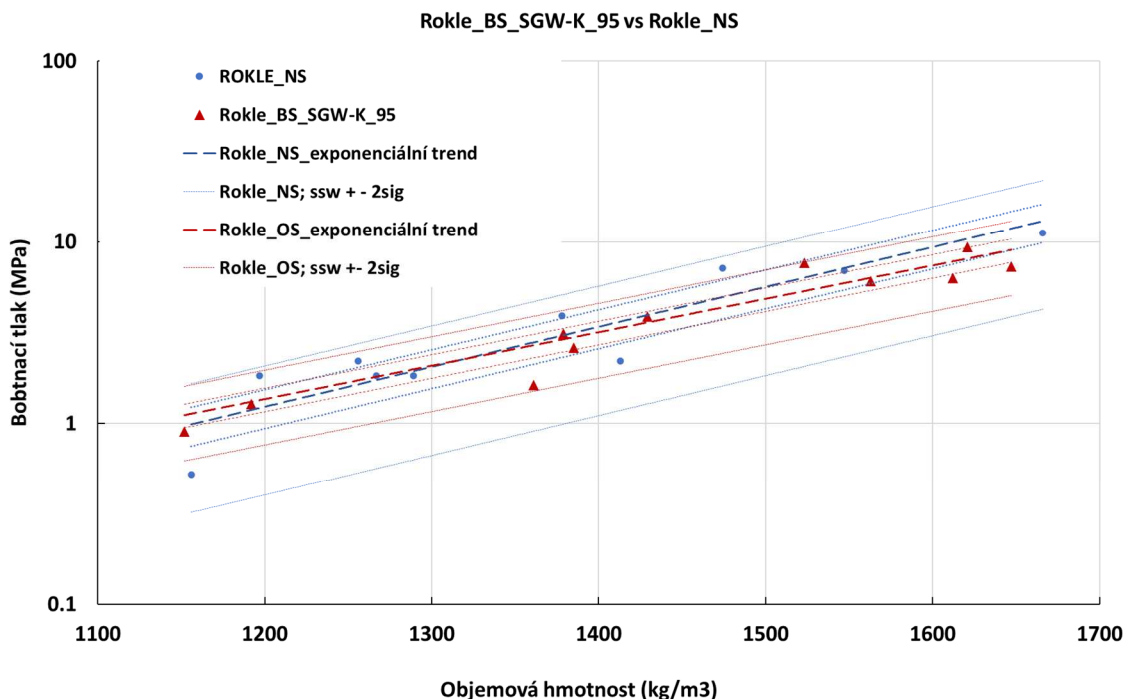


Obr. 172 Porovnání bobtnacího tlaku bentonitu Rokle_NS a bentonitu Rokle umístěného v perforovaných patronách a vystaveného in situ podmínkám v podzemí a vodě Josef. Popisek dat se vztahuje k číslu patrony (KB#) a době zatěžování.

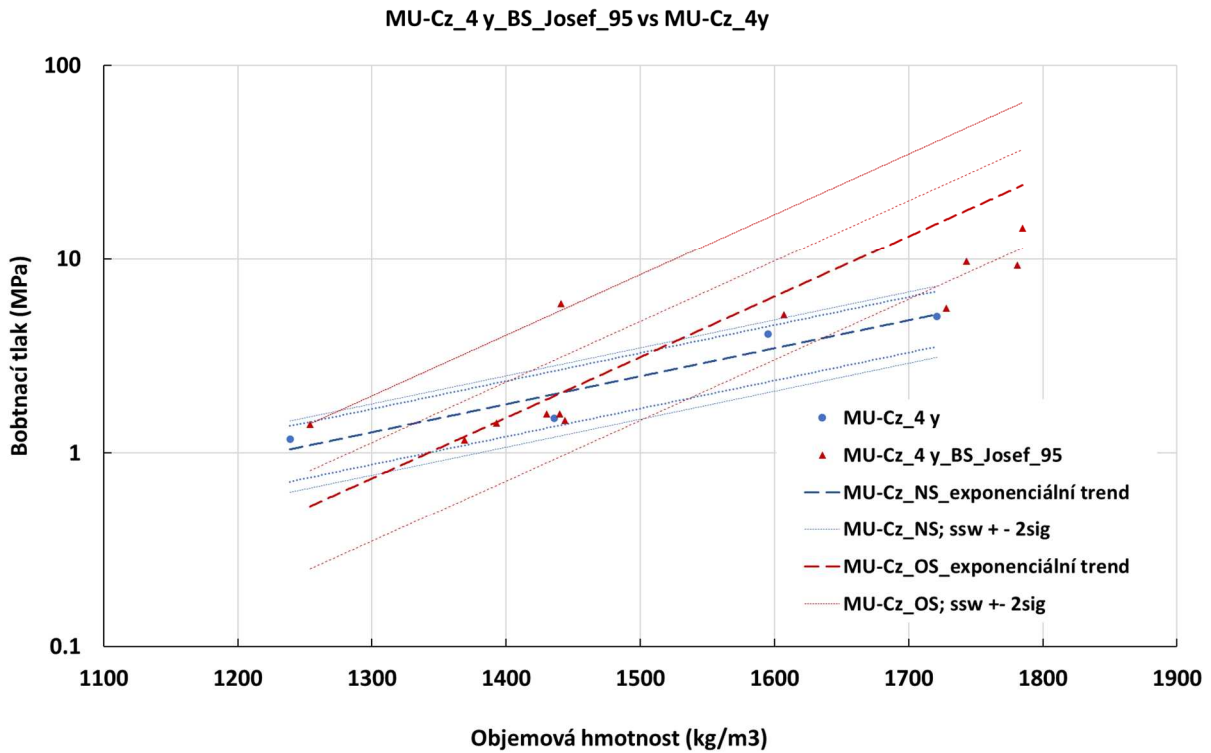
V grafech na Obr. 173 – Obr. 176 je vyhodnocení bobtnacího tlaku bentonitu Rokle a Mock-up po vystavení tepelné zátěži 95 °C při působení jednotlivých druhů vod (Josef, VŠCHT). Vyhodnocení je provedeno pro ovlivněný bentonit bez zohlednění doby trvání zátěže. Charakteristické čáry jsou vytvořeny pro všechna data měřená na tepelně ovlivněném bentonitu nezávisle na době trvání zátěže.



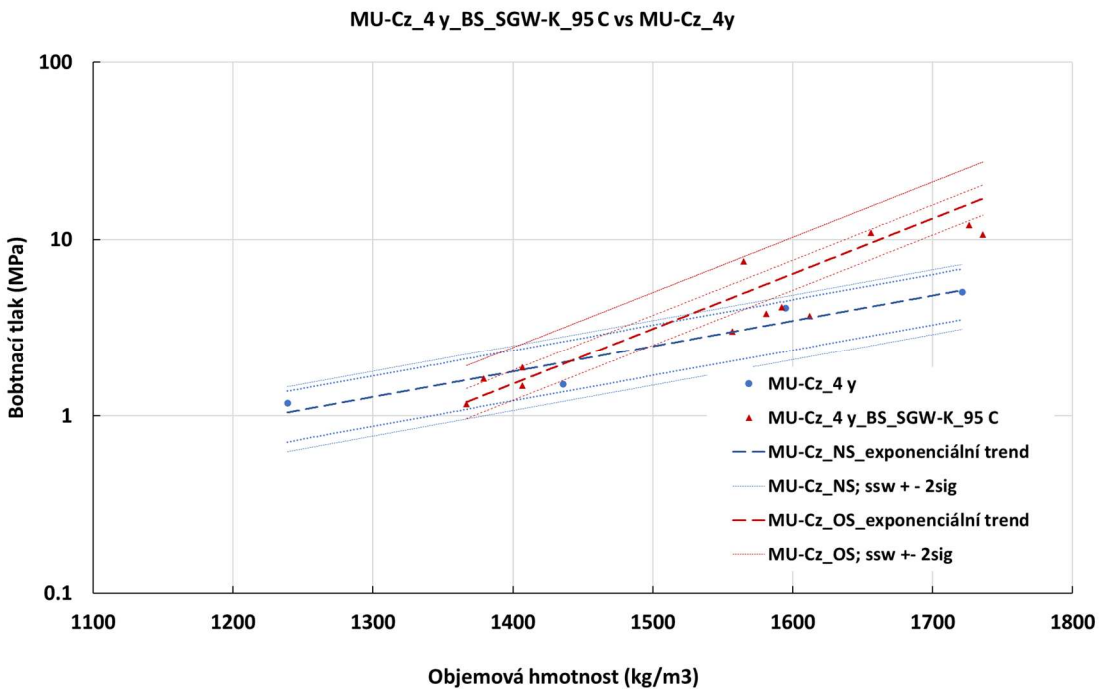
Obr. 173 Porovnání bobtnacího tlaku bentonitu Rokle_NS a ovlivněného bentonitu Rokle zvýšenou teplotou (95 °C) a vystaveného působení vody Josef bez zohlednění doby trvání zátěže. Charakteristické čáry jsou pro ovlivněný stav vyhodnoceny ze všech dostupných ověřených dat.



Obr. 174 Porovnání bobtnacího tlaku bentonitu Rokle_NS a ovlivněného bentonitu Rokle zvýšenou teplotou (95 °C) a vystaveného působení vody SGW-K bez zohlednění doby trvání zátěže. Charakteristické čáry jsou pro ovlivněný stav vyhodnoceny ze všech dostupných ověřených dat.



Obr. 175 Porovnání bobtnacího tlaku směsi Mock-Up-Cz_NS (MU-Cz_4y) a ovlivněné směsi MU-Cz_4 y_BS_Josef_95 zvýšenou teplotou (95 °C) a vystavené působení vody Josef bez zohlednění doby trvání zátěže. Charakteristické čáry jsou pro ovlivněný stav vyhodnoceny ze všech dostupných ověřených dat.



Obr. 176 Porovnání bobtnacího tlaku směsi Mock-Up-Cz_NS (MU-Cz_4y) a ovlivněné směsi MU-Cz_4 y_BS_Josef_95 zvýšenou teplotou (95 °C) a vystavené působení vody SGW-K bez zohlednění doby trvání zátěže. Charakteristické čáry jsou pro ovlivněný stav vyhodnoceny ze všech dostupných ověřených dat.

V tabulce Tab. 12 celkové vyhodnocení ovlivnění bobtnacího tlaku tepelným zatížením bentonitu BCV v suchém a vlhkém stavu.

Hodnocení je vždy vzhledem k nezatíženému bentonitu. Systém hodnocení je následující:

- 0 interval spolehlivosti OS bentonitu se nachází z více než 75 % uvnitř intervalu spolehlivosti NS bentonitu.
- + vyšší hodnoty – více než polovina intervalu spolehlivosti nad intervalem spolehlivosti NS bentonitu.
- ++ významně vyšší hodnoty – pás spolehlivosti OS bentonitu mimo pás spolehlivosti NS bentonitu.
- nižší hodnoty – více než polovina intervalu spolehlivosti pod intervalem spolehlivosti NS bentonitu.
- významně nižší hodnoty – pás spolehlivosti OS bentonitu mimo pás spolehlivosti NS bentonitu.

Parametr „orientace“ v tabulce Tab. 12 je vyplněn pouze pokud jsou intervaly spolehlivosti rovnoběžné a jen částečně se překrývají, nebo když k překryvu nedochází. V případě, že jsou charakteristické čáry rovnoběžné je možné uvažovat o jisté systematickosti v chování bentonitu v celém rozsahu sledovaných objemových hmotnostech sušiny. Ve většině případů jsou vůči sobě v obecné poloze, kdy dochází k protnutí, nebo vzájemnému přibližování charakteristických čar. Významné přibližování či oddalování je viditelné v klasifikaci v jednotlivých intervalech.

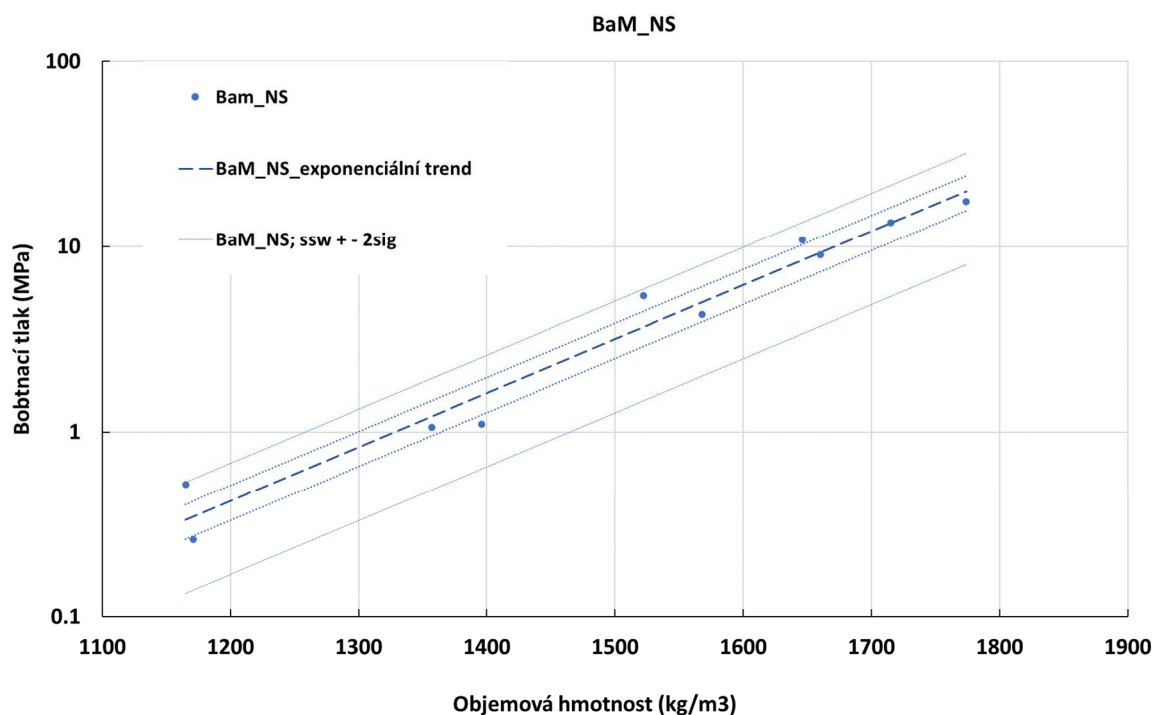
Tab. 12 Klasifikace ovlivnění bobtnacího tlaku tepelným zatížením bentonitu Rokle ve vlhkém stavu. Intervaly se vztahují k rozsahu objemových hmotností a k nim vztaženým charakteristickým křivkám zatíženého bentonitu Rokle. n – počet měřených prvků. Velikost intervalu odpovídá $(\rho_{dmax} - \rho_{dmin})/4$. ρ_{dmax} – maximální objemová hmotnost sušiny, ρ_{dmin} – minimální objemová hmotnost sušiny.

název bentonitu	n	ρ_{dmin} (kg/m ³)	ρ_{dmax} (kg/m ³)	zatížený bentonit – č. intervalu			
				1.	2.	3.	4.
Rokle_NS	10	1150	1670				
Rokle_BS_Josef_95 C_3 m	3	1340	1590	0	0	0	0
Rokle_BS_Josef_95 C_6 m	3	1380	1660	0	0	0	0
Rokle_BS_Josef_95 C_12 m	3	1220	1570	0	0	0	0
Rokle_BS_Josef_95 C_18 m	3	1150	1480	0	0	0	0
Rokle_BS_Josef_95 C (všechny OS)	12	1220	1660	-	0	0	0
Rokle_BS_SGW-K_95 C_3 m	3	1220	1660	-	0	0	0
Rokle_BS_SGW-K_95 C_6 m	3	1380	1650	0	0	0	0
Rokle_BS_SGW-K_95 C_12 m	3	1380	1680	0	0	0	0
Rokle_BS_SGW-K_95 C_18 m	3	1150	1520	0	0	0	0
Rokle_BS_SGW-K_95 C (všechny OS)	12	1150	1660	0	0	0	0

Bobtnací tlak bentonitu Rokle není tepelným zatížením ovlivněn.

2.10.3 SWEP – BaM

Na bentonitu BaM byly provedeny zkoušky bobtnacího tlaku pouze na bentonitu v nezatíženém stavu (BaM_NS). Data byla získána ze dvou zdrojů, kterými jsou interakční experiment (Svoboda et al. 2019b) a zakázka na laboratorní zkoušky na bentonitu BaM (Vašíček 2017). V grafu jsou vyneseny hodnoty BaM_NS spolu s charakteristickými čarami spolehlivosti.

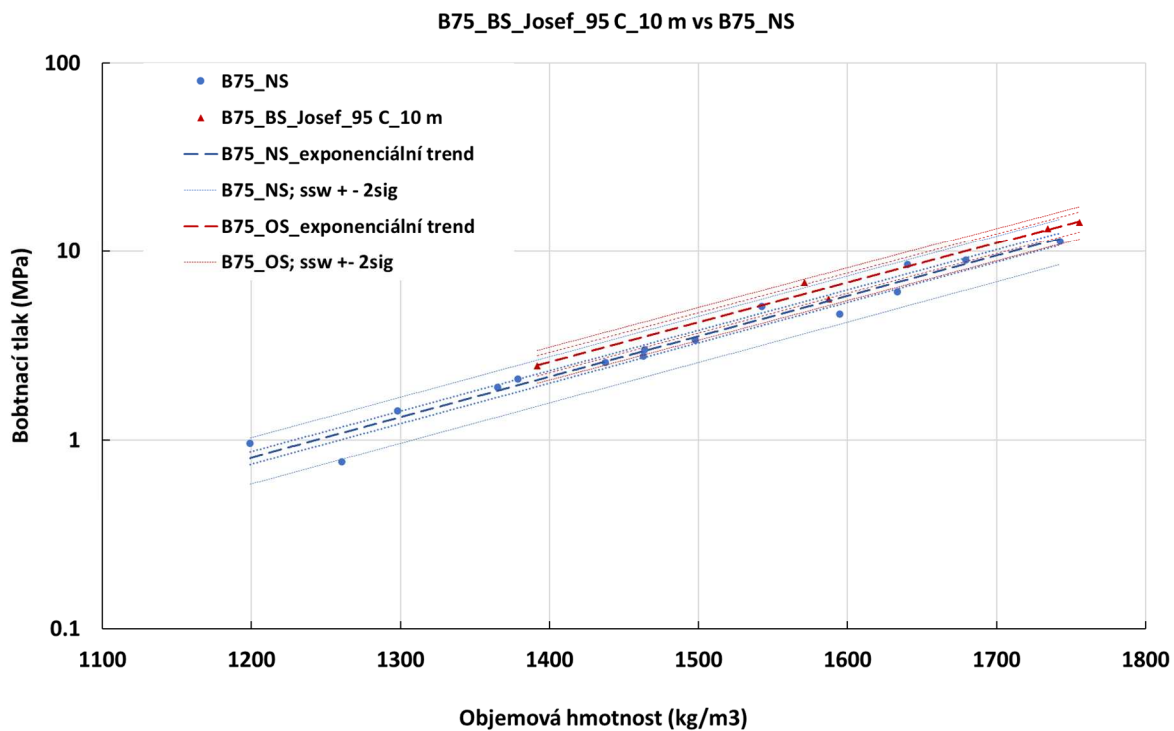


Obr. 177 Bobtnací tlak nezatíženého bentonitu BaM.

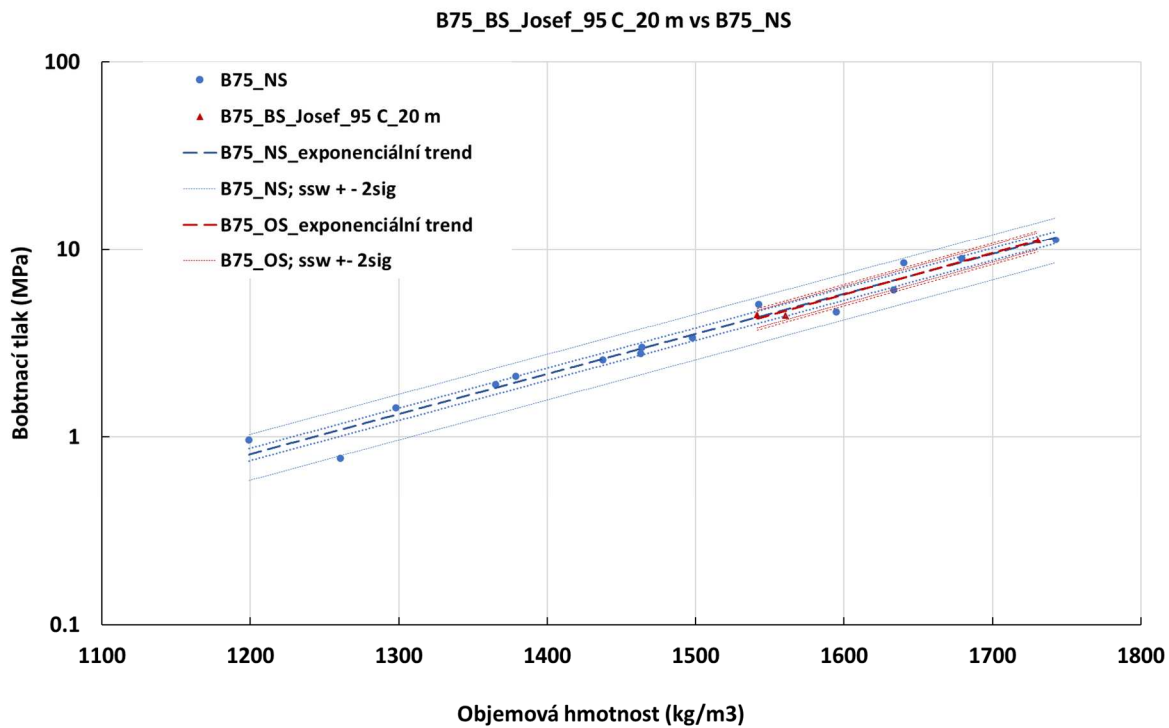
2.10.4 SWEP – B75

Výzkum různě zatěžovaného bentonitu B75 byl součástí projektu FR-TI1/362 (MPO TIP), výsledky jsou prezentovány v technické zprávě k projektu z podetapy 4.2 (Vašíček et al. 2013). V tomto projektu byl bentonit zatěžován teplotou 95 °C ve formě suspenze, suspenze s betonovou kostkou, v suchém stavu a lisovaný ve formě krychle. Součástí tohoto projektu byl i in-situ experiment, který spočíval v uložení bentonitových válečků do vrtů nacházejících se v podzemní laboratoři Josef. Do některých vrtů byl umístěn samostatný bentonit a do jiných vrtů byly umístěny bentonitové válečky prostrádané s cementovými válečky.

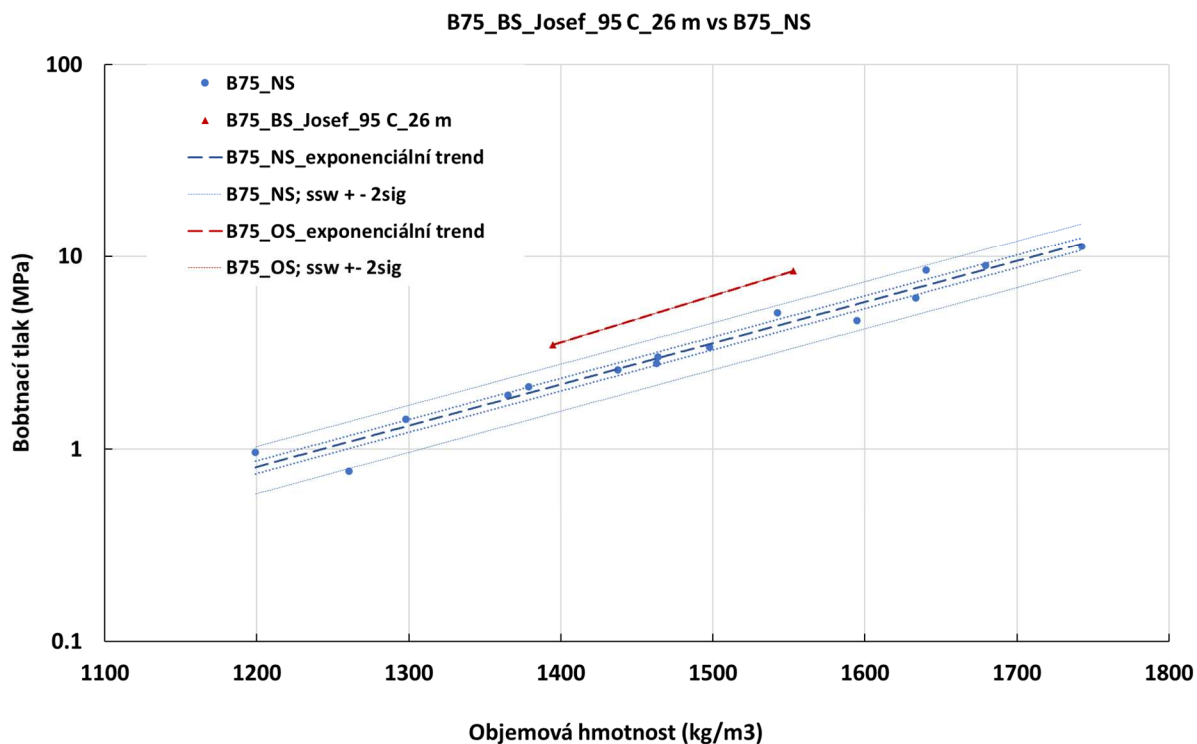
Testování B75 bylo také součástí projektů DOPAS a Mock-up-Josef, výsledky jsou uvedeny v technických zprávách (Vašíček et al. 2014; Šťástka et al. 2018). Data z měření na B75_OS a B75_NS z DOPASu byla ve zprávách (Vašíček et al. 2013, Vašíček et al. 2014; Šťástka et al. 2018) prezentována jen v grafické podobě. Hodnoty byly získány od autorského kolektivu zpráv. Všechna data měřená na ovlivněném bentonitu B75 pochází výhradně z projektu FR-TI1/362 (MPO TIP). Zpráva z podetapy E4.2 (Vašíček et al. 2013) obsahuje grafické vyhodnocení a vzájemné porovnání měřených dat. Vyhodnocení a závěry z měření bylo provedeno na základě vizuálního zhodnocení polohy bodů vůči regresní křivce nezatíženého bentonitu. V grafech na Obr. 179 - Obr. 187 je pokročilejší statistické vyhodnocení a grafické zobrazení míry ovlivnění B75_OS vzhledem k B75_NS. Data měřená z in-situ experimentu jsou vložena do jednoho grafu bez vyhodnocení křivek spolehlivosti z důvodu malého množství měřených dat (2 měřené hodnoty) a malého rozsahu měřených objemových hmotností sušiny.



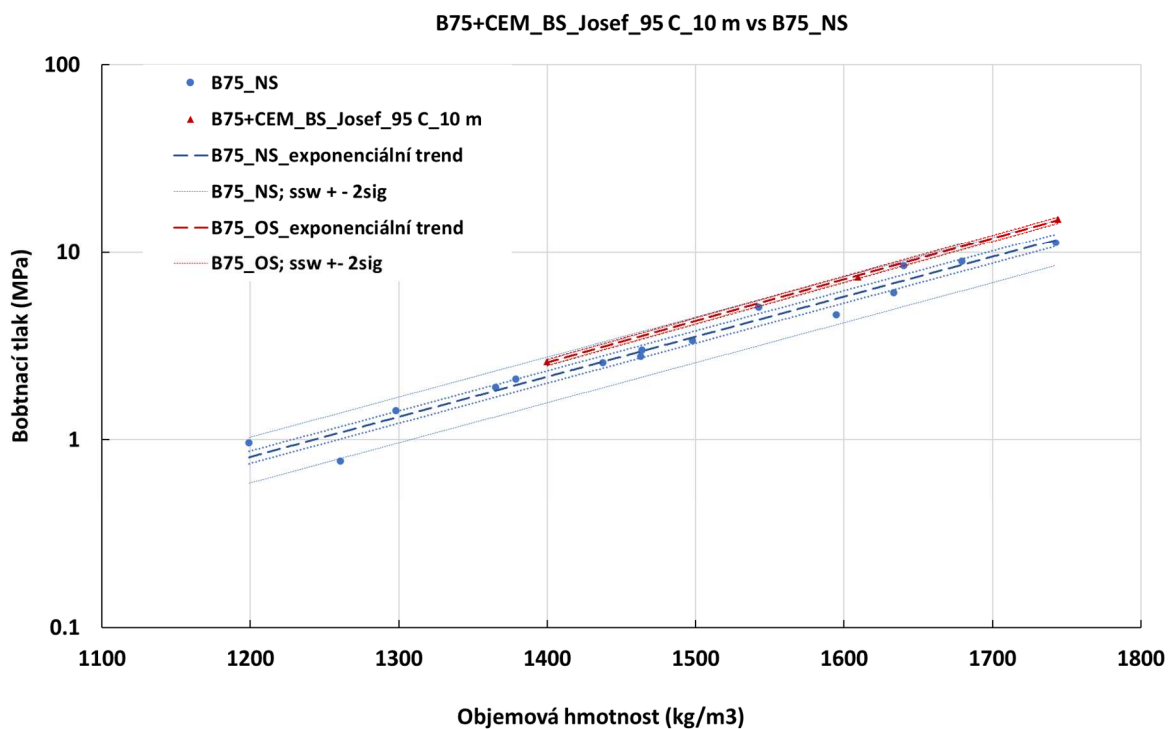
Obr. 178 Bobtnací tlak nezatíženého bentonitu B75 a bentonitu B75_OS, zatěžovaného po dobu 10 měsíců ve formě suspenze za použití vody „Josef“ v laboratorní peci teplotou 95 °C.



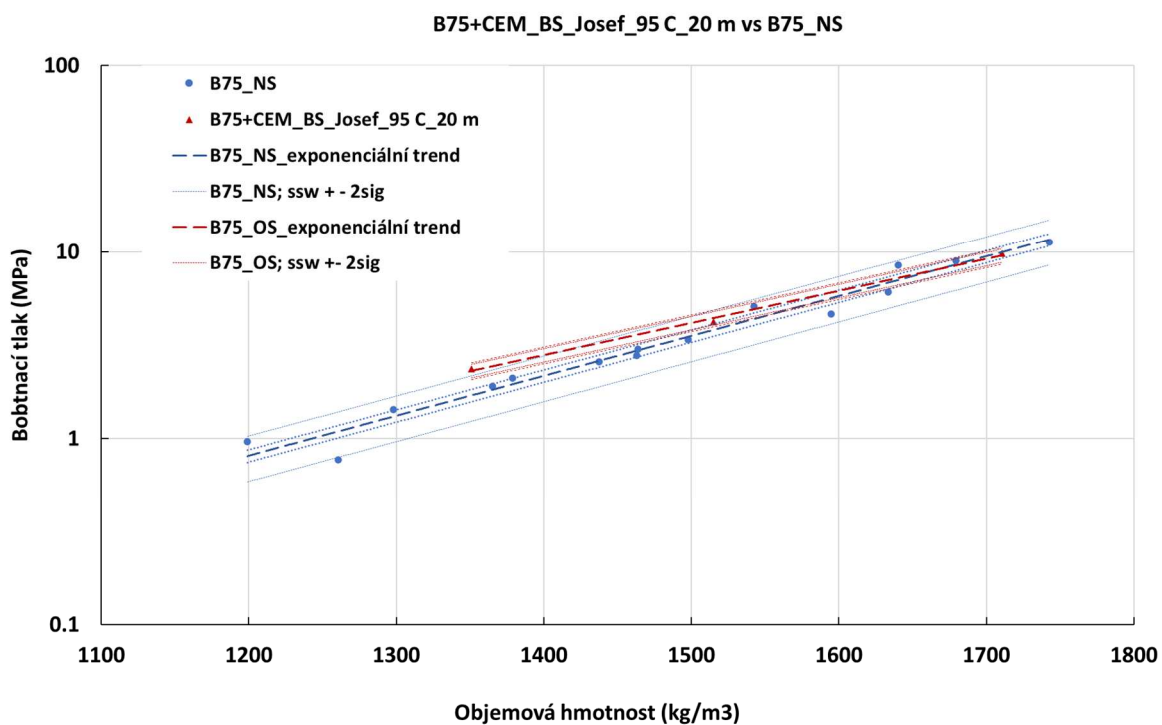
Obr. 179 Bobtnací tlak nezatíženého bentonitu B75 a bentonitu B75_OS, zatěžovaného po dobu 20 měsíců ve formě suspenze za použití vody „Josef“ v laboratorní peci teplotou 95 °C.



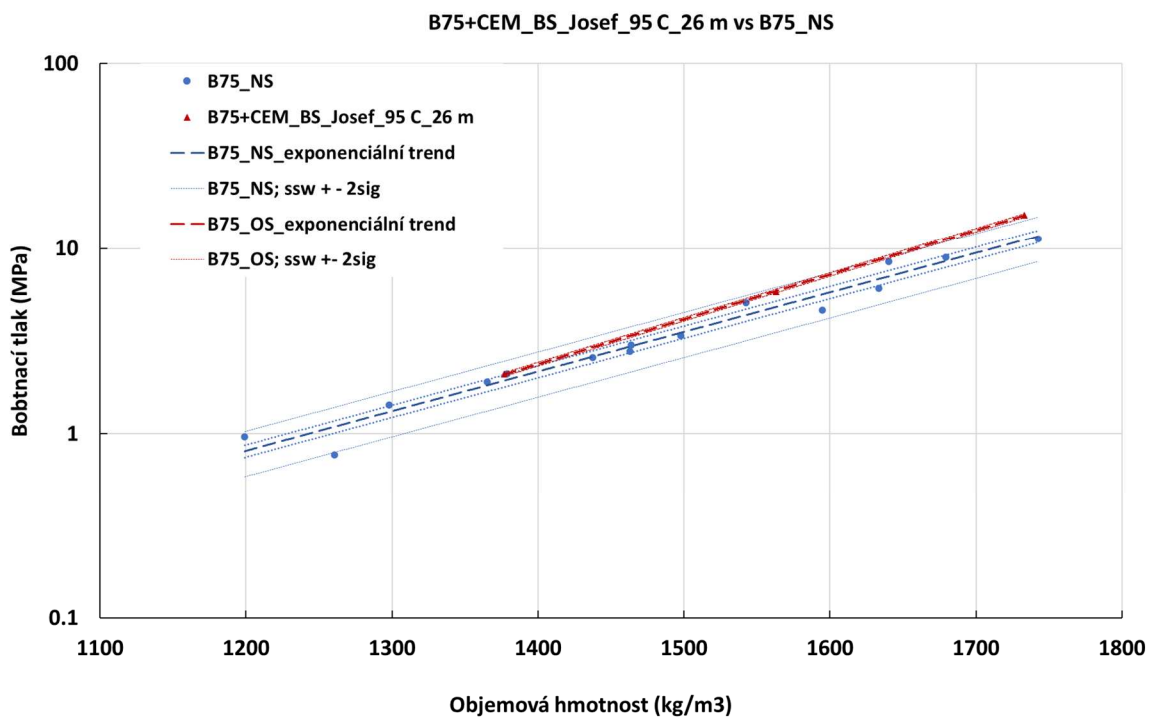
Obr. 180 Bobtnací tlak nezatíženého bentonitu B75 a bentonitu B75_OS, zatěžovaného po dobu 26 měsíců ve formě suspenze za použití vody „Josef“ v laboratorní peci teplotou 95 °C.



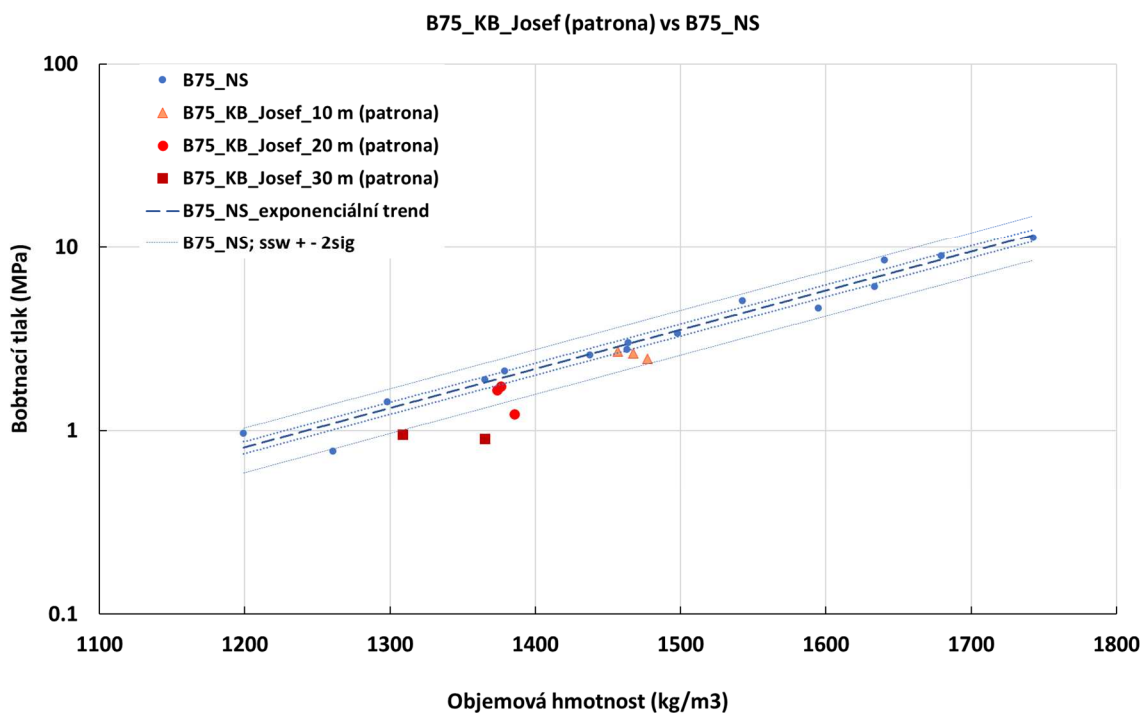
Obr. 181 Bobtnací tlak nezatíženého bentonitu B75 a bentonitu B75_OS, zatěžovaného po dobu 10 měsíců ve formě suspenze s vloženou cementovou kostkou za použití vody „Josef“ v laboratorní peci teplotou 95 °C.



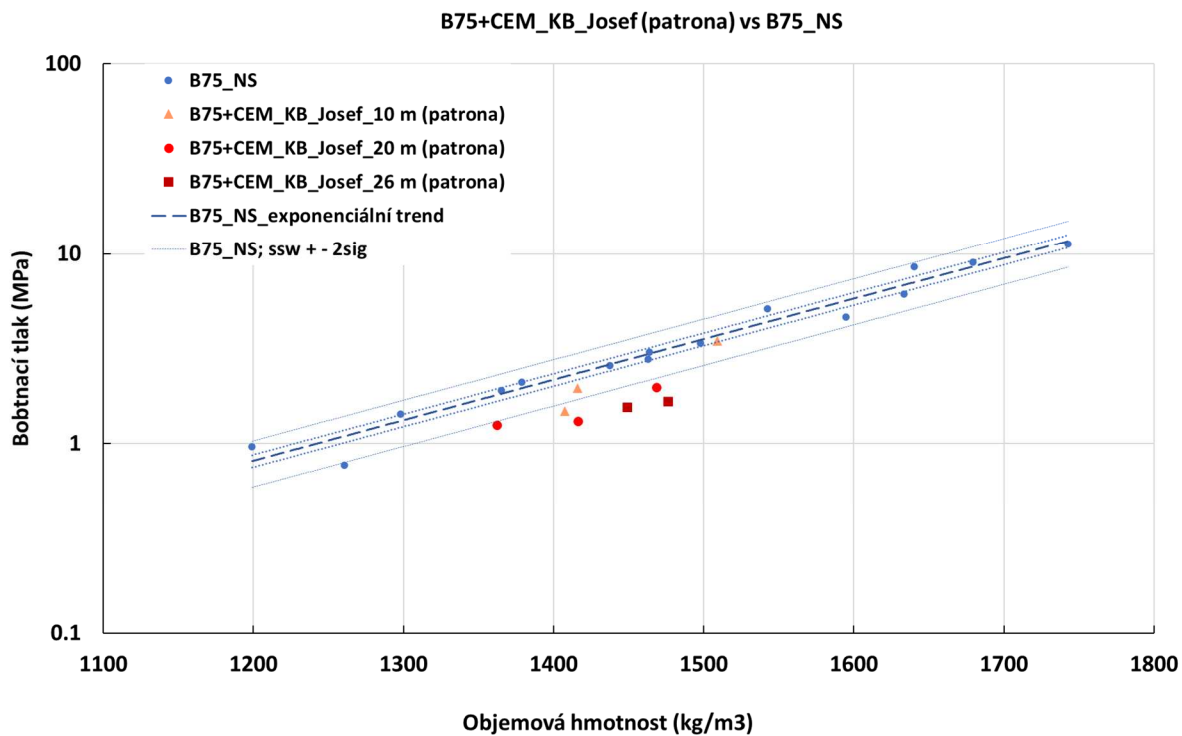
Obr. 182 Bobtnací tlak nezatíženého bentonitu B75 a bentonitu B75_OS, zatěžovaného po dobu 20 měsíců ve formě suspenze s vloženou cementovou kostkou za použití vody „Josef“ v laboratorní peci teplotou 95 °C.



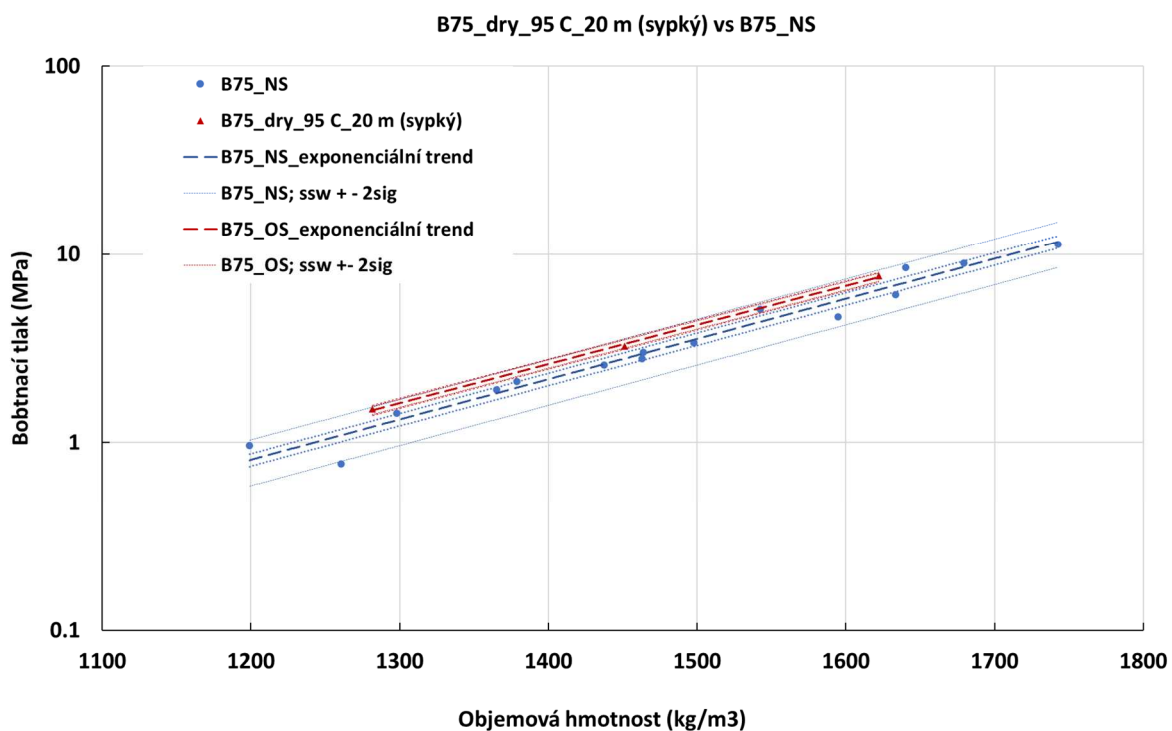
Obr. 183 Bobtnací tlak nezatíženého bentonitu B75 a bentonitu B75_OS, zatěžovaného po dobu 26 měsíců ve formě suspenze s vloženou cementovou kostkou za použití vody „Josef“ v laboratorní peci teplotou 95 °C.



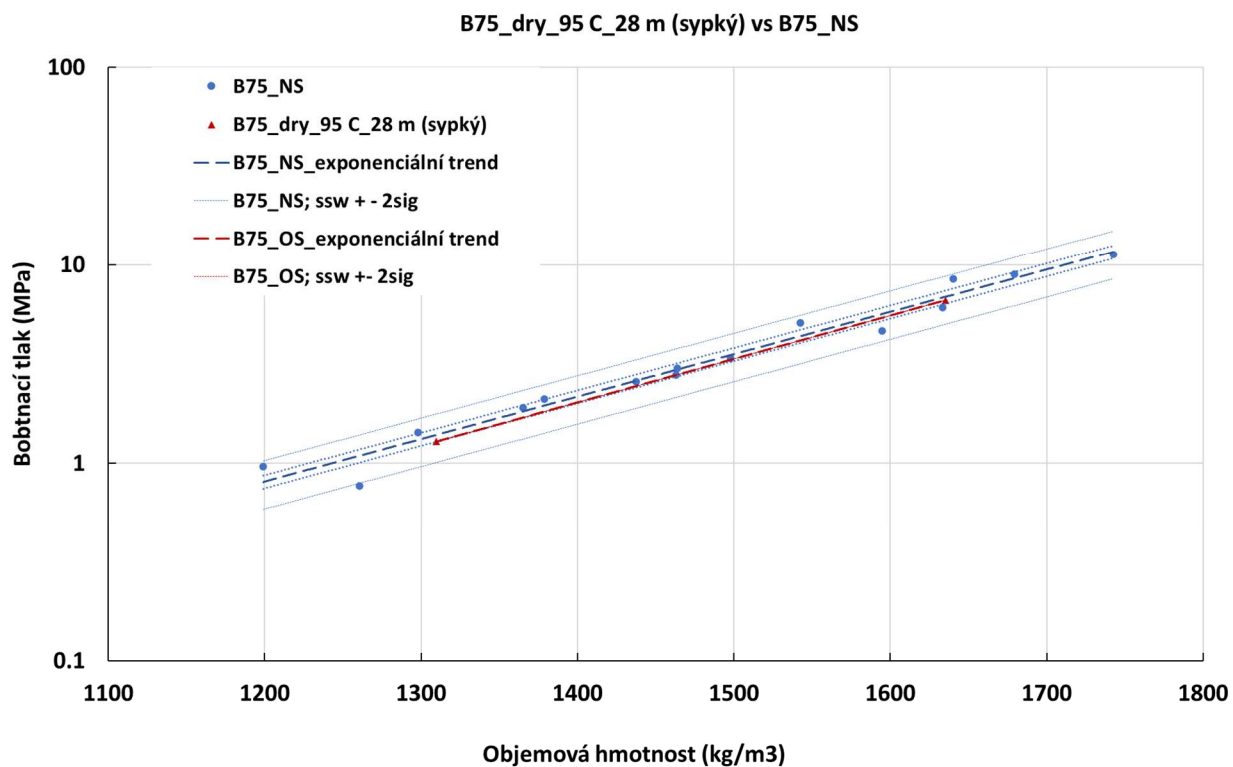
Obr. 184 Bobtnací tlak nezatíženého bentonitu B75 a bentonitu B75_OS pocházejícího z patron z in-situ experimentu. Výsledky z odběru z vrtu bez přítomnosti cementu po 10, 20 a 30 měsících od umístění.



Obr. 185 Bobtnací tlak nezatíženého bentonitu B75 a bentonitu B75_OS pocházejícího z patron z in-situ experimentu. Výsledky z odběru z vrtu bez přítomnosti cementu po 10, 20 a 26 měsících od umístění.



Obr. 186 Bobtnací tlak nezatíženého bentonitu B75 a bentonitu B75_OS, zatěžovaného po dobu 20 měsíců v sytké formě v laboratorní peci teplotou 95 °C.



Obr. 187 Bobtnací tlak nezatíženého bentonitu B75 a bentonitu B75_OS, zatěžovaného po dobu 28 měsíců v sytké formě v laboratorní peci teplotou 95 °C.

V tabulce Tab. 13 je celkové vyhodnocení ovlivnění bobtnacího tlaku tepelným zatížením bentonitu B75 v suchém a vlhkém stavu.

Hodnocení je vždy vzhledem k nezatíženému bentonitu. Systém hodnocení je následující:

- 0 interval spolehlivosti OS bentonitu se nachází z více než 75 % uvnitř intervalu spolehlivosti NS bentonitu.
- + vyšší hodnoty – více než polovina intervalu spolehlivosti nad intervalem spolehlivosti NS bentonitu.
- ++ významně vyšší hodnoty – pás spolehlivosti OS bentonitu mimo pás spolehlivosti NS bentonitu.
- nižší hodnoty – více než polovina intervalu spolehlivosti pod intervalem spolehlivosti NS bentonitu.
- významně nižší hodnoty – pás spolehlivosti OS bentonitu mimo pás spolehlivosti NS bentonitu.

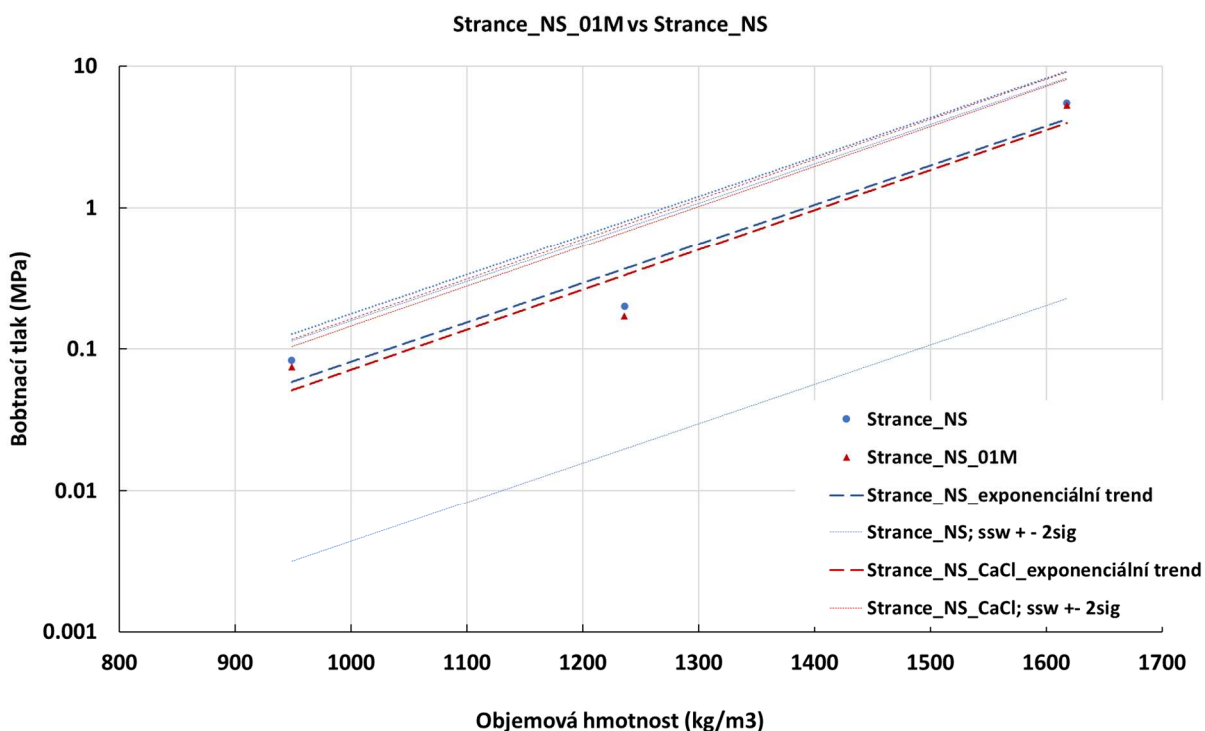
Tab. 13 Klasifikace ovlivnění bobtnacího tlaku tepelným zatížením bentonitu B75. Intervaly se vztahují k rozsahu objemových hmotností a k nim vztaženým charakteristickým křivkám zatíženého bentonitu Rokle. n – počet měřených prvků. Velikost intervalu odpovídá $(\rho_{dmax} - \rho_{dmin})/4$. ρ_{dmax} – maximální objemová hmotnost sušiny, ρ_{dmin} – minimální objemová hmotnost sušiny.

název bentonitu	n	ρ_{dmin}	ρ_{dmax}	zatížený bentonit – č. intervalu			
		(kg/m ³)	(kg/m ³)	1	2	3	4
B75_NS							
B75_BS_Josef_95 C_10 m	5	1200	1750	0	0	0	0
B75_BS_Josef_95 C_20 m	3	1550	1750	0	0	0	0
B75_BS_Josef_95 C_26 m	2	1390	1560	++	++	++	++
B75+CEM_BS_Josef_95 C_10 m	3	1610	1750	0	0	0	0
B75+CEM_BS_Josef_95 C_20 m	3	1350	1710	+	0	0	0
B75+CEM_BS_Josef_95 C_26 m	2	1380	1730	0	0	++	++
B75_dry_95 C_20 m	3	1280	1630	0	0	0	0
B75_dry_95 C_28 m	2	1300	1630	+	0	0	0
B75_KB_Josef_10 m	3			bodová data		0	
B75_KB_Josef_20 m	3			bodová data		0	
B75_KB_Josef_30 m	2			bodová data		0	
B75+CEM_KB_Josef_10 m	3			bodová data		0	
B75+CEM_KB_Josef_20 m	3			bodová data		-	
B75+CEM_KB_Josef_26 m	2			bodová data		--	

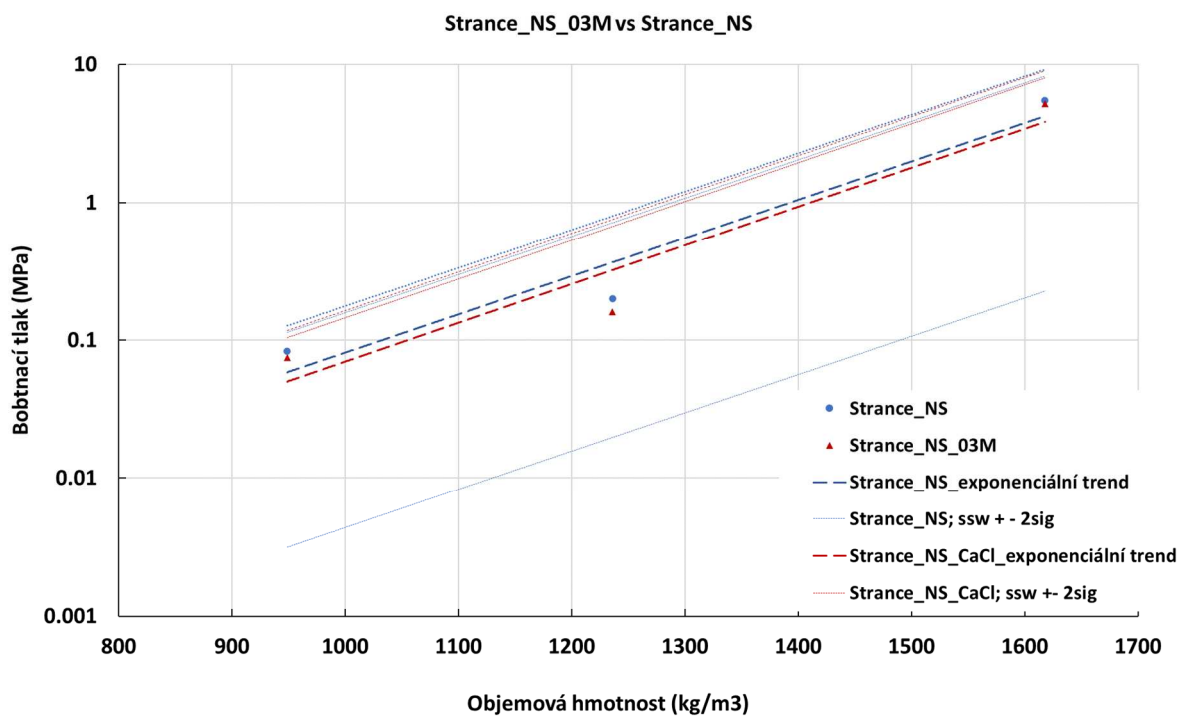
Bobtnací tlak bentonitu B75 může být mírně ovlivněn tepelným zatížením. Pro ovlivněný stav, kde jsou pozorovány změny bobtnacího tlaku jsou k dispozici pouze dvě hodnoty měření. Na vzorcích po 26 měsících tepelného zatěžování suspenze dochází k nárůstu bobtnacího tlaku. Tento je pozorován i na vzorcích, které se nacházely ve formě suspenze s vloženou cementovou kostkou.

2.10.5 SWEP – Stránce

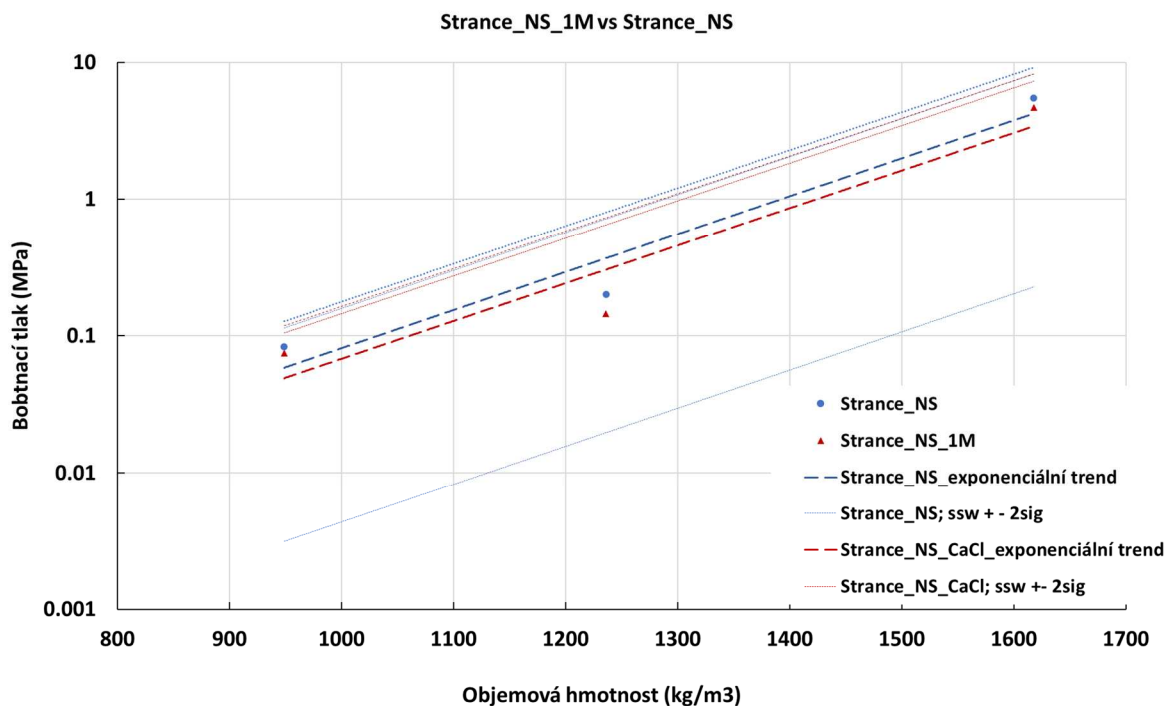
Na bentonitu Stránce byly provedeny zkoušky pouze na neovlivněném bentonitu (Stránce_NS). Zkoušky byly provedeny v zahraniční laboratoři pro SKB (Karnland et al. 2006). Zkoumán byl vliv saturačních médií o různé koncentrací solného roztoku na hydraulické a geotechnické vlastnosti bentonitu. Bentonit Stránce_NS byl sycen solným roztokem o koncentraci 0,1 M mol/L, 0,3 M mol/L, 1,0 M mol/L 3,0 M mol/L a jedna sada vzorků byla sycena destilovanou vodou. Bobtnací tlak při použití jednotlivých koncentrací saturačního media je v grafech na Obr. 188 - Obr. 191 porovnáván s výsledky měření s destilovanou vodou. Na bentonitu byly vždy změřeny bobtnací tlaky pro tři objemové hmotnosti sušiny pro jednotlivé koncentrace saturačního roztoku.



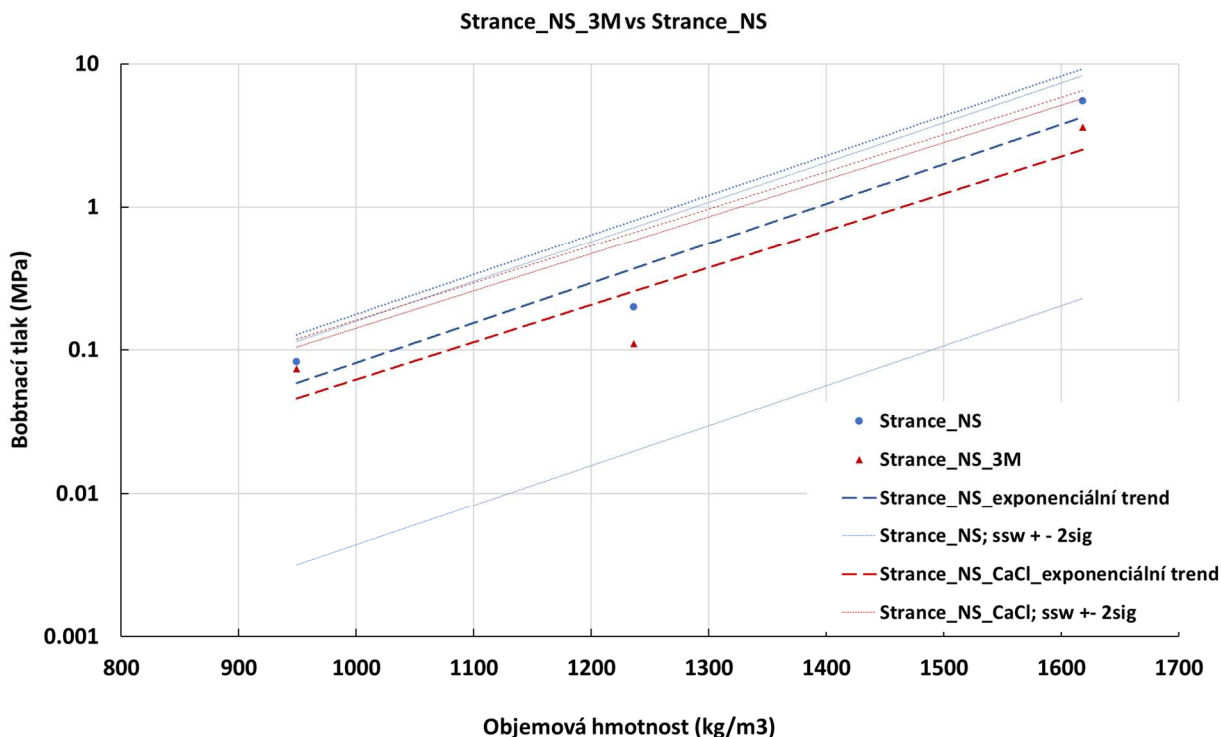
Obr. 188 Porovnání bobtnacího tlaku bentonitu Stránce při použití destilované vody a téhož bentonitu při použití saturačního media o koncentraci 0,1 M mol/l NaCl.



Obr. 189 Porovnání bobtnacího tlaku bentonitu Strance při použití destilované vody a téhož bentonitu při použití saturačního media o koncentraci 0,3 M mol/l NaCl.



Obr. 190 Porovnání bobtnacího tlaku bentonitu Strance při použití destilované vody a téhož bentonitu při použití saturačního media o koncentraci 1 M mol/l NaCl.



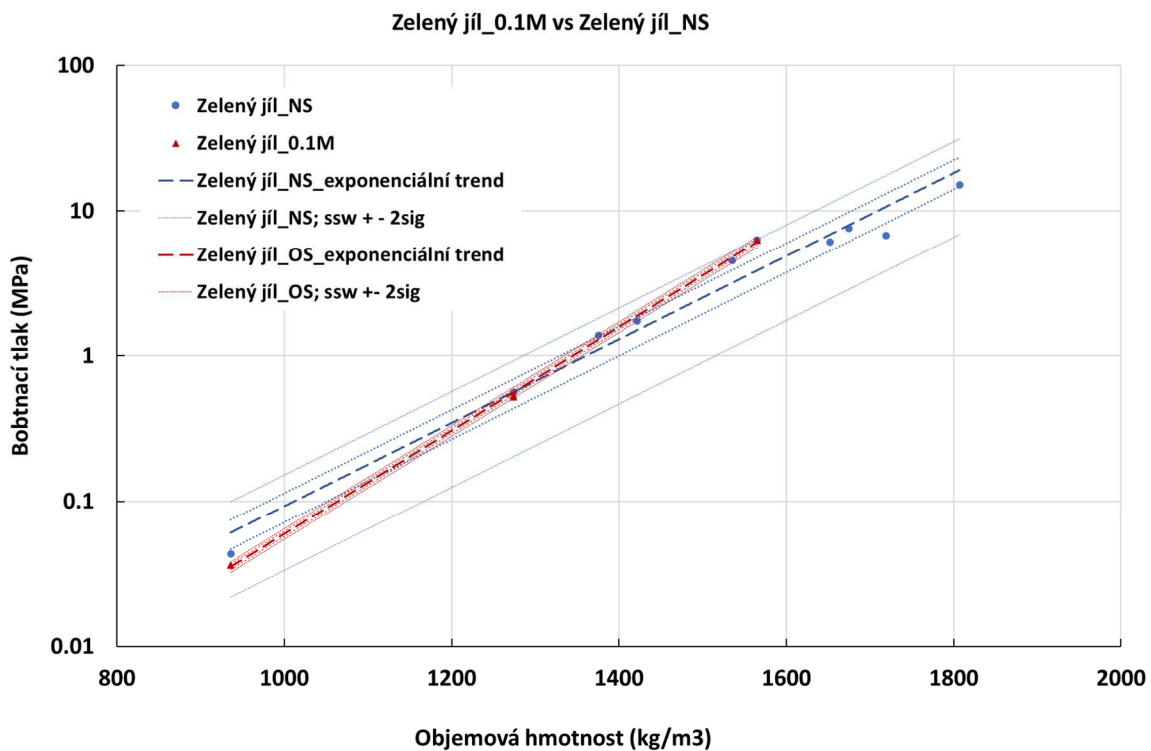
Obr. 191 Porovnání bobtnacího tlaku bentonitu Strance při použití destilované vody a téhož bentonitu při použití saturačního média o koncentraci 3 M mol/l NaCl.

Pro bentonit Strance byl stanoven bobtnací tlak jen na neovlivněném bentonitu syceného destilovanou vodou a na neovlivněném bentonitu za použití různých sytících médií. Použit byl roztok NaCl o koncentracích 0,1 – 3 M mol/l. Nebyly zaznamenány žádné změny bobtnacích schopností vlivem použití NaCl jako sytícího média.

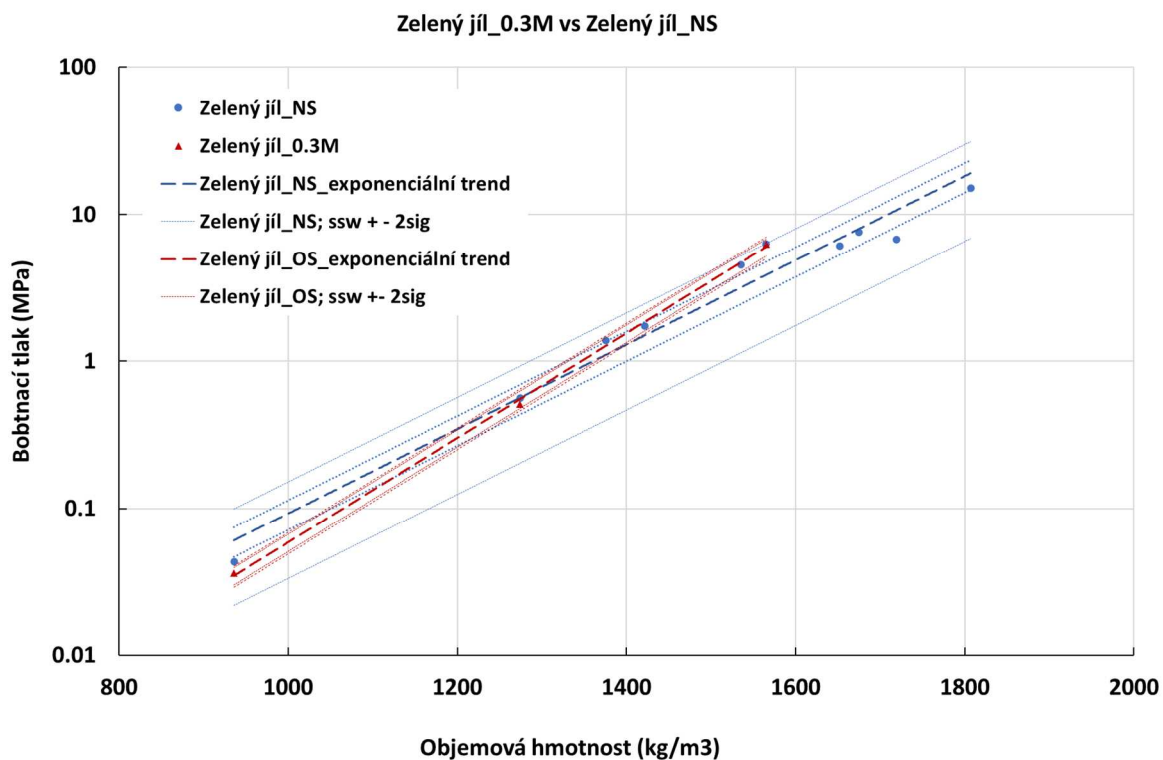
2.10.6 SWEP – Zelený jíl

Data pro vyhodnocení bobtnacího tlaku bentonitu Zelený jíl pochází ze dvou zdrojů

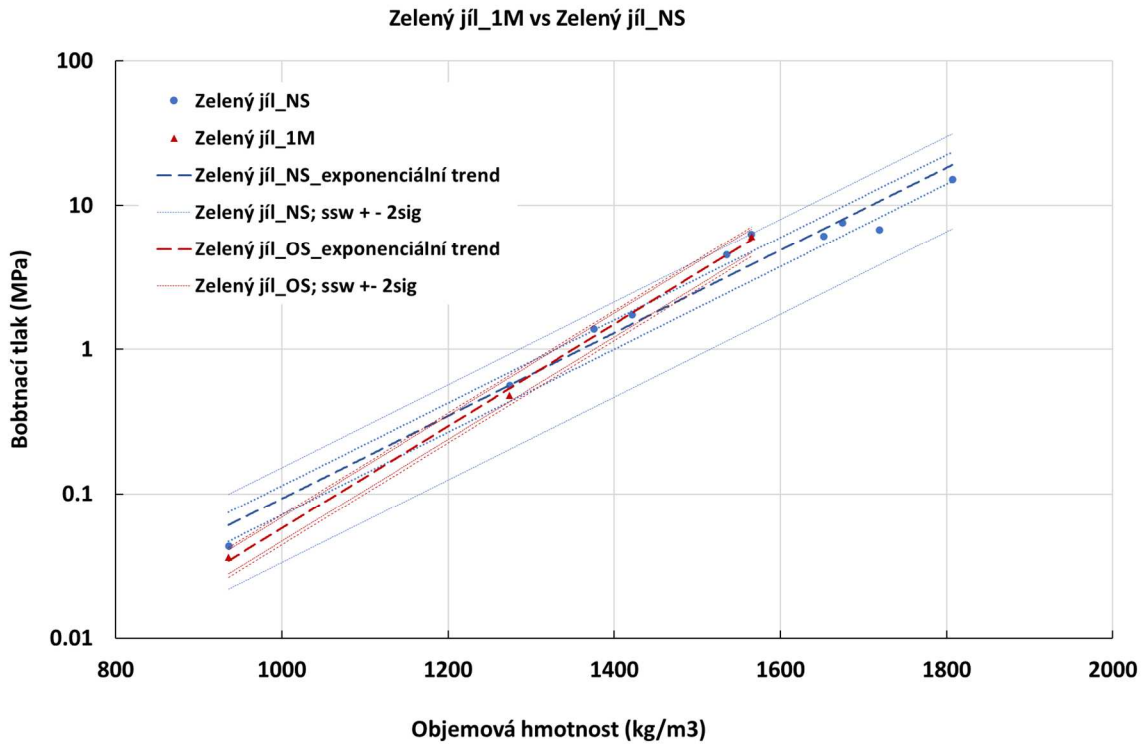
- V rámci analýzy mineralogie a těsnících vlastností bentonitů bylo pro instituci SKB provedeno pracovištěm CT měření bobtnacího tlaku bentonitu Zelený jíl při použití saturačního roztoku CaCl_2 o různých koncentracích. Byly použity koncentrace 0,1 M mol/L, 0,3 M mol/L, 1 M mol/L a 3 M mol/L. V rámci studie byla také měřena bobtnacího tlaku na sadě neovlivněných vzorků Zeleného jílu při použití destilované vody jako saturačního média (Karnland et al. 2006).
- Data pro vyhodnocení bobtnacího tlaku ovlivněného bentonitu Zelený jíl byla měřena v rámci projektu „Geotechnický výzkum přírodních zelených jílu miocenního cypřisového souvrství z lokality Skalná Nová ves“. Náplní projektu bylo měření bobtnacího tlaku bentonitu ve formě suspenze, suchého prášku a prefabrikátů po tepelném zatížení teplotou 95 °C po dobu 3 a 6 měsíců. Bentonitová suspenze byla namíchána z práškového bentonitu Zelený jíl a vody odebrané z vrtů podzemní laboratoře Josef. Fyzikální model se skládal z prefabrikátu vyrobeného z bentonitu Zelený jíl, který byl nalísován do tlakových nádob na objemovou hmotnost sušiny 1600 kg/m³. Měřen byl také bobtnací tlak na sadě vzorků neovlivněného bentonitu Zelený jíl (Pacovský et al. 2011).



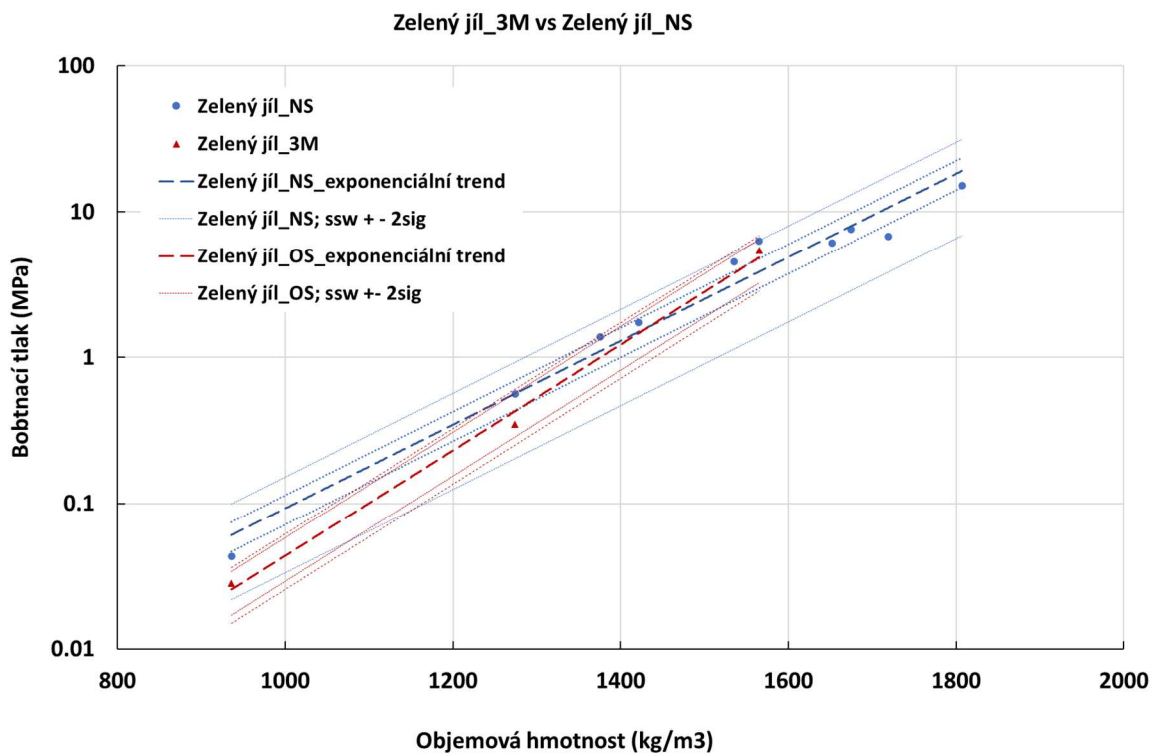
Obr. 192 Porovnání bobtnacího tlaku bentonitu Zelený jíł_NS a Zelený jíł_NS při použití jako saturačního media CaCl₂ o koncentraci 0,1 M mol/L.



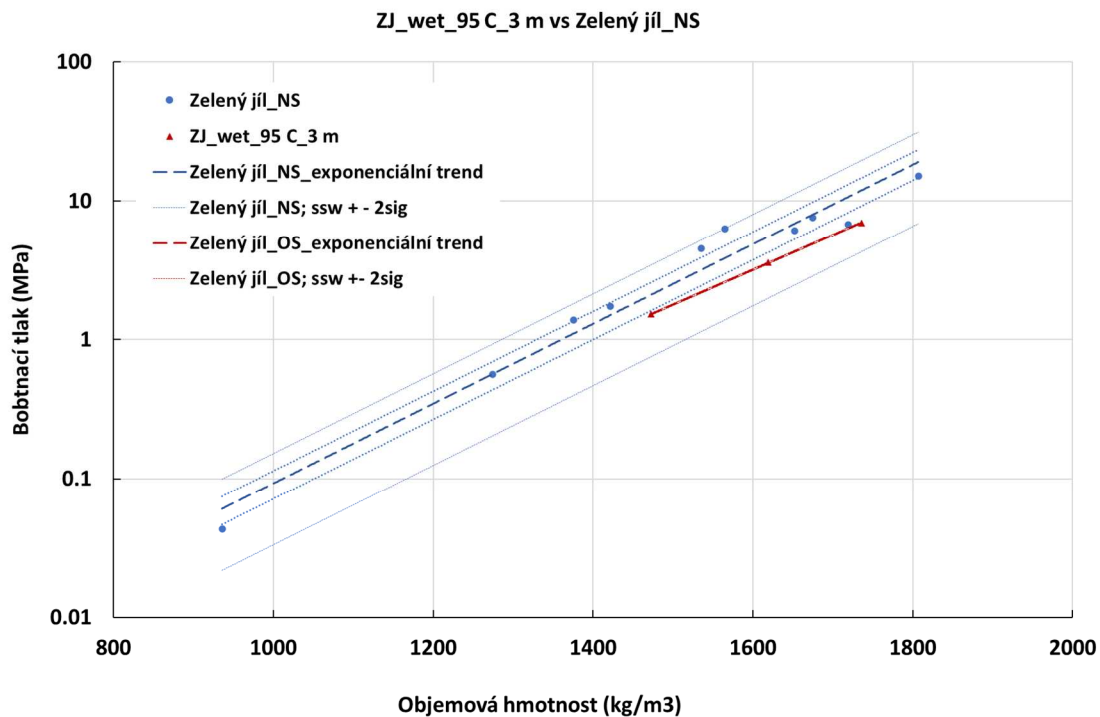
Obr. 193 Porovnání bobtnacího tlaku bentonitu Zelený jíł_NS a Zelený jíł_NS při použití jako saturačního media CaCl₂ o koncentraci 0,3 M mol/L.



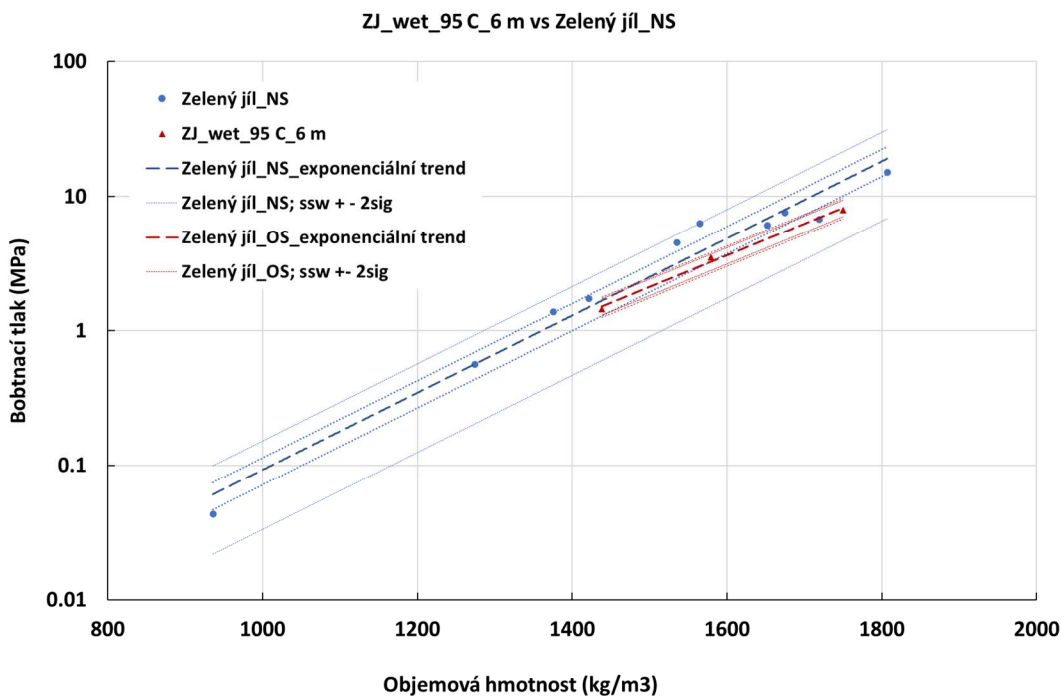
Obr. 194 Porovnání bobtnacího tlaku bentonitu Zelený jíł_NS a Zelený jíł_1M při použití jako saturačního media CaCl₂ o koncentraci 1 M mol/L.



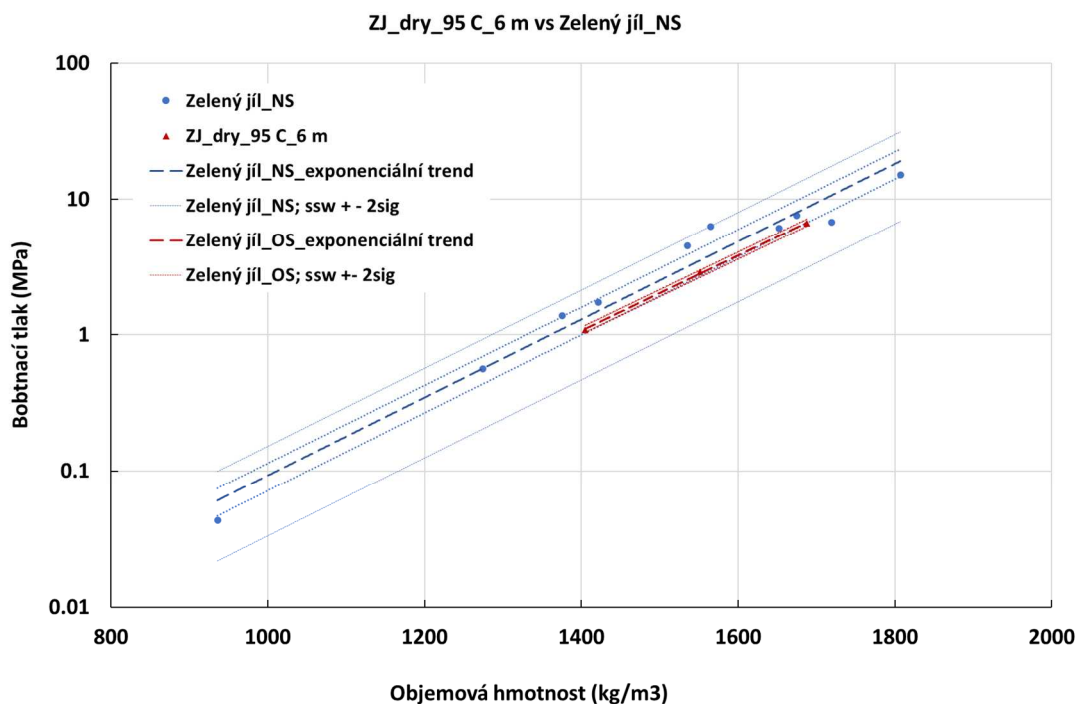
Obr. 195 Porovnání bobtnacího tlaku bentonitu Zelený jíł_NS a Zelený jíł_3M při použití jako saturačního media CaCl₂ o koncentraci 3 M mol/L.



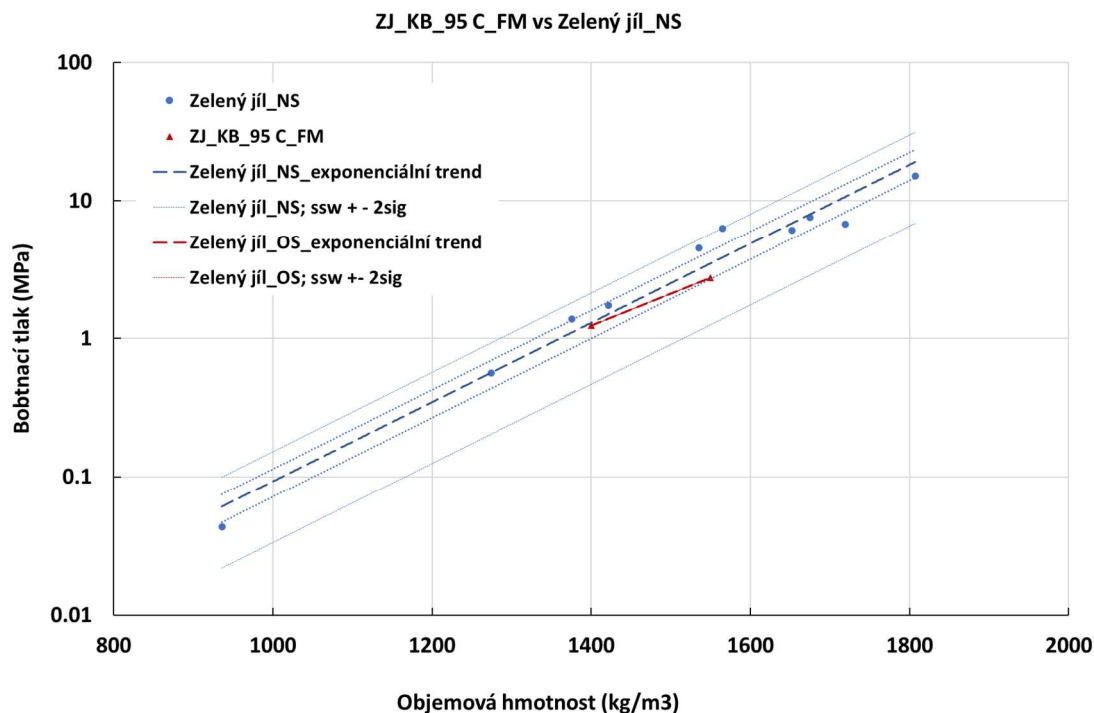
Obr. 196 Porovnání bobtnacího tlaku bentonitu Zelený jíł_NS a ovlivněného bentonitu Zelený jíł po zatížení teplotou 95 °C ve formě suspenze po dobu 3 měsíce.



Obr. 197 Porovnání bobtnacího tlaku bentonitu Zelený jíł_NS a ovlivněného bentonitu Zelený jíł po zatížení teplotou 95 °C ve formě suspenze po dobu 6 měsíců.



Obr. 198 Porovnání bobtnacího tlaku bentonitu Zelený jíł_NS a ovlivněného bentonitu Zelený jíł po zatížení teplotou 95 °C v suchém stavu po dobu 6 měsíců.



Obr. 199 Porovnání bobtnacího tlaku bentonitu Zelený jíł_NS a vzorku odebraného z fyzikálního experimentu, který se skládal z prefabrikátu vyrobeného z lisovaného bentonitu Zelený jíł (ZJ_KB_95C_FM).

V tabulce Tab. 14 je celkové vyhodnocení ovlivnění bobtnacího tlaku tepelným zatížením bentonitu Zelený jíł v suchém a vlhkém stavu.

Hodnocení je vždy vzhledem k nezatíženému bentonitu. Systém hodnocení je následující:

- 0 interval spolehlivost OS bentonitu se nachází z více než 75 % uvnitř intervalu spolehlivosti NS bentonitu.
- + vyšší hodnoty – více než polovina intervalu spolehlivosti nad intervalem spolehlivosti NS bentonitu.
- ++ významně vyšší hodnoty – pás spolehlivosti OS bentonitu mimo pás spolehlivosti NS bentonitu.
- nižší hodnoty – více než polovina intervalu spolehlivosti pod intervalem spolehlivosti NS bentonitu.
- významně nižší hodnoty – pás spolehlivosti OS bentonitu mimo pás spolehlivosti NS bentonitu.

Tab. 14 Klasifikace ovlivnění bobtnacího tlaku tepelným zatížením bentonitu Zelený jíł. Intervaly se vztahují k rozsahu objemových hmotností a k nim vztaženým charakteristickým křivkám zatíženého bentonitu Zelený jíł. n – počet měřených prvků. Velikost intervalu odpovídá $(\rho_{dmax} - \rho_{dmin})/4$. ρ_{dmax} – maximální objemová hmotnost sušiny, ρ_{dmin} – minimální objemová hmotnost sušiny.

název bentonitu	n	ρ_{dmin} (kg/m ³)	ρ_{dmax} (kg/m ³)	zatížený bentonit – č. intervalu			
				1.	2.	3.	4.
Zelený jíł_NS	10	960	1800				
ZJ_wet_95 C_3 m	3	1480	1750	0	0	0	0
ZJ_wet_95 C_6 m	3	1450	1760	0	0	0	0
ZJ_dry_95 C_6 m	3	1400	1690	0	0	0	0
ZJ_KB_95 C_FM	2	1400	1470	0	0	0	0

Bobtnací tlak bentonitu Zelený jíł není tepelným zatížením ovlivněn

2.10.7 Metodické a statistické zhodnocení

Bobtnací tlak je vyhodnocován stejným způsobem jako hydraulická vodivost. Je sledována vzájemná poloha pásů spolehlivosti ovlivněného a neovlivněného bentonitu. Poté je poloha klasifikována dle toho, zda pás spolehlivosti ovlivněného bentonitu leží uvnitř pásu spolehlivosti neovlivněného a tím pádem nelze mluvit o ovlivnění, či nikoli.

Z důvodu nedostatku měřených dat na neovlivněném bentonitu Stránce není možné vyhodnotit míru ovlivnění. Na bentonitu BaM jsou dostupná data pouze neovlivněného bentonitu. U bentonitu Rokle je vyhodnocení ovlivnění diskutabilní, jelikož měřená data na neovlivněném bentonitu vykazují vysoký rozptyl tím i interval spolehlivosti je široký. Spolehlivě lze vyhodnotit data z měření na BCV, B75 a Zelený jíł. Z těchto tří bentonitů jako jediný vykazuje změnu bobtnacího tlaku vlivem tepelného zatížení bentonit BCV, u kterého dochází k nárůstu bobtnacího tlaku po tepelném zatížení v suchém i vlhkém stavu. Tento jev je pozorován pouze po 6 měsících zatěžování teplotou 150°C. Bobtnací tlak měřený na bentonitu BCV po 12 měsících zatěžování je již analyzován jako nezatížený. Není zde tedy pozorován žádný vývoj změny bobtnacího tlaku. Po zatížení teplotou 200 °C žádné změny pozorovány nejsou. V případě B75 dochází k nárůstu

bobtnacího tlaku bentonitu zatěžovaného ve vlhkém stavu po 26 měsících zatěžování, ale k dispozici jsou pouze dvě měřené hodnoty, pro spolehlivou statistickou analýzu a vyvození závěru je tento počet nedostatečný.

2.11 Pevnost v tlaku

Pevnost v tlaku jako parametr sám o sobě není dostatečně citlivým indikátorem stability bentonitu. Hodnota pevnosti v tlaku je vztažena spíše k bentonitovému výrobku než k bentonitu jako materiálu samotnému. Výsledná pevnost v tlaku podléhá vysoké variabilitě a nejistotám všech vstupů, které mají významnější vliv na výsledek zkoušky, než vliv zatížení, kterému byl bentonit vystaven. Z tohoto důvodu není vhodným indikátorem důsledků v podobě rozdílného mechanického chování bentonitu vlivem jakéhokoliv zatížení. Pevnost v tlaku je vhodné měřit za účelem zjištění mechanických vlastností bentonitového výrobku, respektive jeho stability v čase za daných podmínek a nikoli jako ukazatele změn vlastního bentonitu ovlivněním.

Pevnost v tlaku není možné vyhodnotit na žádném z druhu bentonitu z důvodu nekonzistence dat. V případě pevnosti v tlaku se jedná o vícerozměrné datové soubory. Pevnost tlaku je kromě mineralogického a chemického složení a fyzikálních vlastností (např. zrnitost) přímo závislá na objemové hmotnosti sušiny, vlhkosti vzorku a směru zatížení (kolmo na lisování x ve směru), jedná se tedy o čtyř a více rozměrná data z nichž ani jeden údaj není možné zanedbat.

Za účelem statistického vyhodnocení a porovnání vlastností ovlivněného a neovlivněného bentonitu je nutné disponovat alespoň jednou datovou sadou z každého typu bentonitu, kdy obě řady mají stejné okrajové podmínky. Okrajové podmínky závisí na tom, jaké charakteristiky jsou předmětem zkoumání. Okrajovými podmínkami jsou zpravidla vlhkost vzorku a směr zatížení, aby bylo možné vliv těchto charakteristik odfiltrovat. Z dostupných dat není možné zkompletovat dvě sady dat, u kterých by probíhaly zkoušky pevnosti v tlaku při stejné vlhkosti vzorku. Případné rozdíly v pevnosti v tlaku poté není možné jednoznačně přisoudit změnám vlivem zatížení, nebo rozdílné vlhkosti.

Souhrn počtu měřených hodnot pevnosti v tlaku na jednotlivých bentonitech je uveden v Příloze 11. Pro neovlivněný stav bylo provedeno měření na bentonitu BCV, Rokle a Zelený jíla a B75. Pevnost v tlaku ovlivněného bentonitu byla určena u bentonitu Rokle a Zelený jíla. Výsledky pro každý z bentonitů pochází pouze z jednoho zdroje.

U jednotlivých bentonitů jsou dále uvedeny měřené hodnoty na neovlivněném bentonitu. Tato data spolu s měřenými hodnotami na ovlivněném bentonitu jsou vložena do databáze.

2.11.1 RC – BCV

Na BCV_NS byla provedena jen jedna zkouška pevnosti v tlaku (Svoboda et al. 2019a), výsledek je uveden v tabulce Tab. 15. Ve zdroji není uvedena vlhkost vzorku, ani směr lisování.

Tab. 15 Pevnost v tlaku bentonitu BCV_NS.

ρ_d , kg/m ³	R_c , kPa
1500	4200

2.11.2 RC – Rokle

Pevnost v tlaku na bentonitu Rokle byla měřena v rámci projektu Experimentální výzkum materiálu na bázi bentonitu při dlouhodobém působení teploty a saturačního média s extrémními účinky (Pacovský et al. 2010a) a projektu Ověřování nahraditelnosti bentonitů montmorillonitickými jíly (Pacovský et al. 2003), kde byla určena pevnost v tlaku neovlivněného bentonitu Rokle_NS. Pevnost v tlaku závisí na více parametrech. Těmi jsou objemová hmotnost sušiny bentonitu, vlhkost a směr jakým je vzorek při zkoušce zatěžován (ve směru lisování, nebo kolmo na směr lisování). Sady dostupných dat se liší ve vlhkostech a objemových hmotnostech. Z tohoto důvodu nelze provést porovnání ani statistické vyhodnocení.

Měření pevnosti v tlaku ovlivněného bentonitu Rokle proběhlo výhradně v rámci projektu zaměřeného na saturační média (Pacovský et al. 2010a). Výsledky jsou prezentovány ve zprávě k tomuto projektu a jsou zavedeny v databázi. Na základě provedených měření není možné sledovat žádné konzistentní systematické změny způsobené tepelným zatěžováním, ani druhem vody, kterou byl bentonit zatěžován.

V tabulce Tab. 16 jsou uvedeny hodnoty pevnosti v tlaku neovlivněného bentonitu pro různé objemové hmotnosti a vlhkosti.

Tab. 16 Pevnost v tlaku bentonitu Rokle_NS.

R_c , kPa	w , -	ρ_d , kg/m ³	provedení zkoušky (ve směru/kolmo na směr) lisování
6900	0.027	1870	ve směru
7700	0.026	1871	kolmo
17600	0.03	1864	ve směru
11900	0.031	1862	kolmo
5500	0.012	1897	ve směru
7000	0.011	1899	kolmo
5400	0.1036	1450	neuveďeno
2326	0.086	1575	ve směru
1780	0.086	1573	kolmo

2.11.3 RC – BaM

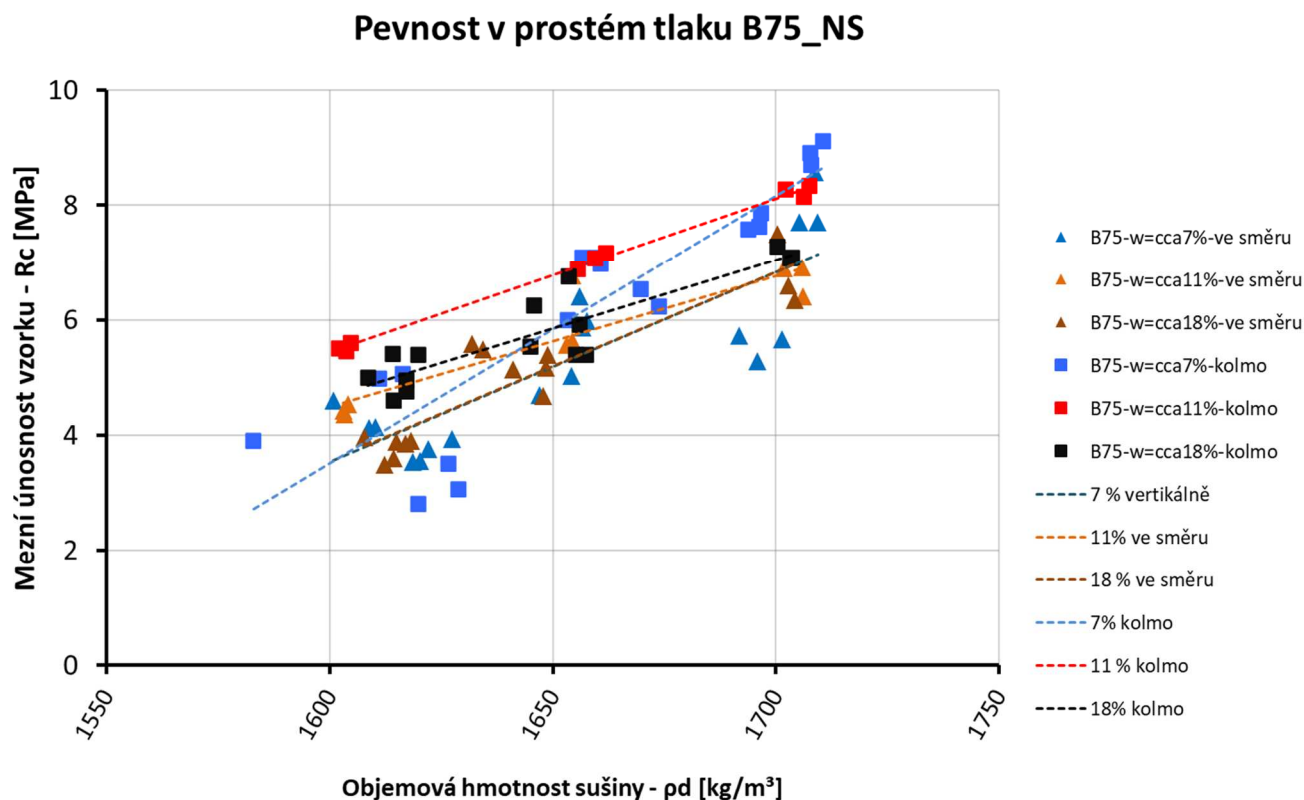
Pro bentonit BaM nebyla určena pevnost v tlaku pro žádnou z forem bentonitu.

2.11.4 RC - B75

Na bentonitu B75 byly provedeny zkoušky pevnosti v tlaku v rámci projektu FR-TI1/362, Zkoušky byly provedeny na B75_NS . Výsledky jsou ve zprávě uvedeny v grafické podobě, číselné hodnoty poskytl autorský kolektiv. V rámci projektu byl testován jen neovlivněný bentonit B75. V rámci projektu byl testován B75_NS o různých objemových hmotnostech sušiny o vlhkostech kolem 7 %, 11 % a 18 %. Zkoušky byly prováděny kolmo na směr lisování i ve směru lisování. Data měřena na neovlivněném B75 pochází výhradně z tohoto projektu (MPO TIP FR-TI1/362).

Na Obr. 200 jsou vykresleny pevnosti v tlaku bentonitu vztahující se k jednotlivým vlhkostem a směru zatížení lisu.

Ovlivněný bentonit B75 nebyl testován.



Obr. 200 Pevnost v tlaku B75_NS pro různé vlhkosti (7 %, 11 %, 18 %), objemové hmotnosti a různý směr zatížení při zkoušce.

Na základě grafu na Obr. 200 lze odvodit, že výsledná pevnost v tlaku bentonitu B75 závisí zejména na objemové hmotnosti sušiny. Nejúnosnějších prefabrikátů je dosaženo při vlhkosti 11 % a zatížení kolmo na směr lisování.

2.11.5 RC – Stránce

Na bentonitu Stránce nebyla určena pevnost v tlaku pro žádnou z forem bentonitu.

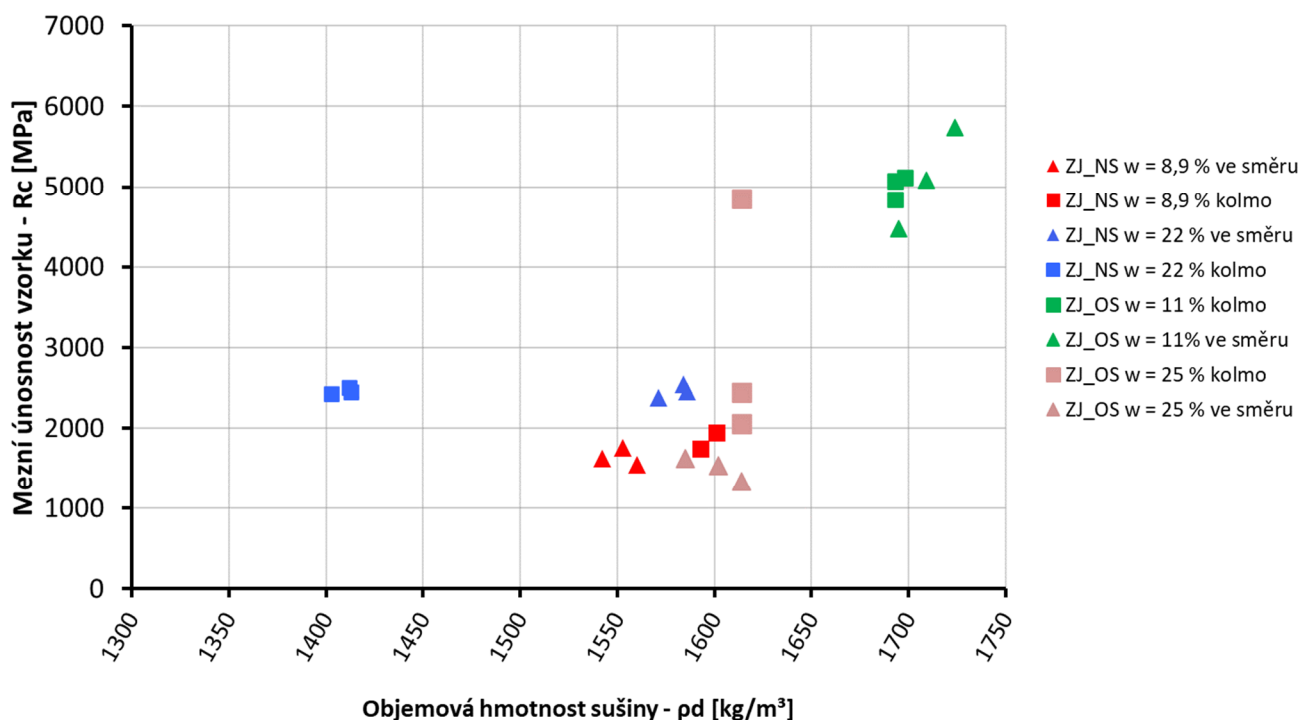
2.11.6 RC – Zelený jíl

Pevnost v tlaku byla měřena v rámci projektu „Geotechnický výzkum přírodních zelených jílu miocenního cypřisového souvrství z lokality Skalná Nová ves“. Náplní projektu bylo měření geotechnických, hydraulických a termofyzikálních vlastností bentonitu ve formě suspenze, suchého prášku a prefabrikátů po tepelném zatížení teplotou 95 °C po dobu 3 a 6 měsíců. Měřená data jsou prezentována číselně i graficky v technické zprávě (Pacovský et al. 2011). Na ovlivněném bentonitu Zelený jíl byla měřena jedna sada dat. Ovlivnění spočívalo ve vystavení bentonitové suspenze po dobu 6 měsíců teplotě 95 °C. Závěrem z projektu je, že na základě

provedených měření pevnosti v tlaku není možné sledovat žádné konzistentní systematické změny způsobené tepelným zatěžováním, ani vlhkočním stavem, ve kterém byl bentonit zatěžován. Měření ovlivněného i neovlivněného bentonitu Zelený jíl bylo provedeno výhradně v rámci tohoto projektu.

Statistické vyhodnocení vlivu zatížení na pevnost v tlaku není možné provést z důvodu rozdílné vlhkosti vzorků z jednotlivých datových souborů. V grafu na Obr. 201 je grafické vyjádření měřených pevností v tlaku ovlivněného a neovlivněného bentonitu Zelený jíl. Testovány byly různé vlhkosti bentonitu od 8,9 % do 25 % a pevnost v různých směrech ve vztahu ke směru lisování. Největší rozptyl hodnot je pro bentonitové prefabrikáty o vlhkosti 25 %. V tomto případě se pevnost pohybuje od 1,1 MPa do 5 MPa. Bentonitový prefabrikát vyrobený ze Zeleného jílu o vlhkosti 22 % má při objemových hmotnostech sušiny od 1400 kg/m³ do 1680 kg/m³ stejnou pevnost 2,5 MPa. Prefabrikát o vlhkosti 8,9 % má při objemové hmotnosti sušiny 1600 kg/m³ stejnou pevnost jako prefabrikát o vlhkosti 25 %. Je důvodné se domnívat, že výsledná pevnost v tlaku významně závisí na způsobu výroby prefabrikátu.

Pevnost v prostém tlaku Zelený jíl_NS vs Zelený jíl_OS



Obr. 201 Pevnost v tlaku neovlivněného bentonitu Zelený jíl (ZJ_NS) a bentonitu Zelený jíl vystaveného po dobu 6 měsíců teplotě 95 °C ve formě suspenze (ZJ_OS).

2.11.7 Metodické a statistické zhodnocení

Statistické vyhodnocení není možné provést, jelikož se jedná o čtyřrozměrná data, která vykazují značnou heterogenitu. Data se liší v počátečních parametrech. Jakákoli odlišnost v těchto parametrech vnáší nejistotu do vyhodnocení, zda jsou měřené změny způsobené zatížením, nebo touto drobnou odlišností v počátečních podmínkách při měření. Pevnost v tlaku patří mezi

základní fyzikální vlastnosti bentonitového výrobku, ale není vhodným indikátorem stability bentonitu.

2.12 Tepelná vodivost (THC)

Součinitel tepelné vodivosti významně závisí na vlhkosti měřeného vzorku a na objemové hmotnosti vzorku. Voda a pevná fáze jsou nosiči termofyzikálních vlastností. Součinitel tepelné vodivosti je charakteristika, jejíž výsledná hodnota je citlivější na vstupní vlhkost, než na objemovou hmotnost sušiny (Svensson et al. 2019). V případě tepelné vodivosti se jedná o vícerozměrný datový soubor. Za účelem porovnání těchto souborů je nutné disponovat sadami dat o stejných vstupních parametrech, zpravidla je tímto vstupním parametrem vlhkost vzorku. Není možné porovnávat dvě sady dat o rozdílných vlhkostech, jelikož není možné případné změny ve vlastnostech přisoudit jednoznačně vlivu zatěžování, nebo rozdílné vlhkosti. Vliv vstupní vlhkosti ilustruje graf na Obr. 202, kde jsou vizualizována data z měření součinitele tepelné vodivosti bentonitu o vlhkosti 12 % a 27 %.

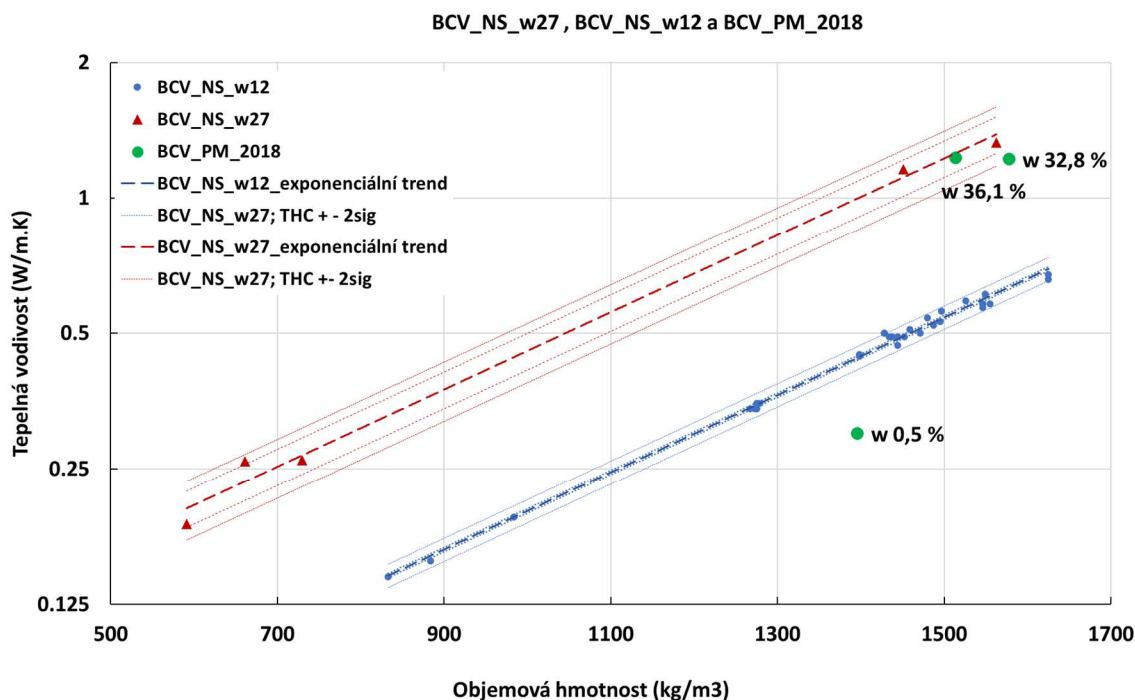
Z dostupných měření napříč všemi druhy bentonitů jsou pro porovnání vhodné pouze dvě sady dat. Jedná se o bentonit Rokle a Rokle_dry_110 C_24 h_w0 (Rokle vystavená 24 hodin teplotě 110 °C v suchém stavu). Vzorky z obou sad mají vlhkost 0 %, graf je na Obr. 204.

Součinitel tepelné vodivosti není vhodným indikátorem změn v bentonitu vlivem tepelného zatěžování. Je žádoucí tento parametr měřit, ale s motivací zjistit základní charakteristiky bentonitu při různých vlhkostech, zejména extrémních (nulová vlhkost, nulový tlak x plně nasycený stav). Nepředpokládá se, že by tepelné zatěžování mělo významný vliv na termofyzikální vlastnosti.

2.12.1 THC – BCV

Pro BCV byla určena tepelná vodivost pouze nezatíženého bentonitu, a to v práškové formě (BCV_NS) a ve formě pelet (BCV_PM_2018), výsledky jsou uvedeny v technických zprávách (Červinka et al. 2018, Svoboda 2019a). Tepelná vodivost práškového bentonitu byla stanovena pro bentonit o dvou vlhkostech a to $w = 12\%$ a $w = 27\%$. V grafu na Obr. 202 je tento bentonit označován jako BCV_NS_w12 a BCV_NS_w27.

Na ovlivněném bentonitu nebyla tepelná vodivost měřena.



Obr. 202 Tepelná vodivost práškového BCV_NS o různých vlhkostech a objemových hmotnostech sušiny a peletizovaného nezatíženého BCV_PM_2018.

2.12.2 THC – Rokle

Data pro OS Rokle pocházejí z laboratorních a in-situ experimentů. Data pochází ze dvou zdrojů, jedním je projekt Ověřování nahraditelnosti bentonitu montmorillonitickými jíly (Pacovský et al. 2003) a Experimentální výzkum materiálu na bázi bentonitu při dlouhodobém působení teploty a saturačního media s extrémními účinky (Pacovský et al. 2010a).

V projektu zaměřeném na ověřování nahraditelnosti (Pacovský et al. 2003) byl bentonit Rokle vystavován krátkodobě (24 h) a dlouhodobě (3 a 6 měsíců) zvýšené teplotě (80 °C a 110 °C) a poté byl testován při laboratorní teplotě.

V projektu zaměřeném na saturační media (Pacovský et al. 2010a) byl bentonit v obou případech vystavován kombinovaným zatížením teplem a dvěma typům saturačního media. Přirozené podzemní vodě „Josef“ a syntetické „SGW-K“. Testovány byly dva typy bentonitů založené na bentonitu Rokle:

- Čistá Rokle.
- Substrát Mock-Up-CZ (směs bentonitu RMN, křemenného písku a grafitu) po zatížení teplotou 60-70 °C po dobu 4 let.

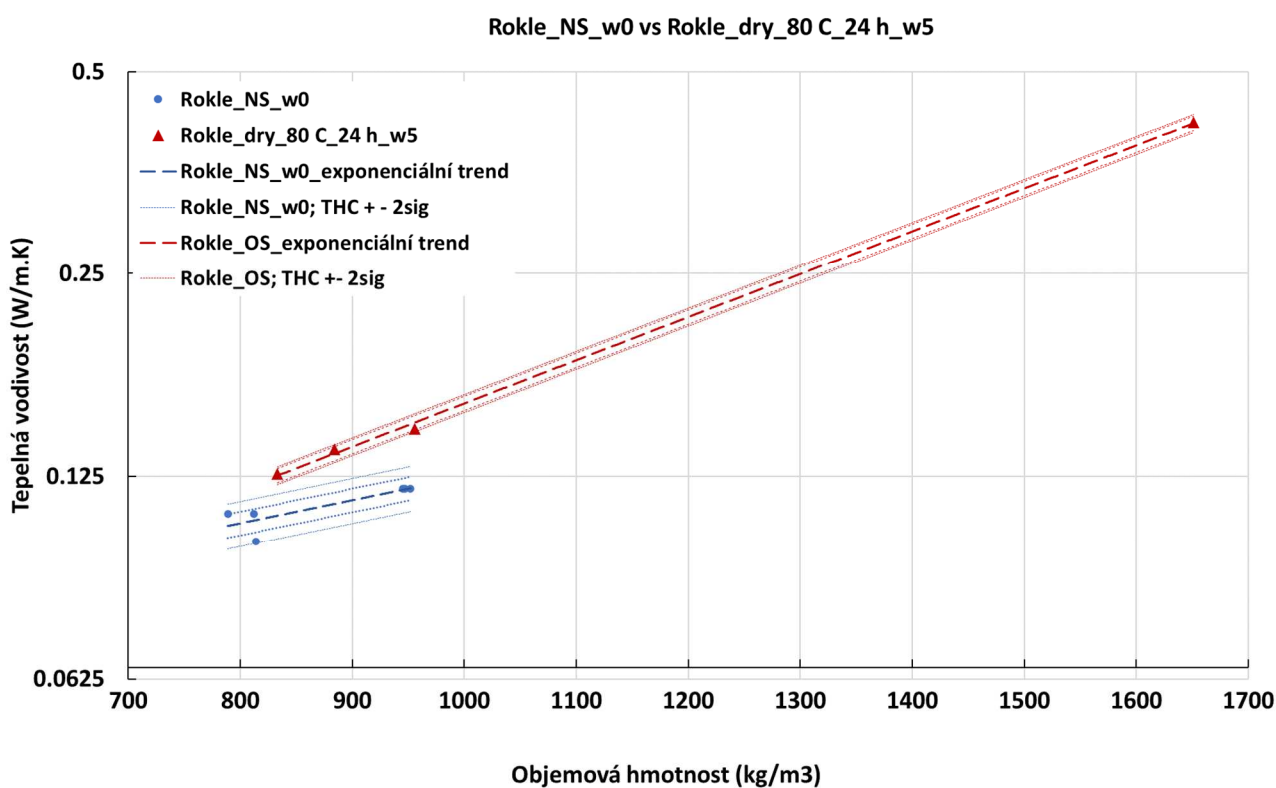
Laboratorní experimenty

Vzorky bentonitů byly umístěny v tlakových nádobách a zality saturačním mediem (vodou „Josef“ či „SGW-K“). Procedura spočívala v zahřívání (zatěžování) tlakových nádob teplotou 95 °C po dobu 13 dnů a následném vystavení nádob běžné laboratorní teplotě (1 den). Odběry byly poté provedeny po 3, 6, 12 a 18 měsících (Pacovský et al. 2010a).

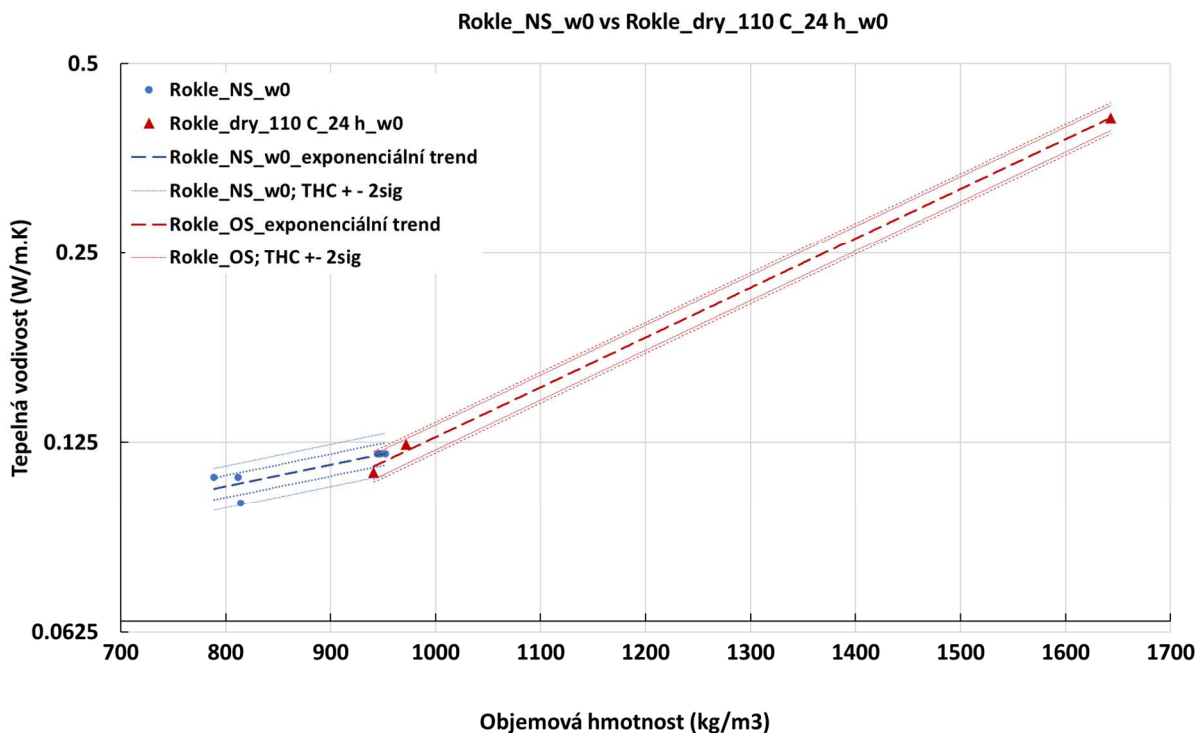
In-situ experimenty

Do vrtu v podzemí v blízkosti tepelného zdroje byly umístěny perforované patrony s bentonitovou náplní (Rokle, Mock-Up CZ). Bentonit byl vystavován přirozeném podzemnímu prostředí. Saturačním mediem byla přirozená voda „Josef“. Náplň patron byla zatěžována teplotou do 100 °C. Odběry byly poté provedeny po 3, 6, 12 a 18 měsících (Pacovský et al. 2010a).

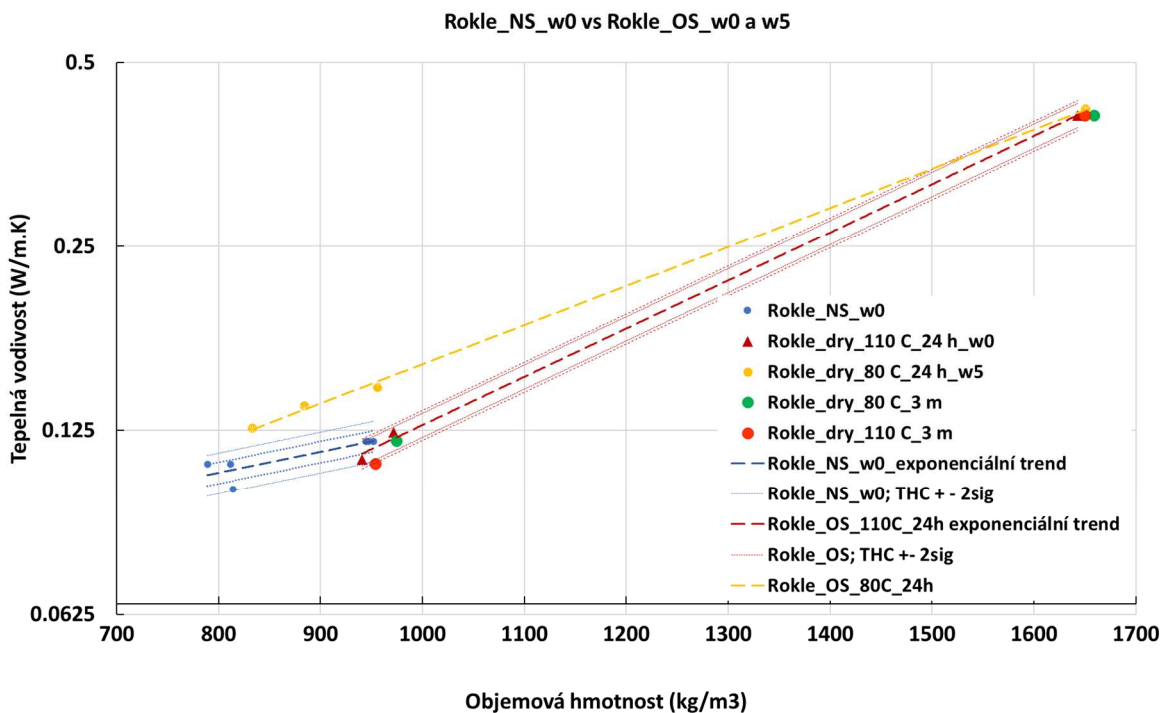
Na grafech na Obr. 203 a Obr. 205 je ilustrace vlivu vlhkosti na termofyzikální vlastnosti bentonitu. Na grafech je možné pozorovat nižší součinitel tepelné vodivosti bentonitu vystaveného teplotě 110 °C, než bentonitu vystavenému teplotě 80 °C, který měl vyšší vlhkost o 5 %. Rozdíl je již významný. Součinitel tepelné vodivosti je parametr citlivý na vlhkost bentonitu v průběhu měření. Vliv vlhkosti je významnější, než vliv objemové hmotnosti sušiny (Svensson et al. 2019).



Obr. 203 Porovnání tepelné vodivosti neovlivněné Rokle o vlhkosti $w = 0$ a Rokle_OS po vystavení teplotě 80 °C po dobu 24 h a vlhkosti 5 %.



Obr. 204 Porovnání tepelné vodivosti neovlivněné Rokle o vlhkosti $w = 0$ a Rokle_dry_110 C_24 h_w0 po vystavení teplotě 110 °C po dobu 24 h a o vlhkosti 0 %.



Obr. 205 Porovnání tepelné vodivosti Rokle po krátkodobém vystavení (24 h) tepelnému působení 80 °C a 110 °C a dlouhodobému vystavení (3 měsíce) zvýšené teplotě 80 °C a 110 °C. Vlhkost neovlivněného vzorku a vzorku po vystavení 110 °C při testování je $w = 0$ % vlhkost vzorku po vystavení teplotě 80 °C je 5 %.

Součinitel tepelné vodivosti měřený v rámci experimentálního výzkumu materiálu na bázi bentonitu při dlouhodobém působení teploty a saturačního media s extrémními účinky (Pacovský et al. 2010a) není možné statisticky vyhodnotit. Součinitel tepelné vodivosti je přímo závislý na objemové hmotnosti sušiny a vlhkosti vzorku. Porovnání a statistické vyhodnocení vlivu zatěžování na bentonit je nutné porovnávat na sadách vzorků o stejné vlhkosti za účelem vyloučení vlivu tohoto parametru na vyhodnocení. V rámci experimentu se saturačním medii nejsou k dispozici ani dvě sady dat o stejné vlhkosti. Grafický přehled výsledků je uveden v Pacovský et al. (2010a). Na základě provedených měření není možné sledovat žádné konzistentní systematické změny způsobené tepelným zatěžováním, ani druhem vody, kterou byl bentonit zatěžován.

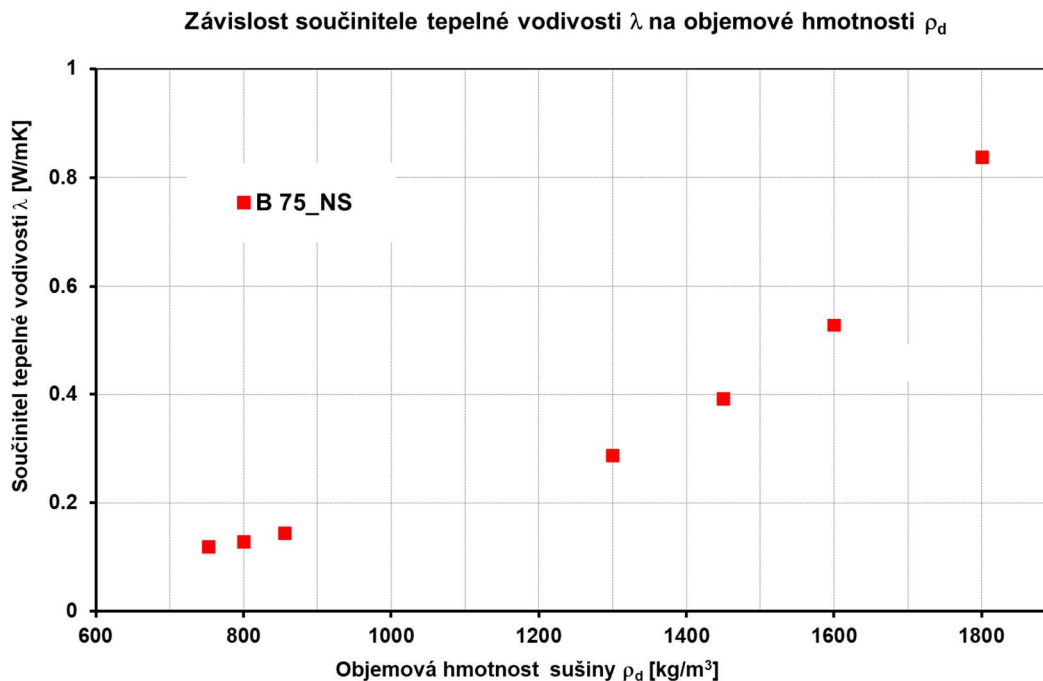
2.12.3 THC – BaM

Pro BaM nebyla určena tepelná vodivost pro žádnou z forem bentonitu.

2.12.4 THC – B75

Stanovení tepelné vodivosti bentonitu B75 bylo součástí projektu FR-TI1/362, výsledky jsou prezentovány v technické zprávě k projektu (Vašíček et al. 2013). V tomto projektu byl bentonit zatěžován teplotou 95 °C ve formě suspenze a v suchém stavu. Měření bylo provedeno jen na B75_NS a výsledky jsou ve zprávě uvedeny v grafické podobě, hodnoty byly poskytnuty autory zprávy. Testování B75 bylo také součástí projektu DOPAS (Vašíček et al. 2016).

Dostupná je jedna hodnota tepelné vodivosti měřená na B75_NS (Šťástka et al. 2018). Ve zdroji je uvedena hodnota 0,45 W/m.K pro objemovou hmotnost 1500 kg/m³. Zdroj neuvádí, pro jakou vlhkost by tato hodnota stanovena. V grafu na Obr. Obr. 206 je zobrazen součinitel tepelné vodivosti nezatíženého bentonitu B75_NS o vlhkosti $w = 7\%$.



Obr. 206 Součinitel tepelné vodivosti neovlivněného bentonitu B75 (B75_NS) pro vlhkost $w = 7$ %.

2.12.5 THC – Stránce

Žádná dostupná data vhodná pro statistické vyhodnocení.

2.12.6 THC – Zelený jíł

Žádná dostupná data vhodná pro statistické vyhodnocení.

2.12.7 Metodické a statistické zhodnocení

tepelná vodivost je základní charakteristikou bentonitu. Nepředpokládá se, že by docházelo ke změnám tepelné vodivosti bentonitu vlivem jeho tepelného zatěžování. Tepelná vodivost bentonitu v ovlivněném stavu byla měřena pouze pro bentonit Rokle. Výsledný vliv tepelného zatížení na tento parametr nelze vyhodnotit z důvodu variability vstupních parametrů všech vyhodnocovaných datových sad. Variabilita vstupních parametrů má větší vliv na výsledek než ovlivnění bentonitu. Tepelná vodivost neovlivněného stavu byla stanovena na bentonitu BCV, Rokle a B75. Pro bentonity BaM, Stránce a Zelený jíł nejsou data k dispozici.

2.13 Měrná tepelná kapacita

Pro měrnou tepelnou kapacitu platí totéž, jako pro součinitel tepelné vodivosti. Tento parametr je přímo závislý, kromě mineralogického složení, na vstupní vlhkosti a objemové hmotnosti sušiny. Vstupní parametry, které se uplatňují při měření podléhají vysoké variabilitě a případné změny

v termodynamickém chování bentonitu není možné striktně přisoudit vlivu zatížení, nebo vlivu variability vstupních parametrů.

Měrná tepelná kapacita není vhodným indikátorem změn v bentonitu vlivem tepelného zatěžování. Je žádoucí tento parametr měřit, ale s motivací zjistit základní charakteristiky bentonitu při různých vlhkostech, zejména extrémních (nulová vlhkost x plně nasycený). Nepředpokládá se, že by tepelné zatěžování mělo významný vliv na termofyzikální vlastnosti.

2.13.1 HEC – BaM

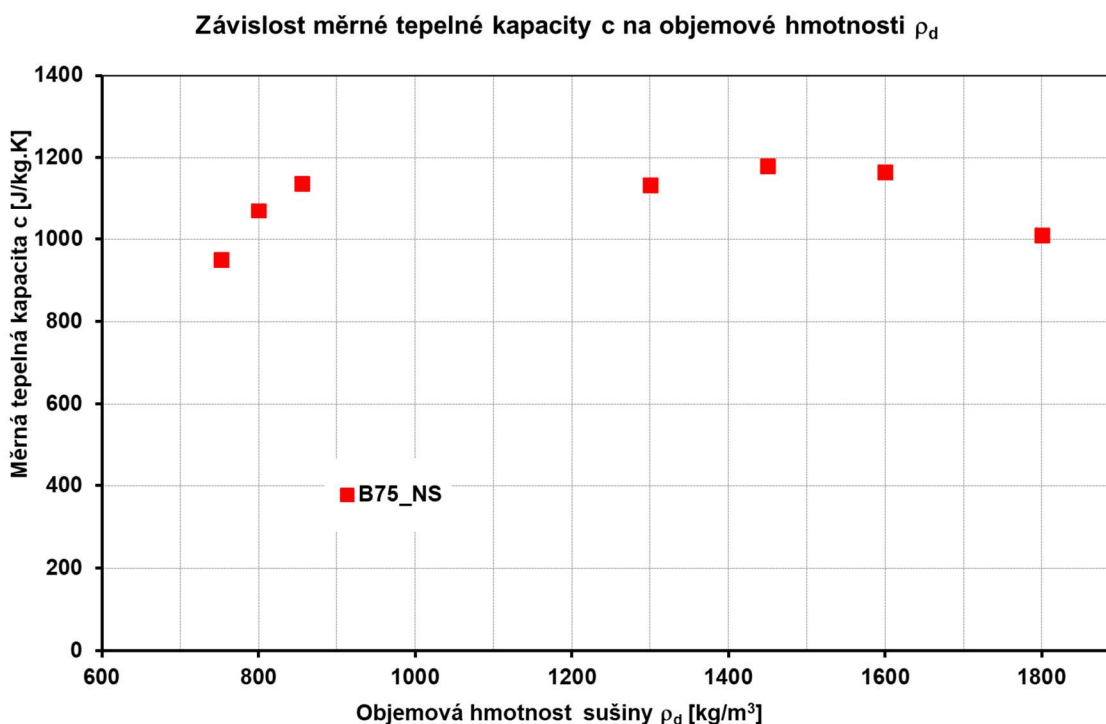
Pro bentonit BaM nebyla určena tepelná kapacita pro žádnou z forem bentonitu.

2.13.2 HEC – B75

Stanovení tepelné vodivosti bentonitu B75 bylo součástí projektu FR-TI1/362, výsledky jsou prezentovány v technické zprávě k projektu (Vašíček et al. 2013). V tomto projektu byl bentonit zatěžován teplotou 95 °C ve formě suspenze a v suchém stavu. Měření bylo provedeno jen na B75_NS a výsledky jsou ve zprávě uvedeny v grafické podobě a data byla poskytnuta autory zpráv. Testování B75 bylo také součástí projektu DOPAS (Vašíček et al. 2016).

Na ovlivněném bentonitu měrná tepelná kapacita měřena nebyla.

Graf na Obr. 207 obsahuje data měřená na neovlivněném bentonitu B75 o vlhkosti $w = 7\%$



Obr. 207 Měrná tepelná kapacita neovlivněného bentonitu B75 (B75_NS) o vlhkosti $w = 7\%$.

2.13.3 HEC – Rokle

Žádná dostupná data vhodná pro statistické vyhodnocení.

2.13.4 HEC – BCV

Žádná dostupná data vhodná pro statistické vyhodnocení.

2.13.5 HEC - Stránce

Žádná dostupná data vhodná pro statistické vyhodnocení.

2.13.6 HEC - Zelený jíl

Žádná dostupná data vhodná pro statistické vyhodnocení.

2.13.7 Metodické a statistické zhodnocení

Měrná tepelná kapacita je jednou z charakteristik bentonitu. Jedná se o třírozměrná data, z tohoto důvodu je obtížné vyhodnotit, zda jsou případné změny způsobené vlivem ovlivnění, nebo variability vstupních parametrů. Nepředpokládá se, že by docházelo k významným změnám tepelné kapacity vlivem tepelného zatížení bentonitu.

Dostupná jsou pouze data měřená na neovlivněném bentonitu B75.

2.14 Mikrobiologické zhodnocení

Jak je patrné ze sumární tabulky (Příloha 0A), překryv mezi mikrobiologickými a jinými analýzami aplikovanými na studovaných vzorcích je naprosto minimální a s aktuálním množstvím dat tedy není možné říct o vlivu mikroorganismů na stabilitu bentonitu téměř nic. Pro zodpovězení otázky vlivu mikrobiální aktivity na stabilitu bentonitu je totiž nezbytné kombinovat mikrobiologické analýzy s celou řadou mineralogických, geotechnických a geochemických analýz, které mohou odhalit případné změny ve vlastnostech bentonitu po mikrobiální zátěži. Podrobněji se této problematice budeme věnovat v navazující zprávě (632/2022). Existující data jsou proto použitelná pouze pro vyhodnocení obecné míry mikrobiální aktivity v různých typech bentonitů za různých podmínek prostředí, což však s případnými mikrobiálními vlivy na bentonit úzce souvisí. Při environmentálních podmínkách umožňujících nárůst mikrobiální aktivity lze očekávat též větší riziko potenciálního negativního efektu na samotný bentonit a vice versa. Pochopení chování a vývoje mikrobiálního osídlení za různých podmínek prostředí může napomoci odhadu rozvoje mikrobiálního osídlení v budoucím HÚ RAO, což se může následně promítnout v návrhu konceptu úložiště tak, aby k nechtěným mikrobiálním vlivům (na stabilitu bentonitu či korozi ÚOS) docházelo pouze minimálně či vůbec.

V kapitolách níže je vyhodnocena mikrobiální aktivita v závislosti na typu bentonitu, stavu vzorku (vstupní nezatížený vzorek-VSTUP, inkubovaný vzorek-INKUBACE či vzorek zatěžovaný-LIMITY) a podmínkách prostředí. Data pro jednotlivé kategorie jsou v plné šíři (včetně referencí, experimentálních podmínek a výsledných analýz) uvedena v Příloze 14-17, pro účely psaní zprávy byly nejdůležitější informace shrnuté do tabulek vložených přímo do textu.

2.14.1 BCV

VSTUP

U bentonitu BCV dosud nebyl analyzován žádný vzorek bentonitového prášku za účelem vstupní charakterizace tohoto materiálu (Tab. 17). Bylo však analyzováno celkem 19 vzorků neinkubovaných bentonitových suspenzí (zpravidla o poměru pevné fáze 1:4,5 (w/w), které představovaly vstupní vzorky pro různé mikrobiologické experimenty a jež by svým složením měly odpovídat vstupnímu materiálu. U suspenzí byly ve všech případech provedeny genetické analýzy (MB1, MB2_qPCR a MB3_NGS), kultivační přístupy byly aplikovány pouze ve dvou případech.

Tab. 17 18 Počet vzorků a analýz provedených na vstupních podvzorcích bentonitu BCV.

BCV	Počet podvzorků	MB1	MB2_K	MB2_MPN	MB2_qPCR	MB3_NGS	Mikroorganismy detekovány	Mikrobiální aktivita	SRB kultivace pozitivní	NRB kultivace pozitivní	IRB kultivace pozitivní	
Prášek	N.A.											
Suspenze	19	19	2/19	N.A.	19	19	15x pozadí/4x <i>Pseudomonas</i> , <i>Bacillus</i> , <i>Ralstonia</i> , KD4-92	6/19	4?/19	2/2	2/2	1/1

Výsledky provedených analýz (zdrojová data a podrobné výsledky viz Příloha 14) ukazují, že detekovaná mikrobiální aktivita ve vstupních suspenzích je skutečně minimální. Mikroorganismy byly detekovány pouze u šesti vzorků a potenciální mikrobiální aktivita pouze u čtyř z nich (Tab. 17). NGS analýza ukázala ve většině případů signál shodný se signálem pozadí, což je běžné u vzorků s velice nízkým obsahem DNA, a také v pouhých dvou případech uvedené hodnoty Cq ukazují na velmi nízkou míru mikrobiální aktivity (Cq = 25,68 a 26,5). Pouze u dvou sad nulových vzorků k tlakovým experimentům (0w(15MPa-con) a 0w(12MPa-con), Příloha 14) byl detekován pravděpodobný mírný rozvoj mikrobiální aktivity a v NGS analýze byly ve zvýšené míře detekované NRB rody *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Ralstonia* či taxon KD4-92. Toto je možné přičíst delšímu času nezbytnému pro přípravu a zpracování vstupních vzorků pro tento typ experimentu, podrobněji viz (Černá et al. 2022). Výsledky provedených analýz tedy ukazují, že vzorky suspenzí je možné použít pro vstupní charakterizace, nicméně je nezbytné minimalizovat čas jejich kontaktu s vodou. Získaná data dále ukazují, že u vstupních vzorků s velice nízkým obsahem DNA je velice obtížné odlišit genetický signál specifický pro bentonit od signálu pozadí a na zodpovězení této otázky by bylo třeba cílených analýz na větším počtu vzorků a případně následně data analyzovat pomocí sofistikovaných bioinformatických analýz k odlišení signálu a pozadí.

INKUBACE

U bentonitu BCV byly podvzorky u bentonitových suspenzí rozděleny a analyzovány dle typu inkubací (testování různých prostředí a obsahu pevné fáze), v případě kompaktních bentonitů byl testován vliv přísady živin (viz souhrn v Tab. 19 a Příloze 14). V principu se tedy jedná o analýzu směsných vzorků z různých experimentů vystavené podobným inkubačním podmínkám. V případě všech testovaných inkubačních podmínek byl u bentonitové suspenze i kompaktního bentonitu pozorován nárůst relativní početnosti mikroorganismů v čase, a tedy rozvoj mikrobiální aktivity.

V případě suspenzí jsou data o početnosti mikroorganismů (MB2_qPCR) získaná pro tvorbu databáze vyjádřena pouze na relativní škále (vztaženo zpravidla k počátečnímu vzorku v době zahájení experimentu) a navíc se jedná o data získaná z několika nezávislých experimentů, což velmi omezuje porovnatelnost mezi daty z různých experimentů. Přesto lze z nashromážděných dat s jistou mírou opatrnosti (a se znalostí podobnosti vstupních vzorků popsané v části VSTUP výše) usuzovat alespoň na základní trendy rozvoje mikrobiální aktivity. V aerobních podmínkách docházelo k výrazně nižším relativním nárůstům mikrobiální abundance než v případě podmínek anaerobních. V aerobních podmínkách byly detekované 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 k nejvyšším nárůstům relativní abundance za přidavku H_2 či práškového železa (podrobně viz Příloha 14), jež oba slouží mikroorganismům jako donory elektronů pro energetický metabolismus. V anaerobních podmínkách dominovaly různé druhy NRB jako je *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Noviherbaspirillum*, *Massilia*, čeleď *Symbiobacteraceae* či IRB (*Thermincola*) či zástupci metabolicky versatilní čeledi *Peptococcaceae*, kam patří kromě rodu *Thermincola* též různí zástupci SRB (Stackebrandt 2014). U všech typů anaerobních inkubací byl detekován nárůst relativní abundance obligátně anaerobních IRB či SRB (Tab. 19 a Příloha 14).

Tab. 19 Počet podvzorků a vyhodnocení analýz provedených na inkubovaných podvzorcích bentonitu BCV. Šedě jsou vyznačené rozdíly v inkubačních podmínkách mezi jednotlivými sadami podvzorků.

	Počet podvzorků	Typ vzorku	Atmosféra	Teplota, °C	Doba inkubace, d	Přídavek živin	Typ izolace DNA	přítomnost živých buněk	použití médium (+pozitivní/ negativní)	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	
Suspenze - různé podmínky prostředí	22	suspenze 1:5	aerobní	lab	0-133	ne	EKK	N.A.	N.A.	nárůst	nárůst	nárůst	stagnace	N.D.	Lysobacter, Phenylbacterium; Oxalobacterium; Noviherbaspirillum; Symbiobacteraceae	ano	ano	ne	ano	ano	ano	ne
	40	suspenze 1:5	anaerobní	lab	14-133	H2	EKK	ano	SBM+ PGM+	nárůst	nárůst	nárůst	nárůst	N.A.	Noviherbaspirillum; Peptococcaceae, Bacillus, Thermicola; Paenibacillus, Pseudomonas	ano	ano	ano/ano	ano/ano	ano	ano	
	26	suspenze 1:5	anaerobní	lab	28-140	ne	EKK	ano	N.A.	nárůst	nárůst	nárůst	nárůst	stagnace	Noviherbaspirillum; Anaerobacillus; Peptococcaceae; Thermicola; Pseudomonas; Symbiobacteraceae, Bacillus	ano	ano	ano	ano	ano	ne	
	16	suspenze 1:5	anaerobní	lab	0-140	práškové Fe	EKK	N.A.	N.A.	nárůst	nárůst	nárůst	nárůst	nárůst	Peptococcaceae, Thermicola; Noviherbaspirillum; Anaerobacillus, Symbiobacteraceae	ano	ano	ano	ano	ano	ano	
	10	suspenze 1:5	anaerobní	lab	39-49	ne+H2	EKK	ano	N.A.	nárůst	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	Pseudomonas, Bacillus, Oxalobacteraceae; Anaerobacillus, Massilia	ano	ano	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	
Suspenze poměr pevné fáze 1:1 - 1:5	5	suspenze 1:1-1:5	anaerobní	lab	48	H2	EKK	ano	N.A.	nárůst s menším zastoupením pevné fáze	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	uncultured, Desulfosporosinus, Salipaludibacillus (1:1); Symbiobacteraceae, Thermicola, 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	anaerobní	lab	84	H2	EKK	ano	N.A.	nárůst s menším zastoupením pevné fáze	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	Symbiobacteraceae, Desulfosporosinus, uncultured (1:1); Symbiobacteraceae, Thermicola, Oxalobacteraceae, Sporomusa (1:5)	ano	ano	pokles s menším zastoupením pevné fáze	N.A.	N.A.	N.A.	
KB-živiny	2	KB 1200 kg/m ³	anaerobní	lab	30-90	ne	EKK	N.A.	N.A.	Cq = 20-25	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/m ³	anaerobní	lab	30-90	práškové Fe	EKK	N.A.	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/m ³	anaerobní	lab	30-90	ex - MgSO4	EKK	N.A.	N.A.	Cq = 20-25	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	Streptomyces, Micromonospora, Desulfosporosinus, Paenibacillus; KD4-92	ano	ano	ano?	N.A.	N.A.	N.A.	
	2	KB 1200 kg/m ³	anaerobní	lab	30-90	ex - Mg-acetát	EKK	N.A.	N.A.	Cq = 20-25	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	Streptomyces, Micromonospora, Paenibacillus; Desulfosporosinus, KD4-92, Bacillus	ano	ano	ano?	N.A.	N.A.	N.A.	
	2	KB 1200 kg/m ³	anaerobní	lab	30-90	ex - Mg-acetát+MgSO4	EKK	N.A.	N.A.	Cq = 20-25	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	Streptomyces, Micromonospora KD4-92; Desulfosporosinus	ano	ano	ano?	N.A.	N.A.	N.A.	
	2	KB 1200 kg/m ³	anaerobní	lab	30-90	ex - PGM	EKK	N.A.	N.A.	Cq = 20-25	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	Desulfosporosinus, Sedimentibacter, Clostridium, Sporacetogenium, Micromonospora	ano	ano	ano	N.A.	N.A.	N.A.	
	2	KB 1200 kg/m ³	anaerobní	lab	30-90	in - MgSO4+Mg-acetát	EKK	N.A.	N.A.	Cq = 20-25	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	Micromonospora; KD4-92, Streptomyces	ano	ano	ne	N.A.	N.A.	N.A.	
	2	KB 1200 kg/m ³	anaerobní	lab	30-90	H2	EKK	N.A.	N.A.	Cq = 20-25	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	Streptomyces, Alkalibacter, Desulfosporosinus, Micromonospora; KD4-92; Ralstonia	ano	ano	ano?	N.A.	N.A.	N.A.	

V případě vzorků inkubovaných za různého poměru pevné fáze byly v obou časových intervalech (48 a 84 dnů) pozorované shodné trendy, a to rozvoj mikrobiální abundance s klesajícím zastoupením pevné fáze a zároveň nárůst relativní abundance SRB se zvyšujícím se zastoupením pevné fáze (Tab. 19, Příloha 14). Pravděpodobným vysvětlením tohoto vývoje je rozdíl v životním prostoru a koncentraci živin v závislosti na poměru pevné fáze, údaje o koncentracích živin v těchto vzorcích však nejsou známy (Černá et al. 2022).

Také v případě inkubace kompaktních bentonitů o jednotné suché objemové hmotnosti 1200 kg/m³ došlo ve všech případech k rozvoji mikrobiální aktivity v čase (Tab. 19). 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). Přesnější informace o rozdílech v relativní početnosti mezi podvzorky tedy nejsou známy. Detekované mikrobiální složení odráželo inkubační podmínky (Tab. 19). U podvzorků obsahujících práškové železo či inkubovaných v PGM médiu došlo k dominantnímu rozvoji SRB rodu *Desulfosporosinus*. Tento rod byl detekovaný mezi nejhojnějšími rody také ve většině ostatních podvzorků kompaktních bentonitů, ale s nižším zastoupením. Mezi hojně další druhy detekované ve většině podvzorků kompaktních bentonitů patří dále běžné bentonitové NRB rody *Streptomyces*, *Micromonospora*, *Paenibacillus* či blíže nespecifikovaný taxon KD4-92. Rozvoj mikrobiálního složení v kompaktním bentonitu je odlišný od složení detekovaného

v suspenzích, a to opět pravděpodobně odráží fakt rozdílného chemického složení pórového roztoku a s tím spojený rozdíl v dostupnosti živin. Vyřešení této otázky je jedním z cílů probíhajícího projektu TAČR BioBen. Výsledky z kompakovaných bentonitů a podvzorků s rozdílnými poměry pevné fáze by bylo vhodné doplnit o analýzu relativní kvantifikace pro jednotlivé metabolické skupiny bakterií. Z výsledků dále plyne, že kompaktizace bentonitu na objemovou hmotnost 1200 kg/m^3 nelimituje rozvoj mikrobiální aktivity a při vhodných podmínkách prostředí zde může docházet k rozvoji celé řady přirozených mikroorganismů včetně SRB. Výsledky inkubačních experimentů dále naznačují, že rozvoj aktivity SRB je v prostředí kompakovaného bentonitu pravděpodobnější než v případě suspenze. V dalším kroku bude nezbytné ověřit vliv různých objemových hmotností na proliferaci přirozených SRB v bentonitu BCV. Experimenty zabývající se touto otázkou aktuálně probíhají jako součást projektu TAČR BioBen.

LIMITY

Pro účely studia faktorů limitujících mikrobiální aktivitu v prostředí BCV bentonitu byly faktory rozdělené do dvou skupin – faktory limitující mikrobiální aktivitu a podmínky za kterých dojde k úplné sterilizaci. V prvním případě se jedná o reálné vlivy, které lze očekávat v prostředí HÚ RAO (jako je teplota, záření, kompaktizace, vysoušení atd.) a u kterých lze očekávat negativní vliv na mikrobiální aktivitu (ne však nutně životaschopnost a schopnost regenerace ze spor). Naopak v případě sterilizačních postupů je pak hlavním cílem ukázat postupy, které vedou k prokazatelné sterilizaci vzorku, tedy zabraňující též znovuoživení bentonitu ze spor po skončení zátěže. Zatímco v kapitolách VSTUP a INKUBACE výše se při analýzách jednalo o směsné vzorky z různých experimentů vystavené podobným inkubačním podmínkám, v případě kapitoly LIMITY se z většinou jedná o popis výsledků dílčích experimentů s cílem ověřit vliv konkrétního faktoru a interpretace dat je proto snadnější než v předchozích případech.

a) Limitní faktory

V případě bentonitu BCV byly v prostředí bentonitových suspenzí vyhodnoceny tři základní limitující faktory - vliv teploty, externího tlaku a vysoušení. Kompaktované bentonity testované dosud nebyly, ale testování vlivu teploty, suché objemové hmotnosti, saturace vodou a záření u kompakovaných vzorků BCV probíhá aktuálně v rámci projektu TAČR BioBen.

V případě zahřívání byly bentonitové suspenze anaerobně vystavené teplotám $60-90 \text{ }^\circ\text{C}$ 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. 2022). Při porovnání relativních abundancí zahříváných podvzorků s kontrolními nezahřívánými podvzorky (viz Příloha 14) 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 zahříváných na $60-70 \text{ }^\circ\text{C}$ byla detekovaná mikrobiální aktivita v zahříváných vzorcích a byly zde nalezeny termofilní bakterie jako je *Caldinitratoruptor* (Fardeau et al. 2010) či *Thermolithobacter* (Sokolova et al. 2007), u vzorků zahříváných na $80 \text{ }^\circ\text{C}$ již mikrobiální aktivita detekována nebyla. Po inkubaci vzorků zahříváných na $60-80 \text{ }^\circ\text{C}$ však došlo v laboratorní teplotě k opětovnému nárůstu mikrobiální aktivity, a to především IRB rodem *Thermincola* spolu se zmíněnými termofilními bakteriemi (Tab. 20). U vzorků vystavených $90 \text{ }^\circ\text{C}$ nebyla pozorována mikrobiální aktivita v zahříváných vzorcích

ani po regeneraci (Tab. 20). 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.

V podobném experimentálním uspořádání (4 týdny zátěž + 2 týdny regenerace bez zátěže v anaerobních podmínkách) byly provedeny též experimenty s externím tlakem o výši 10 - 15 MPa (Černá et al. 2022, Tab. 20). V ani jednom případě nebyl pozorován pokles mikrobiální aktivity ve srovnání s netlakovanými kontrolami, relativní početnosti i detekované mikrobiální složení se mezi vzorky nelišily. Výsledky tedy naznačují, že tlak do výše 15 MPa nepředstavuje limitní faktor pro mikrobiální aktivitu v bentonitové suspenzi.

Tab. 20 Počet podvzorků a vyhodnocení analýz provedených na zatěžovaných vzorcích bentonitu BCV.

Typ zátěže	Počet podvzorků	Popis vzorku	Podmínky inkubace				MB2_EB	MB2_qPCR	MB3_NGS		Analýza	
			atmosféra	doba inkubace, d	přídavek živin (vypsat)	teplota, °C	přítomnost živých buněk	16S rRNA RQ	max 5 nejčtenějších rodů	Mikroorganismy detekovány	Mikrobiální aktivita	Limitní hodnota nutná pro potlačení MB aktivity
Zahřívání	2	susp1:5_4w(T60)	anaerobní	28	ne	60	ano	1-10	Caldinitratiruptor	ano	ano	teplota >80°C limituje MB aktivitu, teplota >90°C i životaschopnost
	2	susp1:5_4w(T70)	anaerobní	28	ne	70	ano	1-10	Class TTA.B61, Thermolithobacter	ano	ano	
	2	susp1:5_4w(T80)	anaerobní	28	ne	80	N.A.	1	pozadí	ano	ne?	
	2	susp1:5_4w(T90)	anaerobní	28	ne	90	ne?	0,1-0,01	N.D.	ne	ne	
	2	susp1:5_4w(T90)-TUL	anaerobní	28	ne	90	ne	0,1-0,01	N.D.	ne	ne	
	2	susp1:5_4+2w(T60+lab)	anaerobní	42	ne	60	ano	10-100	Thermincola; Caldinitratiruptor	ano	ano	
	2	susp1:5_4+2w(T70+lab)	anaerobní	42	ne	70	N.A.	10-100	Thermincola; Class TTA.B61, Desulfofundulus	ano	ano	
	2	susp1:5_4+2w(T80+lab)	anaerobní	42	ne	80	N.A.	10-100	Thermincola; Bacillaceae	ano	ano	
	2	susp1:5_4+2w(T90+lab)	anaerobní	42	ne	90	ano(kont)	0,1-0,01	N.D.	ne	ne	
	2	susp1:5_4+3w(T90+lab)-TUL	anaerobní	49	H2	90	ano(kont)	0,1-0,01	N.D.	ne	ne	
Externí tlak	2	susp1:5_4w(10MPa)	anaerobní	28	ne	lab	ano	100	Noviherbaspirillum; Symbiobacteraceae; Anaerobacillus; Bacillus	ano	ano	externí tlak bez efektu, signál se neliší od kontrolních vzorků
	2	susp1:5_4+2w(10MPa+lab)	anaerobní	42	H2	lab	ano	1-10	Noviherbaspirillum; Symbiobacteraceae; Pseudomonas; Thermincola	ano	ano	
	2	susp1:5_4w_(10MPa_kon)	anaerobní	28	ne	lab	ano	40	Noviherbaspirillum; Symbiobacteraceae; Anaerobacillus; Bacillus	ano	ano	
	2	susp1:5_4+2w_(10MPa_kon)	anaerobní	42	H2	lab	ano	1-10	Noviherbaspirillum; Symbiobacteraceae; Anaerobacillus; Bacillus, Cupriavidus	ano	ano	
	2	susp1:5_4w(12MPa)	anaerobní	28	ne	lab	ano	1000-10000	Pseudomonas, Bacillus, Oxalobacteraceae; Rhodocyclaceae	ano	ano	
	2	susp1:5_4+3w(12MPa+lab)	anaerobní	49	H2	lab	ano	100-1000	Pseudomonas, Bacillus, Oxalobacteraceae; Rhodocyclaceae	ano	ano	
	2	susp1:5_4w(12MPa-con)	anaerobní	28	ne	lab	ano	1000-10000	Pseudomonas, Bacillus, Ralstonia, Massilia	ano	ano	
	2	susp1:5_4+3w(12MPa-con)	anaerobní	49	H2	lab	ano	100-1000	Pseudomonas, Bacillus, Ralstonia, Massilia	ano	ano	
	2	susp1:5_4w(15MPa)	anaerobní	28	ne	lab	ano	10-100	Pseudomonas, Bacillus, Oxalobacteraceae; Rhodocyclaceae	ano	ano	
	2	susp1:5_4+2w(15MPa+lab)	anaerobní	42	H2	lab	ano	100-1000	Rhodocyclaceae; Pseudomonas, Bacillus, Oxalobacteraceae	ano	ano	
	2	susp1:5_4w(15MPa-con)	anaerobní	28	ne	lab	ano	10-100	Pseudomonas, Bacillus, Oxalobacteraceae; Anaerobacillus	ano	ano	
	2	susp1:5_4+2w(15MPa-con)	anaerobní	42	H2	lab	ano	10-100	Pseudomonas, Bacillus, Oxalobacteraceae; Lysobacter	ano	ano	
Vysoušení	2	susp1:5_4w	anaerobní	28	H2	lab	N.A.	1	Noviherbaspirillum; Peptococcaceae, Sporomusa; Symbiobacterium; Thermincola	ano	ano	vysoušení snižuje mikrobiální aktivitu, ale nesnižuje schopnost přežívání ani nemění mikrobiální složení
	2	susp1:5_4w-dry	anaerobní	28	ne	lab	N.A.	0,01	Noviherbaspirillum; Peptococcaceae, Sporomusa; Symbiobacterium; Thermincola	ano	ne	
	2	susp1:5_4w-resuspended_3d	anaerobní	28	ne	lab	N.A.	0,1	Noviherbaspirillum; Peptococcaceae, Sporomusa; Symbiobacterium; Thermincola	ano	ano	
	2	susp1:5_8w	anaerobní	56	H2	lab	N.A.	1	Noviherbaspirillum; Peptococcaceae, Thermincola; Sporomusa; Symbiobacterium	ano	ano	
	2	susp1:5_8w-dry	anaerobní	56	ne	lab	N.A.	0,01	Noviherbaspirillum; Peptococcaceae, Thermincola; Sporomusa; Symbiobacterium	ano	ne	
	2	susp1:5_8w-resuspended_3d	anaerobní	56	ne	lab	N.A.	0,1	Noviherbaspirillum; Peptococcaceae, Thermincola; Sporomusa; Symbiobacterium	ano	ano	

Posledním studovaným faktorem byl vliv vysoušení, kdy bylo porovnáno mikrobiální složení a abundance u suspenzí starých 4 a 8 týdnů, vysušeného prášku z těchto suspenzí a u znovuresuspendovaného vzorku po 3-7 dnech inkubace (Černá et al. 2022). Zjištěné mikrobiální složení bylo ve všech případech podobné a po poklesu relativní početnosti mikroorganismů vlivem vysoušení došlo k opětovnému nárůstu (Tab. 20). Z výsledků je tedy možné usoudit, že vysoušení bentonitu bude limitovat mikrobiální aktivitu, ale po jeho opětovném zavodnění se dá předpokládat znovuoobnovení mikrobiální aktivity.

b) Sterilizační postupy

Za účelem sterilizace byly dosud otestovány tři různé metody - sterilizace pomocí ionizujícího záření (0-140 kGy), opakovaných cyklů zahřívání na 120 °C a dlouhodobého vystavení vysokým teplotám (150 °C). První dva typy sterilizace byly testovány na prášku i suspenzi, poslední jen na bentonitovém prášku. 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. 2021; Černá et al. 2022).

V případě ozařování prášku byly suspendované vzorky po zátěži inkubované po dobu 14 a 28 dnů a vzorky byly analyzovány pouze geneticky. V obou případech byl pozorován graduální pokles relativní abundance s aplikovanou dávkou (Tab. 21, podrobněji Příloha 14). 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 (Příloha 14). 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 byly vzorky analyzované hned po ozáření a dále po 14denní inkubaci. Na rozdíl od prášku byla při vyhodnocení inkubovaných vzorků provedena kromě genetických metod i extrakce buněk (MB2_EB), výsledky však byly pravděpodobně ovlivněny 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 (viz Příloha 14) a na základě shrnutí výsledků byla stanovena dávka záření nutná pro sterilizaci suspenze v rozmezí 27-70 kGy. Získaná data tak naznačují mírně nižší radiční 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).

Tab. 21 Počet podvzorků a vyhodnocení analýz provedených na zatěžovaných vzorcích bentonitu BCV - testy sterilizačních postupů.

Typ zátěže	Počet podvzorků	Popis vzorku	Podmínky inkubace					MB2_EB	MB2_K	MB2_qPCR	MB3_NGS	Analýza					
			atmosféra	dobu inkubace, d	přídavek živin (vypsat)	teplota, °C	přítomnost živých buněk					SRB, NRB, IRB	16S rRNA RQ	16S rRNA Cq	max 5 nejčtenějších rodů	mikroorganismy detekovány	mikrobiální aktivita
Ozařování prášku (0-140 kGy)	12	prášek_0-140kGy_2w inkubace	anaerobní	14	H2	lab	N.A.	N.A.	graduální pokles s dávkou	N.A.	Noviherbaspirillum; Bacillus, Thermicola, 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.	N.A.	graduální pokles s dávkou	N.A.	Noviherbaspirillum; Bacillus, Thermicola, Paenibacillus(0kGy)/N.D.(140kGy)	do 100 kGy	do 10 kGy	N.A.	N.A.	N.A.	
Ozařování suspenze (0-140 kGy)	12	susp 1:5_25d 0-140kGy	anaerobní	25+0	H2	lab	ano 0-140kGy(kontaminace?)	N.A.	graduální pokles s dávkou	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?)	N.A.	graduální pokles s dávkou	N.A.	Masilia, Pseudomonas, Anaerobacillus, Lactobacillus(0kGy)/Anaerosolibacter, pozadí(140kGy)	do 27 kGy?	do 27 kGy	N.A.	N.A.	N.A.	
Dlouhodobé teplotní zatěžování (150°C)	8	susp 1:5_0.5_y	anaerobní	0-28	H2	lab	N.A.	N.A.	nárůst s délkou inkubace	N.A.	Bacillus; Thermicola; Symbiobacteraceae	ano	ano	N.A.	N.A.	N.A.	>1y 150°C
	8	susp 1:5_1.0_y	anaerobní	0-28	H2	lab	N.A.	N.A.	nárůst s délkou inkubace	N.A.	Thermicola	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; Thermicola	ano	ano	N.A.	N.A.	N.A.	
Teplotní sterilizace prášku (1-9x sterilizace 120°C)	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, Thermicola (1-9x)	ano	ano	N.A.	N.A.	N.A.	
Teplotní sterilizace suspenze (1-9x sterilizace 120°C)	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.	

Bentonitový prášek vystavený teplotě 150 °C 6 měsíců a 12 měsíců v rámci projektu EURAD HITEC byl následně inkubován 14denní a 28denní v anaerobních podmínkách za účelem detekce schopnosti mikroorganismů přežít extrémní podmínky časně 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 sterilní. U teplotně zatěžovaných vzorků byl v případě 6 měsíční zátěže zjištěn nárůst rodů *Bacillus*, *Thermicola* a zástupců čeledi *Symbiobacteraceae*, v případě 12 měsíční zátěže pak rod *Thermicola*.

Poslední ze studovaných možností byla sterilizace opakovaným vystavením suspenze a prášku teplotě 120 °C po dobu několika hodin (Černá et al. 2022). Genetickými metodami byl studován nárůst mikrobiální aktivity u inkubovaných vzorků sterilizovaných 1 - 9x, u všech sterilizovaných vzorků byly provedeny též kultivace a extrakce buněk za účelem stanovit kultivovatelnost a detekovat přítomné živé buňky v suspenzích.

V případě bentonitového prášku byla zjištěna přítomnost kultivovatelných buněk i po 9 cyklech sterilizace a podobně byl detekován nárůst mikrobiální aktivity i v 6x sterilizovaných a suspendovaných vzorcích po 30 dnech inkubace v anaerobních podmínkách (9x sterilizované vzorky nebyly dosud analyzovány), viz Tab. 21 a Příloha 14. 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. 21). Rozdíl v obsahu vody mezi suspenzí a práškem tedy vyznaným způsobem ovlivňuje teplotní odolnost přirozených bentonitových mikroorganismů.

2.14.2 Rokle

VSTUP

V případě bentonitu Rokle byla provedena pouze jediná analýza vstupního materiálu ve formě prášku a nebyla provedena žádná analýza na suspenzích (Svensson *et al.* 2011).

Tab. 22 Počet vzorků a analýz provedených na vstupních podvzorcích bentonitu Rokle.

Rokle	Počet vzorků	MB1	MB2_K	MB2_MPN	MB2_qPCR	MB3_NGS	Mikroorganismy detekovány	Mikrobiální aktivita	SRB kultivace pozitivní	CHAB kultivace pozitivní	IRB kultivace pozitivní	AA kultivace pozitivní
Prášek	1	N.A.	1	1	N.A	N.A	1	N.A.	1	1	1	1

U studovaných podvzorků byly aplikovány pouze kultivační přístupy a genetická data (a tudíž přesnější složení mikroorganismů v tomto typu bentonitu) nejsou známa. Ve vstupním materiálu byly detekovány bakterie náležící mezi SRB, IRB, aerobní heterotrofy (CHAB) a v malém množství také anaerobní acetogeny (AA) (Tab. 22) **Error! Reference source not found.**

INKUBACE

V případě bentonitu Rokle existují pouze jediná publikovaná data o inkubacích vstupního prášku v různých kultivačních médiích specifických pro SRB, IRB či AA ze dvou různých teplot (Svensson *et al.* 2011). Jedná se tedy v podstatě o doplněk kultivačních analýz diskutovaných výše s tím rozdílem, že na závěr byl analyzován nárůst produktů metabolismu (Cu^{35}S či acetátu) a tedy rozvoj mikrobiální aktivity. Nárůst metabolické aktivity SRB byl zjištěn pouze v případě zahřívání vzorků, a to v médiu s přidavkem laktátu či H_2 . Metabolická aktivita acetogenů byla detekována v médiu s přidavkem H_2 v obou teplotách a v menší míře také v SRB médiu bez přidavku dalších donorů elektronů (Tab. 23). Genetická data ukazující složení kultivovaných vzorků nejsou známa.

Tab. 23 Počet vzorků a vyhodnocení analýz provedených na inkubovaných podvzorcích bentonitu Rokle.

Rokle	Počet vzorků	Typ vzorku	Podmínky inkubace				MB2_K použité médiu(-pozitivní/ negativní)	MB4_S CFU/g	MB4_ACE detekce produkce Cu^{35}S	detekce produkce acetátu (mg/l)	Vyhodnocení					
			Atmosféra	Teplota, °C	Doba inkubace, d	Přídavek živin					Mikroorganismy detekovány	Mikrobiální aktivita	SRB aktivita/kultivovatelnost	NRB aktivita/kultivovatelnost	IRB aktivita/kultivovatelnost	AA aktivita/kultivovatelnost
Přídavek médiu	1	prášek anaerobní	20	21	SRB médium s laktátem	SRB	N.A.	N.D.	N.D.	ne?	ne?	ne	N.A.	N.A.	N.A.	
		prášek anaerobní	20	21	SRB médium s H_2	AA	N.A.	N.D.	<10-30x nárůst	ano?	ano?	ne	N.A.	N.A.	ano/ano	
		prášek anaerobní	20	21	SRB médium bez přídavku	IRB	N.A.	N.D.	5x nárůst	ano?	ano?	ne	N.A.	N.A.	ano?/ano?	
		prášek anaerobní	50	21	SRB médium s laktátem	SRB	N.A.	5-10x nárůst	N.D.	ano	ano	ano/ano	N.A.	N.A.	N.A.	
		prášek anaerobní	50	21	SRB médium s H_2	AA	N.A.	5x nárůst	50-120x nárůst	ano	ano	ano/ano	N.A.	N.A.	ano/ano	

LIMITY

U bentonitu Rokle proběhlo testování dvou typů zátěže, a to kompaktizace a dále kompaktizace ve spojení se zvýšenou teplotou. Nebyly provedené žádné experimenty s bentonitovou suspenzí.

Při testování vlivu kompaktizace byla použita směsná kultura SRB (viz Příloha 15) za účelem stanovení vlhké objemové hmotnosti pro inhibici metabolické aktivity SRB. Byly testovány vlhké objemové hmotnosti 1750-1950 kg/m³, přičemž reálné objemové hmotnosti byly nižší (1670-1940 kg/m³) (Bengtsson *et al.* 2017). Kromě MPN kulturační analýzy (MB2_MPNI) byla pro detekci metabolické aktivity SRB použita také metoda detekce mikrobiální produkce sulfanu (MB4_S) a acetátu (MB4-ACE), viz Tab. 24. Kompaktované vzorky byly inkubovány 33-78 dnů.

MPN analýza ukázala přítomnost kultivovatelných SRB ve všech studovaných vzorcích a nebyl tedy pozorován pokles kultivovatelnosti se vzrůstající objemovou hmotností. Na druhou stranu, metabolická aktivita SRB byla detekovaná pouze v jednom případě u vzorku s objemovou hmotností 1670 kg/m³ a nikoli u vzorku s objemovou hmotností 1692 kg/m³ a toto rozmezí hodnot bylo tedy interpretované jako hraniční pro rozvoj aktivity SRB (Tab. 24).

Tab. 24 Počet vzorků a vyhodnocení analýz provedených na zatěžovaných podvzorcích bentonitu Rokle.

Typ zátěže	Počet vzorků	Popis vzorku	Atmosféra	Teplota, °C	Podmínky inkubace			MB2 K			MB2 MPNI	MB4 S	MB4 ACE	Analýza					Limitní hodnota nutná pro potlačení MB aktivity		
					Doba inkubace (d.m)	Přídavek kultur	Přídavek živin	SOB, FeOB (CFU/g)	SRB (CFU/g)	heterotrofové (CFU/g)	KBq	umol/gdw	Mikroorganismy detekovány	Mikrobiální aktivita	SRB aktivita kultivovatelnosti	NRB aktivita kultivovatelnosti	IRB aktivita kultivovatelnosti	AA aktivita kultivovatelnosti			
Kompaktizace	1	1676 kg/m ³ ww	anaerobní	N.S.	78d	ne	35SO42-, laktát	N.A.	N.A.	N.A.	0,1-1 x 10 ⁻⁶	0,41	7,2	ano	ne?	ne/ano	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	objemová hmotnost 1670-1692 kg/m ³ (SRB)
	2	1670-1692 kg/m ³ ww	anaerobní	N.S.	33-78d	SRB	35SO42-, laktát	N.A.	N.A.	N.A.	0,1-10 x 10 ⁻⁶	0,05/577	4,38/11,7	ano	ano	ano/ano	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	
	2	1830-1838 kg/m ³ ww	anaerobní	N.S.	33-78d	SRB	35SO42-, laktát	N.A.	N.A.	N.A.	0,1-10 x 10 ⁻⁶	0,06/0,09	3,31/4,79	ano	ne?	ne/ano	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	
	1	1924 kg/m ³ ww	anaerobní	N.S.	78d	ne	35SO42-, laktát	N.A.	N.A.	N.A.	0,1-1 x 10 ⁻⁶	0,15	4,04	ano	ne?	ne/ano	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	
Kompaktizace + teplota	2	1932-1940 kg/m ³ ww	anaerobní	N.S.	33-78d	SRB	35SO42-, laktát	N.A.	N.A.	N.A.	0,1-10 x 10 ⁻⁶	0,02	2,73/3,96	ano	ne?	ne/ano	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	
	11	KB N.S. Mock-Up-Cz	in-situ Josef	N.S (dle polohy)	37m	ne	ne	N.D.	N.D.	10-220000	N.A.	N.A.	N.A.	ano	N.A.	ne	heterotrofové	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.

Dále byly mikrobiologicky analyzovány vzorky ze zahřívání in-situ experimentu Mock-Up-Cz na Josefu, nicméně k těmto analýzám ve zprávě (PACOVSKÝ *et al.* 2008) neexistují přesné informace propojující teploty v místech odběrů vzorků pro mikrobiologii ani není známa informace o skutečné objemové hmotnosti. Jedinými použitelnými výstupy jsou tak informace o přítomnosti kultivovatelných heterotrofních mikroorganismů ve všech odebraných vzorcích. Naopak SRB, FeOB a SOB se nepodařilo vykultivovat ze žádného odebraného vzorku (Tab. 24).

2.14.3 BaM

VSTUP

V případě bentonitu BaM byly provedeny tři analýzy vstupního materiálu ve formě prášku a jedna analýza na suspenzi. U všech analyzovaných podvzorků byly provedeny pouze genetické analýzy a nejsou tak známy informace o kultivovatelných mikroorganismech.

Tab. 25 Počet podvzorků a analýz provedených na vstupních podvzorcích bentonitu BaM.

BaM	Počet podvzorků	MB1	MB2_K	MB2_MPN	MB2_qPCR	MB3_NGS	Mikroorganismy detekovány	Mikrobiální aktivita	
Prášek	3	3	N.A.	N.A.	N.A.	3	pozadí/nespolehlivá data	ne	NA
Suspenze	1	1	N.A.	N.A.	1(jen RQ=1)	1	Delftia; Ochrobactrum, Anaerobacillus; Pseudomonas	ano	NA

V případě sekvenování analyzovaných prášků nebyl ve dvou případech zjištěný signál odlišný od signálu pozadí, v jednom případě byly detekované běžné NRB a IRB bentonitové rody jako je *Noviherbaspirillum*, *Thermincola*, *Pseudomonas*, *Delftia*, *Paenibacillus* či čeled' *Planococcaceae* (Příloha 16). V případě suspenze byly detekované rody *Delftia*; *Ochrobactrum*, *Anaerobacillus*; *Pseudomonas*, což jsou opět běžné NRB rody vyskytující se v bentonitu či jako laboratorní kontaminanty (*Delftia*), Tab. 25.

INKUBACE

Podvzorky BaM byly v rámci různých experimentů inkubované jako bentonitové suspenze za celkem 4 různých podmínek prostředí (anaerobně bez živin a přídatku VITA vody, anaerobně s přídatkem VITA, anaerobně s přídatkem VITA i živin a aerobně s přídatkem VITA) po dobu 0-63 dnů (Tab. 26). Vzorky byly ve všech případech analyzovány pouze geneticky.

Tab. 26 Počet vzorků a vyhodnocení analýz provedených na inkubovaných podvzorcích bentonitu BaM. Šedě jsou vyznačené rozdíly v inkubačních podmínkách mezi jednotlivými sadami vzorků.

	Počet podvzorků	Podmínky inkubace						MB1					MB2-qPCR					MB3-NGS					Vyhodnocení				
		Typ vzorku	Atmosféra	Teplota, °C	Doba inkubace, d	Přídavek kultur (které)	Přídavek živin	Typ izolace DNA	16S rRNA RQ	Geobacteraceae(16S rRNA) RQ	NRB(NosZ) RQ	NRB(NitR) RQ	SRB(ApsA) RQ	Max 5 nejčastějších rodů	Mikroorganismy detekovány	Mikrobiální aktivita	SRB aktivita/kultivovatelnost	NRB aktivita/kultivovatelnost	IRB aktivita/kultivovatelnost								
Suspenze - různé podmínky prostředí	3	suspenze 1:3,33	anaerobní	lab	7-30	ne	ne	EFC H	nárůst	nárůst	nárůst	N.A.	N.D.	Pseudomonas, Noviherbaspirillum, Thermincola	ano	ano	ne	ano	ano								
	21	suspenze 1:3,3(1:6,67)	anaerobní	lab	0-63	VITA	ne	EFC H	nárůst	nárůst	nárůst	nárůst	nárůst	Noviherbaspirillum; Pseudomonas; Thermincola; Lacunisphaera; Massilia; Citrifermantans	ano	ano	ano	ano	ano								
	8	suspenze 1:3,33	anaerobní	lab	0-63	VITA	acetát, síran, dusičnan	EKK	nárůst	nárůst	nárůst	N.A.	nárůst	Azospira, Methyloversatilis, Noviherbaspirillum, Caenimonas, Hydrogenophaga, Sphingobium/Thermincola; Lacunisphaera; Noviherbaspirillum	ano	ano	ano	ano	ano								
	4	suspenze 1:3,33	aerobní	12	0-21	VITA	ne	EKK	stagnace	stagnace/pokles	nárůst	N.A.	stagnace	Delftia, Ralstonia, Acinetobacter, Desulfovibrio, Hyphomicrobium/ Pseudomonas, Noviherbaspirillum	ano	ano	ne	ano	ne								

V případě anaerobních inkubací došlo téměř ve všech případech (s výjimkou vzorků cA0w-9w, viz Příloha 16) v průběhu času k nárůstu relativní početnosti bakterií (celková biomasa i jednotlivé funkční skupiny bakterií), data jsou poměrně konzistentní napříč nezávislými experimentálními sadami. Za 2 měsíce inkubace byl pozorován až tisícinásobný nárůst v relativní početnosti celkové mikrobiální biomasy (16S rRNA gen) a byl pozorován postupný nárůst početnosti obligátně anaerobních funkčních skupin bakterií, jako jsou IRB či SRB. Mezi nejhojnější detekované rody napříč podvzorky patřily NRB rody *Pseudomonas*, *Noviherbaspirillum*, *Massilia* nebo *Methyloversatilis* či IRB rody *Thermincola* a *Citri fermentans*. (Tab. 26, podrobněji Příloha 16). Na druhou stranu, inkubace v aerobních podmínkách vedla ke stagnaci mikrobiální populace

a detekován byl pouze rozvoj NRB (Tab. 26). Vzorky však byly inkubovány při nízké teplotě (12 °C), kratší dobu než anaerobní vzorky (21 dnů) a v daných experimentálních podmínkách byly inkubovány pouze jediná sada vzorků, takže v tomto případě nelze dobře usuzovat na spolehlivost získaných dat.

LIMITY

V případě bentonitu BaM byly u suspenzí studovány tři základní limitující faktory - vliv externího tlaku, ozařování a přídavek LPC. Dále byl u kompakovaných bentonitů studován efekt kompaktizace a sdružený efekt kompaktizace a teploty.

Vzorky suspenzí byly vystavené externímu tlaku 2, 5 a 7 MPa po dobu 21 či 30 dnů a analyzované byly pouze geneticky (Černík et al. 2018; Černá et al. 2019). Tlakované vzorky vykazovaly obdobnou relativní abundanci a podobné mikrobiální složení jako kontrolní vzorky (Tab. 27). Mezi dominantní rody patřily NRB a IRB - *Thermincola*, *Pseudomonas*, *Acidovorax*, *Geobacter*, *Massilia*. Aplikace externího tlaku do výše 7 MPa tedy není limitujícím faktorem pro mikrobiální aktivitu.

U obou typů ozařovaných suspenzí (Černá et al. 2019) (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. 27. Ve vzorcích byly detekované různé rody NRB a vzorky s přídavkem živin se složením poněkud lišili od vzorků bez přídavku živiny, viz Příloha 16. Experiment však probíhal za aerobních podmínek, kdy jsou mikrobiální aktivity obecně nižší, než za podmínek anaerobních a dále zde z technických důvodů chyběly adekvátní kontroly. Provedeny byly pouze genetické analýzy. Z uvedených důvodů není zcela jisté, že ke sledované stagnaci mikrobiální proliferace došlo pouze vlivem ozařování.

Vzorky s přídavkem LPC byly analyzovány pouze geneticky (Shrestha et al. 2022). Vykazovaly nárůst relativní mikrobiální abundance v čase, ale ve srovnání s kontrolami bez LPC byl tento nárůst nižší (Příloha 16). V případě SRB přídavek LPC způsobil pouze mírný nárůst či dokonce stagnaci v relativní početnosti této skupiny ve srovnání s kontrolními vzorky (Tab. 27). Mikrobiální složení vzorků se vyvíjelo v čase a také se lišilo mezi jednotlivými typy vzorků. Ve vzorcích převažovaly zástupci NRB a IRB (podrobnější přehled v Příloze 16).

Tab. 27 Počet vzorků a vyhodnocení analýz provedených na zatěžovaných podvzorcích bentonitu BaM.

Typ zátěže	Počet podvzorků	Popis vzorku	Podmínky inkubace			MB2 qPCR						MB3 NGS		Analýza				
			Atmosféra	dobu inkubace, d, m, r	teplota, °C	16S rRNA RQ	Geobacteraceae/(16S rRNA) RQ	NRB(NesZ) RQ	NRB(NiRk) RQ	SREB(ApsA) RQ	SREB(Dsra) RQ	Mikroorganismy detekovány	Mikrobiální aktivita	SRB aktivita/kultivovatelnost	NRB aktivita/kultivovatelnost	IRB aktivita/kultivovatelnost	Limitní hodnota nutná pro potlačení MB aktivity	
Externí tlak	8	suspence 1:3,33 s VITA, externí tlak (2-7 Mpa)	anaerobní	21-30d	lab/12	stejně jako kontrola	stejně jako kontrola/nárůst u 2 MPa	stejně jako kontrola	stejně jako kontrola/nárůst u 2 MPa	stejně jako kontrola/nárůst u 2 MPa	stejně jako kontrola	Max 5 nejčastějších rodů	ano	ano	ano	ano	ano	tlak (až do výše 7 Mpa) není limitujícím faktorem pro růst mikroorganismů, kontroly podobné se zatěžovanými vzorky
	3	suspence 1:3,33 s VITA, bez tlaku (NC)	anaerobní	0-30d	lab/12	stejně jako kontrola	stejně jako kontrola	stejně jako kontrola	stejně jako kontrola	stejně jako kontrola	stejně jako kontrola	vzorky dominované podobnými rody NRB a IRB - Pseudomonas, Geobacter, Thermicola, Massilia, v rámci sad podobné složení bez ohledu na tlak	ano	ano	ano	ano	ano	
Ozařování	14	suspence 1:3,33 s VITA ozařovaná (19 656kGy)	aerobní	7-63d	20	stagnace	stagnace	nárůst/pokles	N.A.	stagnace	N.A.	dominance NRB rody - Bacillus, Pseudomonas, Paenibacillus, aj.	ano	velmi omezená	ne	ano	ne	významné omezení MB aktivity (ale bez kontrol, aerobní), podobně u vzorků se živinami i bez
Přídavek LPC	4	suspence 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	suspence 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	suspence 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	suspence 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	
Kompaktizace	21	KB 1400-1850 kg/m ³ sycený VITA vodou	anaerobní	3-10m	lab	bez qPCR	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	vzorky dominované podobnými rody NRB - Pseudomonas, Hydrogenophilus, Methylovirgula	ano (1400 a 1600 kg/m ³ detekovány buňky MB2_EB)	ano	N.A.	kultivovatelní heterotrofové (1400 a 1600 kg/m ³)	N.A.	suchá objemová hmotnost do 1850 kg/m ³ nelimituje MB aktivitu (bez znalosti RQ či jiné metody kvantifikace), 1400 a 1600 kg/m ³ živé buňky (MB2_EB) a kultivovatelní heterotrofové
	3	KB 1200-2000 kg/m ³ sycený SBPOW	anaerobní	8m	lab	bez qPCR	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	vzorky dominované podobnými rody NRB - Pseudomonas, Streptomyces, u 2000 kg/m ³ již jen pozadí	ne u 2000 kg/m ³	ne u 2000 kg/m ³	N.A.	N.A.	N.A.	suchá objemová hmotnost 2000 kg/m ³ (bez znalosti RQ či jiné metody kvantifikace)
Kompaktizace+teplota	8	KB 1500 kg/m ³ in-situ, 70°C	anaerobní	1-4r	70	bez qPCR	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	vývoj mikrobiálního osídlení v čase (dominance NRB) , 3r a 4r stejný signál (Pseudomonas, Thermus)	ano	ano	N.A.	N.A.	N.A.	suchá objemová hmotnost 1500 kg/m ³ při teplotě 70°C nelimituje MB aktivitu (bez znalosti RQ či jiné metody kvantifikace)

U kompakovaných bentonitů byl v první řadě vyhodnocen efekt kompaktizace. V případě vzorků sycených VITA vodou a inkubovaných 3-10 měsíců (Černá et al. 2018; Černík et al 2018) bylo při všech testovaných suchých objemových hmotnostech (1400-1850 kg/m³) detekováno podobné mikrobiální složení s dominantními NRB rody *Pseudomonas* a *Hydrogenophilus* či aerobním methylotrófním rodem *Methylovirgula* (Tab. 27). U vzorků se suchými objemovými hmotnostmi 1400 a 1600 kg/m³ (Černá et al. 2018) byl prokázán výskyt kultivovatelných heterotrofů a také živých buněk pomocí MB2_EB (vyšší objemové hmotnosti těmito metodami testovány nebyly). U kompakovaných vzorků o suché objemové hmotnosti 1200, 1400, 1600, 1800 a 2000 kg/m³ sycených SBPOW a inkubovaných 8 měsíců (Černík et al. 2017) pak bylo opět detekováno podobné mikrobiální složení s dominantními NRB rody *Pseudomonas* a *Streptomyces* u všech suchých objemových hmotností s výjimkou 2000 kg/m³, kde již detekované složení vzorku odpovídalo pozadí (Tab. 27). Suchá objemová hmotnost 1800-2000 kg/m³ by tak mohla představovat limitní hodnotu pro rozvoj mikrobiální aktivity. V uvedených experimentech nicméně nebyla provedena jakákoli kvantifikace a neznáme tak informaci o případných rozdílech v relativní abundanci mikroorganismů mezi vzorky s různými objemovými hmotnostmi. Ze samotných sekvenčních dat je správná interpretace dat nemožná.

Podobně u zahřívání vzorků kompakovaných bentonitů (suchá objemová hmotnost 1500 kg/m³ a teplota 70 °C) (Dobrev et al. 2020) bylo 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* a *Thermus* (termofilní), Tab. 27. Tato data tedy naznačují, že v zahříváných 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.

2.14.4 B75

VSTUP

U tohoto typu bentonitu nebyly analyzovány vstupní podvzorky.

INKUBACE

U tohoto typu bentonitu nebyly inkubovány žádné podvzorky za účelem rozvoje mikrobiálního osídlení.

LIMITY

U bentonitu B75 byly mikrobiologicky analyzovány pouze podvzorky z vyhříváného 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 zahříváného na 65 °C byl ve vzorku dominantní rod *Saccharopolyspora*, Tab. 28. 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).

Tab. 28 Počet vzorků a zhodnocení analýz provedených na zatěžovaných podvzorcích bentonitu B75.

Typ zátěže	Počet podvzorků	Typ vzorku	Podmínky inkubace			MB3 NGS	Mikroorganismy detekovány	Mikrobiální aktivita	Analýza					Limitní hodnota nutná pro potlačení MB aktivity
			Atmosféra	Teplota, °C	Doba inkubace, d				SRB aktivita/kultivovatelnost	NRB aktivita/kultivovatelnost	IRB aktivita/kultivovatelnost	AA aktivita/kultivovatelnost		
Kompaktizace + teplota	1	KB N.S.	in-situ Josef	25°C	cca 4 r	Nocardia; Pseudonocardia (další Acinetobacter; Brevibacterium; Janibacter; Pseudarthrobacter; Rhodococcus; Streptomyces)	ano	ano?	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	
	1	KB N.S.	in-situ Josef	50°C	cca 4 r	Nocardia; Pseudonocardia (další Acinetobacter; Brevibacterium; Janibacter; Pseudarthrobacter; Rhodococcus; Streptomyces)	ano	ano?	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.		
	1	KB N.S.	in-situ Josef	65°C	cca 4 r	Saccharopolyspora (další Acinetobacter; Brevibacterium; Janibacter; Pseudarthrobacter; Rhodococcus; Streptomyces)	ano	ano?	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.		

2.14.5 Mikrobiologie – metodické a statistické zhodnocení

Na rozdíl od metod popsanych v kapitolách výše, představují mikrobiologické analýzy široké spektrum velice odlišných metod a přístupů a mikrobiologie se tak svou šíří rovná spíše celé

problematice geotechniky či geochemie v bentonitu. Hlavní limitující faktory pro porovnání mikrobiologických dat mezi českými bentonity jsou:

- velmi nestejněmý počet dat pro jednotlivé typy bentonitů (Tab. 31);
- chybějící standardizované mikrobiologické charakterizace vstupních materiálů umožňující efektivní porovnání bentonitů;
- u zatěžovaných vzorků odlišné podmínky zátěže mezi jednotlivými typy bentonitů;
- použití různých metod stanovení (kultivační vs. molekulárně-genetické metody apod.) v různých laboratořích, v různých typech bentonitů a také s vývojem poznání v čase;

Díky velké šíři mikrobiologické problematiky je komplexní vyhodnocení složitější a rozsáhlejší než v kapitolách výše, kde byly hodnoceny dílčí metody, a je proto pro snadnější orientaci rozdělen do dvou samostatných kapitol. V první kapitole se zaměřujeme na porovnání mikrobiologických dat mezi studovanými bentonity (a to pro vstupní nezatěžované vzorky, vzorky inkubované v podmínkách podporujících růst mikroorganismů a dále pro vzorky zatěžované). Ve druhé kapitole je vyhodnoceno využití jednotlivých mikrobiologických metod pro studium mikrobiologie v prostředí bentonitu.

2.14.5.1 Porovnání mezi bentonity

Z mikrobiologického hlediska patří k nejprozkoumanějším bentonitům bentonit BCV, který je předmětem intenzivního výzkumu několik posledních let v rámci projektu TAČR BioBen. Interpretovatelné množství dat existuje dále také k bentonitu BaM, který byl řešen v rámci projektu MIND a dále v rámci zakázkové činnosti pro SÚRAO (ZL-MIC, MaCoTe). Bentonity Rokle a B75 jsou mikrobiologicky prozkoumané jen velmi málo, neboť jejich rozsáhlejší výzkum probíhal v době, kdy mikrobiologická problematika nebyla ještě řešená. U ostatních typů bentonitů, jež jsou předmětem této zprávy (Stránce, GE), neexistují mikrobiologická data žádná (Tab. 29).

Tab. 29 Množství analyzovaných podvzorků u jednotlivých typů bentonitů.

Bentonit	Počet podvzorků
BCV	233
BaM	73
Rokle	30
B75	3

Pro vyvození jakýchkoli obecných závěrů ohledně mikrobiální aktivity v bentonitu a případných negativních efektů s rozvojem mikrobiální aktivity spojených, jsou nezbytná srovnávací data z více typů materiálů. Součástí budoucích projektů by tak mělo být zahrnutí vždy více než jednoho typu materiálu, aby získané informace byly snáze zobecnitelné.

VSTUP

Analýza vstupních materiálů ukázala na velikou nekonzistentnost v prováděných analýzách, jež znemožňuje vzájemné porovnání různých typů bentonitů. V případě bentonitu Rokle byly provedeny pouze kultivační analýzy, v případě bentonitu BaM byly naopak provedeny jen genetické analýzy (MB3-NGS). Pro bentonit BCV, jež je aktuálně mikrobiologicky nejprozkoumanějším českým bentonitem, existují data z genetických i kultivačních analýz a

během jeho výzkumu především v projektu TAČR Bioben došlo k významnému vývoji metodického aparátu, jež ukázal možnosti a nutnost vývoje budoucího standardizovaného postupu vstupních mikrobiologických charakterizací jednotlivých materiálů, viz 2.14.5.2.

INKUBACE

Inkubace vzorků za vhodných podmínek prostředí je velice cenným nástrojem pro pochopení mikrobiologického potenciálu daného bentonitu v přirozených podmínkách. Tradiční kultivační postupy využívající specifická média jsou jistě vhodnou součástí vstupních charakterizací či ověření životaschopnosti mikroorganismů ve vzorcích po zatěžování, ale vždy odhalí pouze část mikrobiologického potenciálu studovaného bentonitu, neboť jednotlivá média jsou selektivní pro úzké skupiny bakterií a velké množství mikroorganismů je navíc nekultivovatelných (Eydal and Pedersen 2007; Hallbeck and Pedersen 2012). Inkubace vzorků ve formě suspenze či nízko-kompaktovaného bentonitu za podmínek blízkých HÚ RAO nám tedy může poskytnout přesnější informace o vývoji mikroorganismů v komplexnějších a reálnějších podmínkách a je tedy velmi vhodnou součástí charakterizace studovaného materiálu. Pro porovnatelnost je však nezbytné vyvinout a využívat standardizované postupy, jak je popsáno výše.

Alespoň do nějaké míry porovnatelná data o inkubovaných vzorcích existují pouze u bentonitů BCV a BaM, a to na suspenzích inkubovaných v aerobních a anaerobních podmínkách. U těchto dvou bentonitů došlo v aerobních podmínkách k rozvoji různých rodů především NRB, viz Tab. 19 a Tab. 23. U anaerobních vzorků pak byl v čase detekován postupný rozvoj fakultativně anaerobních mikroorganismů jako jsou IRB (rod *Thermincola*, *Citri fermentans*) či SRB (*Desulfosporosinus*, *Desulfovibrio*). Přesné složení vzorků se však pochopitelně lišilo v závislosti na typu bentonitu a délce inkubace, viz Příloha 14 a Příloha 16. V případě BaM byla navíc pro případné porovnání problémem přítomnost podzemní vody VITA, používané pro tvorbu suspenzí ve většině vzorků, která mohla do mikrobiálního složení v suspenzi přinést bentonitu nepůvodní druhy.

V případě bentonitu Rokle není možné porovnat výsledky inkubací s bentonity BCV ani BaM, neboť inkubace probíhala za zcela odlišných podmínek (v kultivačních médiích). Pro bentonit B75 nejsou k dispozici inkubační data žádná.

Díky omezenému množství dat není možné vyhodnotit, do jaké míry jsou trendy pozorované v průběhu inkubací bentonitů BCV a BaM pro české bentonity typické. Oba tyto bentonity pocházejí ze shodného ložiska (Černý Vrch) a jsou de facto identickými materiály v řadě ohledů. Pro pochopení obecných trendů ve vývoji mikrobiálních komunit by bylo dobré mikrobiologická data provázat s daty o chemismu vzorků za inkubačních podmínek. Toto bude jedním z cílů projektu TAČR BioBen, ovšem pouze pro bentonit BCV. Pro vysledování skutečně obecných trendů ve vývoji mikrobiálních komunit v bentonitu, by bylo nezbytné získat data o vývoji mikroorganismů v různých typech inkubovaných českých bentonitů a tyto pak porovnat s jejich chemickým složením.

LIMITY

Pro hodnocení vlivu limitních faktorů na mikrobiální aktivitu v bentonitu pro účely tohoto DÚ3 byly využity různé výsledky experimentů často s velmi odlišným experimentálním designem, jejichž primárním cílem bylo ověřit reakci mikroorganismů na daný faktor a nikoli ex-post porovnatelnost dat. Kromě obecně malého překryvu ve studovaných faktorech mezi různými typy bentonitů je

tedy porovnatelnost i v rámci studia stejného limitního faktoru mezi bentonity omezená, viz Tab. . Alespoň omezené hodnocení efektu napříč různými bentonity je tedy možné provést pouze u vlivu ozařování, aplikace externího tlaku a kompaktizace, kde existují porovnatelná data alespoň u dvou typů materiálů ve shodném stavu.

Tab. 30 Shrnutí studovaných limitních faktorů (aplikované typy zátěže) dle typu bentonitu a typu vzorku (prášek/suspenze/kompaktovaný bentonit - KB). V závorkách je uvedený studovaný rozsah studovaného faktoru.

Typy zátěže	BCV	BaM	Rokle	B75
Ozařování (sterilizace)	prášek/suspence (vysoké dávkové příkony, 0-140 kGy)	suspence (nízké dávkové příkony, 0-20 kGy)	N.A.	N.A.
Externí tlak	suspence (10-15 Mpa)	suspence (2-7 MPa)	N.A.	N.A.
Přídavek LPC	N.A.	suspence	N.A.	N.A.
Teplotní sterilizace	prášek + suspenze (1-9x 120°C)	N.A.	N.A.	N.A.
Teplota	suspence (60-90°C)/prášek (150°C)	N.A.	KB (teplota N.S.)	KB (25-65°C)
Kompaktizace	N.A.	KB (1200-2000 kg/m3)	KB (1670-1940 kg/m3 ww)	N.A.

Vliv ozařování

Významný efekt ionizujícího záření na rozvoj mikrobiální aktivity v suspenzích byl pozorován v případě sterilizačních pokusů se suspenzemi bentonitu BCV. Ozařované vzorky anaerobních suspenzí (dávka 0-140 kGy) byly analyzované hned po ozaření a dále po 14denní inkubaci a vzorky byly analyzované geneticky a pomocí extrakce buněk (MB2_EB). Výsledky extrakce buněk byly pravděpodobně ovlivněné kontaminací během zpracování vzorků (Černá et al. 2022). Genetická data nicméně ukázala graduální pokles relativní početnosti bakterií i zhoršení NGS signálu s aplikovanou dávkou (viz Příloha 14) a na základě shrnutí výsledků byla stanovena dávka záření nutná pro sterilizaci suspenze v rozmezí 27-70 kGy.

V případě bentonitu BaM byly suspenze ozařované v aerobních podmínkách. U sledovaných vzorků došlo podobně jako u vzorků BCV k významné redukci mikrobiální aktivity a u téměř všech studovaných markerů reprezentujících různé metabolické skupiny bakterií byla pozorována stagnace relativní početnosti či pokles v čase. Maximální aplikovaná dávka záření byla 19656 Gy. Ve vzorcích byly detekované různé rody NRB a vzorky s přídavkem živin se složením poněkud lišily od vzorků bez přídavku živiny, viz Příloha 16. Experiment však probíhal za aerobních podmínek, kdy jsou mikrobiální aktivity obecně nižší, než za podmínek anaerobních a dále zde z technických důvodů chyběly adekvátní kontroly, které by jednoznačně potvrdily, že ke sledované stagnaci mikrobiální proliferace došlo pouze vlivem ozařování. Při porovnání výsledků s výsledky BCV popsány výše je to však vysoce pravděpodobné a ozařování za studovaných dávkových příkonů a absorbovaných dávek záření je tak možné považovat za limitující pro mikrobiální aktivitu.

Vliv aplikace externího tlaku

Aplikace externího tlaku byla provedena u anaerobních suspenzí BCV a BaM. V případě BCV bylo experimentální uspořádání 4 týdny zátěž (10-15 MPa) následované 2 týdny regenerace bez zátěže v anaerobních podmínkách. U tlakovaných vzorků nebyl pozorován pokles mikrobiální aktivity ve srovnání s netlakovanými kontrolami, relativní početnosti i detekované mikrobiální složení se mezi vzorky nelišily (Tab. 20). Výsledky tedy naznačují, že tlak do výše 15 MPa nepředstavuje v případě BCV limitní faktor pro mikrobiální aktivitu.

K obdobným závěrům vedly experimenty se suspenzemi BaM, které byly vystavené externímu tlaku 2, 5 a 7 MPa po dobu 21 či 30 dnů. I zde tlakované vzorky vykazovaly obdobnou relativní

abundanci a podobné mikrobiální složení jako kontrolní vzorky (Tab. 27) a závěrem je, že aplikace externího tlaku do výše 7 MPa není limitujícím faktorem pro mikrobiální aktivitu.

Oba experimenty tedy nezávisle potvrdily, že samotný tlak není limitujícím faktorem a nemůže jím tedy být ani v prostředí kompaktovaného bentonitu hlavním limitujícím faktorem pro mikrobiální aktivitu, ale za poklesem mikrobiální aktivity se vzrůstající objemovou hmotností pozorovaným v řadě experimentů, včetně českých bentonitů (viz níže), stojí jiné faktory jako je dostupnost vody, živin či životního prostoru.

Kompaktizace

Efekt kompaktizace byl sledován u bentonitů BaM a Rokle. U kompaktovaných BaM bentonitů sycených VITA vodou a inkubovaných 3-10 měsíců bylo při všech testovaných suchých objemových hmotnostech (1400-1850 kg/m³) detekováno podobné mikrobiální složení s dominantními NRB rody *Pseudomonas* a *Hydrogenophillus* či aerobním methylotrófním rodem *Methylovirgula* (Tab. 27). U vzorků se suchými objemovými hmotnostmi 1400 a 1600 kg/m³ byl prokázán výskyt kultivovatelných heterotrofů a také živých buněk pomocí MB2_EB (vyšší objemové hmotnosti těmito metodami testovány nebyly). U kompaktovaných vzorků o suché objemové hmotnosti 1200-2000 kg/m³ sycených SBPOW a inkubovaných 8 měsíců pak bylo opět detekováno podobné mikrobiální složení s dominantními NRB rody *Pseudomonas* a *Streptomyces* u všech objemových hmotností s výjimkou 2000 kg/m³, kde již detekované složení vzorku odpovídalo pozadí (Tab. 27). Objemová hmotnost 1800-2000 kg/m³ by tak mohla představovat limitní hodnotu pro rozvoj mikrobiální aktivity. V uvedených experimentech nicméně nebyla provedená jakákoli kvantifikace a neznáme tak informaci o případných rozdílech v relativní abundanci mikroorganismů mezi vzorky s různými objemovými hmotnostmi. Ze samotných sekvenačních dat je správná interpretace dat nemožná.

Při testování vlivu kompaktizace byla v případě bentonitu Rokle použita směsná kultura SRB (Bengtsson et al. 2017) za účelem stanovení vlhké objemové hmotnosti pro inhibici metabolické aktivity SRB. Byly testovány vlhké objemové hmotnosti 1670-1940 kg/m³. Kromě MPN kulturační analýzy (MB2_MPN) byla pro detekci metabolické aktivity SRB použita také metoda detekce mikrobiální produkce sulfanu (MB4_S) a acetátu (MB4-ACE), viz Tab. 24. Kompaktované vzorky byly inkubovány 33-78 dnů. MPN analýza ukázala přítomnost kultivovatelných SRB ve všech studovaných vzorcích a nebyl pozorován pokles kultivovatelnosti se vzrůstající objemovou hmotností. Na druhou stranu, metabolická aktivita SRB byla detekovaná pouze v jednom případě u vzorku s objemovou hmotností 1670 kg/m³ a nikoli u vzorku s objemovou hmotností 1692 kg/m³ a toto rozmezí hodnot (1670-1692 kg/m³ ww) bylo tedy interpretované jako hraniční pro rozvoj aktivity SRB v bentonitu Rokle (Tab. 24).

Výsledky získané u obou typů bentonitů, přestože metodicky odlišné a zaměřující se na odlišné skupiny bakterií, potvrzují možnou variabilitu v limitní hodnotě objemové hmotnosti nezbytné pro potlačení mikrobiální aktivity v kompaktovaném bentonitu, což potvrzují i další studie (Bengtsson et al 2017; Bengtsson and Pedersen 2017). Stanovení limitních hodnot pro potlačení mikrobiální aktivity v kompaktovaném bentonitu je tak parametrem, jež by měl být stanoven nezávisle pro každý kandidátní typ bentonitu.

2.14.5.2 Komentář k mikrobiologickým analýzám

Mikrobiologické analýzy v prostředí bentonitu jsou vlivem unikátních vlastností bentonitu obecně velice komplikované. Pro jednoznačné vyhodnocení mikrobiální aktivity v prostředí bentonitu je

tedy nezbytné kombinovat vždy různé analytické přístupy a volba jejich použití dále vždy záleží na kladené otázce.

Množství analyzovaných vzorků a spektrum dosud provedených analýz se u jednotlivých bentonitů významně liší (Tab. 31). Rozdíly v použitém metodickém aparátu jsou odrazem jednak časového hlediska a stupně poznání v době zkoumání vzorků a jednak odlišných používaných přístupů u různých výzkumných skupin analyzujících data. A přirozeně též zodpovídané otázky.

Tab. 31 Množství analyzovaných podvzorků a provedených analýz u jednotlivých typů bentonitů.

Bentonit	Počet podvzorků	MB1	MB2_PPB	MB2_EB	MB2_K	MB2_MPN	MB2_qPCR	MB3_NGS	MB4_ATP	MB4_S	MB4_ACE (mg/l)	MB4_lactat (umol/gdw)	Nadstavbové MB analýzy	Nadstavbové chemické analýzy
BCV	233	226	0	138	22	0	225	219	0	0	8	0	0	52
BaM	73	50	0	18	28	0	38	54	0	0	0	0	55	22
Rokle	30	0	8	0	19	3	0	0	0	13	13	8	19	0
B75	3	3	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	3	0

U bentonitu B75 byla provedena pouze sekvenace (MB3-NGS), která nám nemůže říci nic o míře mikrobiální aktivity ve studovaných vzorcích. Naopak u bentonitu Rokle byla analýza založená na kultivačních přístupech (MB2_K, MB2_MPN) a detekci produktů metabolismu (MB4_ATP, MBA_ACE) a zcela zde chybí sekvenační analýza, která by získané informace o přítomnosti metabolicky aktivních mikroorganismech doplnila o jejich přesnou klasifikaci. Pouze u bentonitu BaM a BCV byly analýzy kombinované, analyzované množství vzorků bylo relativně vysoké a data jsou proto snáze interpretovatelná (byť se situace liší u různých typů experimentů).

Pro zajištění kvalitní mikrobiologické analýzy a porovnatelnosti nezávisle získaných dat je nezbytné:

- Využívat širší spektrum nezávislých analýz (viz dále)
- Standardizovat analytické postupy a způsob získávání vzorků

Způsob odběru a následného uchování vzorku vždy závisí na zvolené analytické metodě a může výsledky významně ovlivnit. Např. vzorky pro genetické analýzy je nezbytné co nejrychleji po odběru zamrazit, což zajistí jejich dlouhodobou stabilitu, naopak vzorky pro kultivace je nutné uchovat při 4 °C v podmínkách co nejpodobnějších podmínkám experimentu (např. zachování anaerobních podmínek při vzorkování anaerobního experimentu) a vzorky je nutné co nejrychleji po odběru (v řádu hodin) zpracovat. Všechny tyto přípravné práce i samotné analýzy dále musejí být prováděny sterilním způsobem. Nižší uvádíme konkrétní doporučení pro provádění mikrobiologických analýz vstupních a zatěžovaných vzorků bentonitů.

Vstupní vzorky

Vzorky vstupních materiálů obecně obsahují spíše malé množství mikroorganismů (řádové množství 10^4 - 10^6 buněk/g (Svensson et al 2011) a obsahují především metabolicky neaktivní stádia mikroorganismů schopné dlouhodobého přežití. Prováděné analýzy tak musejí mít vysokou citlivost, pokud mají zachytit přítomné mikroorganismy. Důležité v tomto případě je proto kromě kvality provedení také množství opakování analýz, které může ukázat na reprodukovatelnost a spolehlivost získaných dat.

V rámci vstupních charakterizací jednotlivých materiálů by měly proběhnout:

- genetické analýzy (NGS) za účelem zachycení mikrobiálního složení vstupního vzorku
- kultivační analýzy za účelem detekce spektra kultivovatelných mikroorganismů

- ideálně též inkubace (v suspenzích a nízkokompaktovaných bentonitech za různých podmínek prostředí) za účelem zachycení mikrobiologického potenciálu
- nezbytný vývoj standardizovaného postupu pro tyto analýzy

V rámci projektu TAČR BioBen bude vyvinuta metodika pro studium limitních faktorů pro přežívání a proliferaci mikroorganismů v bentonitu, ale zde není předmětem mikrobiologická charakterizace samotného vstupního materiálu. Vývoj standardního postupu pro charakterizaci vstupního materiálu by tak 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. Na toto kritérium dosud nebyl kladen žádný důraz, a proto konzistentní data chybí.

Zatěžované vzorky

Analytické přístupy pro zatěžované vzorky musejí být voleny vždy s ohledem na kladenou otázku, přičemž je vhodné kombinovat metody z níže uvedených kategorií:

- Analýzy typu MB2 pro odhalení přítomnosti bakterií, odhad mikrobiální početnosti ve vzorku nebo detekci konkrétních skupin bakterií; patří sem široké spektrum metod od genetických (qPCR) přes mikroskopické až po různé kultivační postupy.
- Sekvenční analýzy (MB3_NGS) k odhalení přesného mikrobiálního složení (ovšem bez informace o kvantitě jednotlivých taxonů).
- Analýzy typu MB4, které umožňují potvrdit metabolickou aktivitu detekovaných mikroorganismů analýzou produktů jejich metabolismu.

Genetické postupy založené na analýze izolované DNA (např. MB2-qPCR či MB3-NGS) představují základ moderních mikrobiologických analýz. Obzvláště u mikrobiálně chudých vzorků, ze kterých není možné izolovat dostatečně vysoké výtěžky DNA a hrozí tak zvýšené riziko překrytí skutečného signálu kontaminacemi, je však vhodné doplnit metody založené na studiu DNA negenetickými přístupy, jako jsou typicky kultivační analýzy. Obdobně, pokud je nezbytné potvrdit přítomnost živých a metabolicky aktivních mikroorganismů ve studovaném vzorku, jsou vhodným doplňkem genetických metod mikroskopické analýzy či analýzy mikrobiálně produkovaných metabolitů. Podrobný popis jednotlivých metod a citované dělení je uvedeno ve zprávě Vašíček et al. (2022).

Jak bylo vysvětleno na začátku kapitoly 2, MB data sebraná pro účely tohoto DÚ nebylo možné statisticky analyzovat. Pro účely kvalitního porovnání mikrobiálního složení u jednotlivých vzorků napříč různými experimenty a jejich případné statistické zhodnocení by bylo nezbytné provést znovu sekvenování anebo přinejmenším alespoň již osekvenovaná data znovu bioinformaticky zanalyzovat. Pro tento krok je však nezbytný přístup k primárním sekvenčním datům. Sekvenování je možné obecně provést u všech vzorků, z nichž byla izolována a uchována DNA. Pro účely porovnání abundancí mikroorganismů ve studovaných vzorcích by též bylo velmi vhodné provést dPCR analýzu všech vzorků s dostupnou DNA. Jedná se o poměrně novou metodu, která nebyla dosud pro účely výzkumu mikrobiální aktivity s prostředí HÚ RAO používána. Metoda dPCR umožňuje na rozdíl od qPCR přesnou absolutní kvantifikaci počtu kopií cílového genu a může tedy sloužit jako měřítko mikrobiální abundance napříč studovanými vzorky. U porovnávaných vzorků by však musela být známa přesná informace o způsobu získání DNA, neboť zásadním parametrem je množství vstupního materiálu pro izolaci DNA i efektivita extrakce DNA, jež závisí na použitém izolačním postupu.

2.15 Další analýzy

Z dalších metod byly pro charakterizaci bentonitu použity následující: chemická analýza vod získaných při loužících experimentech (LUH) a při vysokotlaké extrakci pórové vody (SQE), sorpční experimenty (SOR), difúzní experimenty (DIF), retenční křivky (WRC), termická analýza (TA), Infračervená spektrometrie (FTIR), Mössbauerova spektroskopie (MÖSS) a vizualizační techniky (polarizační mikroskopie, skenovací elektronová mikroskopie). Jejich statistické zpracování není možné z důvodu charakteru dat (obrazová forma), nevhodnosti porovnání s NS bentonitu (vody, analýzy vztahující se na určitou část vzorku) a malého počtu dat.

Vybrané vzorky odebrané z Mock-up-CZ experimentu byly podrobeny analýzám LUH, SOR, DIF (Křížová et al. 2006a, 2006b). Celkem bylo provedeno 21 stanovení vyluhovatelných iontů, avšak pouze u 4 stanovení je bilance kationtů/aniontů do 5 %, analýzu tak lze považovat za kompletní. U ostatních analýz lze předpokládat, že některé z kationtů/aniontů nebyly stanoveny, nebo byly stanoveny chybně. K omezujícím faktorům pro další zpracování dat je nutné přidat chybějící vstupní vlhkost bentonitového vzorku před provedením analýz a přesné uvedení teploty v místě odběru.

Křížová et al. (2010) zkoumala změny v mineralizaci vod (Křížová et al. 2010) v experimentu Mock-Up.CZ. Zásadní změny byly pozorovány v prvním půl roce, kdy celkové množství rozpuštěných látek roste na zhruba dvojnásobek. Od šestého měsíce po dobu dalšího jednoho roku už mineralizace u substrátů Rokle a Mock-Up-Cz mírně klesá. Bez ohledu na rozdílnou výchozí mineralizaci obou typů použitých vod dojde už po třech měsících ke srovnání celkové mineralizace v závislosti na typu substrátu, typ použité vody přestává hrát rozhodující úlohu (Křížová et al. 2010).

Červinka et al. (2019a) prováděl difúzní experimenty na BaM kompaktovaném na 1600 kg/m³ kontaktovaném s ocelí a SGW-UOS vodou. Při porovnání hodnot efektivních difúzních koeficientů D_e jodidu získaných pro samotný bentonit BaM a pro bentonit BaM s korozními produkty bylo patrné, že v přítomnosti korozních produktů dosahuje efektivní difúzní koeficient nižších hodnot, než je tomu u samotného bentonitu. Tyto rozdíly v hodnotách D_e byly tím výraznější, čím je nižší objemová hmotnost bentonitu v difúzní cele. Výsledky sorpčních experimentů s jodidem nepotvrdily nižší hodnoty efektivních difúzních koeficientů pro vzorky BaM s korozními produkty oproti difúzním experimentům s čistým bentonitem. Otázku poklesu hodnot efektivního difúzního koeficientu pro jodid v přítomnosti korozních produktů vysvětluje Červinka et al. (2019) mechanickým ucpáním části difúzních drah vysráženými produkty (např. siderit, aragonit). Přítomnost sideritu a aragonitu byla potvrzena PXRD ve vrstvě bentonitu přiléhající k oceli (Červinka et al. 2019).

Červinka et al. (2019b) analyzoval složení bentonitové pórové vody získané pomocí sukčního lysimetru. V získaných pórových vodách dominoval sodík, sírany a hydrogenuhličitan. Hodnoty pH se pohybovaly od 8,5 do 8,8. V koncentracích některých prvků byl vidět postupný pokles s časem odběru, kde docházelo pravděpodobně k postupnému vymývání dobře rozpustných složek z bentonitu. Výrazný pokles síranů byl způsoben mikrobiální redukcí síranů, která se potvrdila při následném rozebrání aparatury (zápach po sirovodíku, černý mikrobiální povlak na dně aparatury). Červinka et al. (2019b) předpokládal, že takto získaná pórová voda kompaktovaného bentonitu odpovídá svým složením prvotní vodě po plné saturaci bentonitu. Faktor vlivu tepla a kontakt s UOS nebyl uvažován. Použití sukčních lysimetrů bylo doporučeno pro získání pórové vody kompaktovaného bentonitu.

Z LUH experimentů vyplynul převažující Na-HCO₃ typ vod (Kašpar et al. 2021). Za zdroj HCO₃⁻ je považován karbonát, který se při loužení rozpouští. Rozpouštění karbonátů je doprovázeno kationtově výměnnými reakcemi, při nichž dochází k uvolňování Na⁺ do vody (Kašpar et al. 2021). Koncentrace vod vzrůstají s délkou teplotního zatěžování v důsledku zvýšení rozpustnosti některých fází v bentonitu. Rozdíly byly pozorovány především v obsahu Ca²⁺, následované K⁺ a Mg²⁺. Koncentrace Na⁺ jsou u všech vzorků srovnatelné v důsledku omezené schopnosti Na⁺ konkurovat ostatním kationtům na vyměnitelných pozicích bentonitu. V teplotně zatěžovaných vzorcích poklesl obsah vyluhovatelných SO₄²⁻ a Cl⁻ indikující pokles rozpustnosti síranových a chloridových fází (Kašpar et al. 2021).

Součástí PXRD analýzy BCV_NS byla identifikace bazálního píku $d_{001} \sim 14.5$ Å odpovídající střední hodnotě mezi 1W a 2W hydratačním stavem smektitu (Laufek et al. 2021). V důsledku teplotního zatěžování BCV za sucha při 200 °C došlo k posunu $d_{001} \sim 9.8$ Å. Laufek et al. (2021) popisuje tento stav jako dehydratovaný montmorillonit (montmorillonit bez molekul vody v mezivrství). V důsledku teplotního zatěžování bylo popsáno vymizení goethitu a jeho transformace na hematit (Laufek et al. 2021).

Mössbauerova spektroskopie byla využita na bentonit kontaktovaný s ocelí a zatěžovaný SGW-UOS vodou při 40 °C po dobu 0,5 roku (Gondolli et al. (2018a, 2018b)). Z analýzy vyplynul rozdíl ve spektrálním poměru Fe²⁺/Fe³⁺ – ve výchozím bentonitu dominuje komponenta Fe³⁺, zatímco v bentonitu z interakčního rozhraní spektrální zastoupení komponent Fe²⁺ a Fe³⁺ prakticky identické. Hodnoty izomerního posunu a kvadrupólového štěpení pro Fe²⁺ a Fe³⁺ komponentu byly rozdílné u obou vzorků. Tato změna byla vysvětlena změnou okolí Fe²⁺ a Fe³⁺ iontů v důsledku změny ligandového pole, což může odrážet vliv externích fází na strukturu bentonitu. Zastoupení Fe⁰ bylo v obou vzorcích stejné. Analýza spekter ukázala, že nebyly přítomné oxihydroxidy a nehydratované formy oxidů železa.

Černá et al. (2021b) zkoumala oxidační stav Fe pomocí Mössbauerovy spektroskopie. U BCV vzorku kontaktovaného s deionizovanou vodou byla pozorována reoxidace bentonitu v aerobních podmínkách. To ukazoval i časový vývoj relativní spektrální plochy složek Fe²⁺, naznačující jeho tvorbu z jiných komponent železa s následnou reoxidací zpět Fe³⁺ v řádu měsíců. U BCV zatěžovaného PGM mediem byla provedena analýza vyluhovatelných iontů, která potvrdila převládající Na-HCO₃ charakter výluhu. Oproti výluhům BCV_NS došlo ke zvýšení koncentrace SO₄²⁻.

Šťástka et al. (2022) využil metodu skenovací elektronové mikroskopie (SEM) k identifikaci novotvořených minerálních fází (kalcit) v bentonitu B75 zatěžovaném v experimentu Mock-UP CZ při teplotě 30-90 °C po dobu 6 let. Metoda SEM byla využita jako doprovodná metoda umožňující identifikaci novotvořených minerálů in-situ (přímo v místě jejich výskytu). Šťástka et al. (2022) vysvětluje vyrostlice kalcitu jako důsledek kontaktu bentonitu s betonovou zátkou. Vyrostlice nemají vliv na geochemické a geotechnické vlastnosti bentonitu.

3 Závěr

Geochemická, mineralogická a geotechnická data bylo možné statisticky zhodnotit v omezeném rozsahu pouze pro bentonit v neovlivněném stavu. S ohledem na nízký počet dat byly stanoveny základní statistické parametry dat. Rozdíly byly zjištěny mezi jednotlivými bentonity. Z pohledu geochemických a mineralogických dat není možné analýzy navzájem propojit.

Základním faktorem ovlivňujícím heterogenitu dat je charakter některých bentonitů. Bentonity Rokle_NS, Stránce_NS a GE_NS byly odebrány formou kopaných vzorků a nebyly následně homogenizovány v celém objemu. Heterogenitu dat tak ovlivňují velké úlomky. Bentonit BaM_NS byl uměle nabohacený smektitem. Bentonit B75_NS byl ovlivněn částečnou natrifikací, ke které došlo při průmyslové úpravě bentonitu. U bentonitu BCV_NS existují zmínky o vyrostlicích goethitu patrných ve vzorku. V důsledku charakteru vyrostlic mohlo dojít při manipulaci s bentonitem k nabohacení některých partií.

Výrazný rozptyl dat pro neovlivněný stav bentonitu u některých analýz ukazuje na obtížnou korelovatelnost dat pocházejících z různých časových období a řešených různými variantami analytických metod. Typickým příkladem je PXR. Statistické parametry dat neovlivněného bentonitu ukazují rozsah v řádu až desítek hm. % obsahu minerálů. Při stanovení semikvantitativního složení byly v průběhu let používány 3 různé způsoby: přepočítání dat na základě kombinace chemického složení a rentgenových záznamů (CQPA), vyhodnocení pomocí korundového čísla a Rietveldovo vyhodnocení. CQPA metoda obecně nadhodnocuje obsah smektitu, použití korundového čísla nadhodnocuje obsah křemene. U ovlivněných dat se semikvantitativní složení jeví jako málo citlivé na změny v bentonitu. Zároveň chybí kvantitativní parametr, který by byl kontinuálně měřen a který by odrážel stupeň ovlivnění bentonitu.

Obdobný problém se ukázal u hodnot CEC, kde u bentonitů analyzovaných různými variantami stanovení (CEC-NH₄, CEC-Cu, typicky pro bentonit B75_NS a Rokle_NS) je rozsah hodnot v řádu prvních desítek mekv/100 g. CEC-NH₄ a CEC-Cs nadhodnocují hodnotu CEC oproti CEC-Cu. Stejně jako v případě PXR, heterogenita dat souvisí heterogenitu materiálu i obtížnou korelovatelnost dat mezi jednotlivými metodami a laboratoři. Geotechnická data mohou být jednorozměrná, nebo vícerozměrná. Heterogenita dostupných dat je tak významná, že v případě tří a více rozměrných dat statistické vyhodnocení není možné. Jedná se o pevnost v tlaku a termofyzikální vlastnosti. Tyto parametry patří do základní charakteristiky bentonitu, nebo bentonitového výrobku, ale spolu se specifickou hustotou a mezí plasticity nejsou spolehlivými indikátory změn v bentonitu z důvodu nedostatečné přesnosti metod měření.

Statistickou analýzu geotechnických dat je možné provést v omezené míře pro většinu bentonitů v neovlivněném stavu. Avšak v mnoha případech je k dispozici pouze jedna hodnota a statistické vyhodnocení nelze provést ani pro neovlivněný bentonit. Zcela chybí pevnost v tlaku a termofyzikální vlastnosti neovlivněných bentonitů BaM a Stránce. Termofyzikální vlastnosti nebyly měřeny pro BaM, Stránce, ani Zelený jíl. Tudíž jsou dostupné pouze pro BCV, Rokle a B75.

Velký rozptyl dat hydraulické vodivosti neovlivněných bentonitů Rokle, Stránce a Zelený jíl neumožňuje analyzovat míru ovlivnění těchto bentonitů v porovnání s neovlivněným stavem. Pro bentonit Rokle je k dispozici široká základna dat měřená na ovlivněném bentonitu, ale nelze ji porovnávat s neovlivněným bentonitem z důvodu velkého rozptylu dat. V tomto případě je možné hodnotit jen trend vývoje tohoto parametru v závislosti na době zatížení.

Data z měření propustnosti a bobtnacího tlaku na ovlivněném bentonitu nebyla měřena pro BaM ani pro Stránce. Na Zeleném jílu není možné spolehlivé statistické vyhodnocení z důvodu nedostatku dat a velkého rozptylu dat měřených na neovlivněném bentonitu. Spolehlivě lze propustnost a bobtnací tlak vyhodnotit pouze pro bentonity BCV a B75.

Nedostatečné množství opakování měření pro jeden způsob a interval zatížení je charakteristické prakticky pro veškerá měření jednorozměrných dat (mez tekutosti, mez plasticity, swell index, specifická hustota částic) na všech bentonitech. Zdánlivě bylo naměřeno velké množství hodnot, ale v důsledku, vlivem detailního rozdělení daného bentonitu na jednotlivé druhy podle více různých parametrů je měřena pouze jedna hodnota pro daný druh bentonitu dle zatížení. Při snaze neztratit žádnou z informací (jako je teplota zatížení, doba zatížení, vlhkostní stav bentonitu, saturační medium) není možné vypracovat statistickou analýzu a provést vyhodnocení, jelikož je vždy k dispozici pouze jedna měřená hodnota a lze jen obtížně odlišit vliv zatěžování bentonitu od chybné analýzy.

Z dat, která jsou vhodná pro statistické vyhodnocení vyplývá, že tepelné zatížení teplotou > 100 °C má mírný vliv na některé vlastnosti obou bentonitů, které je možné statisticky vyhodnotit (BCV a B75). U těchto bentonitů bylo pozorováno mírné zvýšení hydraulické vodivosti po tepelném zatížení bentonitu v suchém stavu a mírné snížení hydraulické vodivosti po zatížení bentonitu ve stavu suspenze. Z dostupných dat pro BCV a B75 vyplývá, že na bobtnací tlak tepelné zatížení nemá vliv. S hydraulickou vodivostí bentonitů BCV a B75 po tepelném zatížení v suchém stavu koreluje mez tekutosti a v případě BCV i swell index, pro ovlivněný B75 nebyl swell index stanoven. U BCV i B75 došlo k poklesu meze tekutosti po vystavení zvýšené teplotě a v případě BCV došlo i ke snížení swell indexu. Mez tekutosti bentonitu po zatížení ve vlhkém stavu se nemění, pro swell index nejsou data. Vliv tepelného zatížení, nebo jiného ovlivnění na termofyzikální vlastnosti, pevnost v tlaku, specifickou hustotu a mez plasticity není možné vyhodnotit z důvodu nepřesnosti metod měření.

Na základě provedené analýzy nebyl pozorován žádný trend ve změně některého z parametrů, který by byl společný pro všechny bentonity. V případě meze tekutosti je pozorován dokonce opačný trend v chování bentonitu B75 a Rokle. Zatímco mez tekutosti bentonitu B75 po tepelném zatížení ve stavu suspenze stoupla, v případě bentonitu Rokle došlo k poklesu meze tekutosti po tepelném zatížení suspenze.

Mikrobiologická data nebylo možné statisticky zhodnotit z důvodů jejich specifického způsobu prezentování v publikovaných výstupech (grafická podoba) a nashromážděná data tedy byla analyzována spíše kvalitativně. Byly analyzovány mikrobiologické charakterizace vstupních materiálů, byl porovnáván rozvoj mikrobiální aktivity ve vzorcích inkubovaných za různých podmínek prostředí potencujících rozvoj mikrobiálního osídlení a dále bylo studováno omezení mikrobiální aktivity vlivem různých limitujících podmínek vnějšího prostředí (teplota, kompaktizace, záření atd.). Nashromážděná data ukázala, že z mikrobiologického hlediska je míra poznání bentonitů velmi rozdílná. K nejprozkoumanějším jednoznačně patří bentonit BCV, interpretovatelné množství dat existuje dále v řadě ohledů také k bentonitu BaM. Bentonity Rokle a B75 jsou mikrobiologicky prozkoumané jen velmi málo a ostatní materiály z této zprávy nebyly zkoumané vůbec.

Mikrobiologická analýza vstupních materiálů ukázala na velkou nekonzistentnost v prováděných analýzách znemožňující porovnání mezi bentonity a nutnost vývoje standardního postupu pro charakterizaci vstupního materiálu. Analýza inkubovaných vzorků se ukázala být velice cenným

nástrojem pro pochopení mikrobiologického potenciálu studovaného bentonitu v různých podmínkách prostředí a definované způsoby inkubace by měly být součástí vstupní charakterizace studovaného materiálu. U inkubovaných bentonitů BaM a BCV byl detekován rozvoj fakultativně anaerobních NRB v aerobních suspenzích či postupný rozvoj fakultativně anaerobních mikroorganismů jako jsou IRB či SRB v suspenzích anaerobních. Přesné složení vzorků se vždy lišilo v závislosti na typu bentonitu a délce inkubace. Pro vysledování obecných trendů ve vývoji mikrobiálních komunit v bentonitu by bylo vhodné provázat data o vývoji mikroorganismů v různých typech inkubovaných českých bentonitů s jejich chemickým složením, neboť chemismus prostředí je jedním ze zásadních faktorů ovlivňujících rozvoj mikrobiální aktivity. Testování různých limitních podmínek se mezi jednotlivými bentonity opět velmi lišilo a překryv mezi různými typy bentonitů je tedy omezený. Alespoň omezené zhodnocení efektů napříč různými bentonity (min dva různé typy) bylo tedy možné provést pouze u ozařování, aplikace externího tlaku a kompaktizace. Vliv ozařování je pro mikrobiální aktivitu zcela jistě významný a zdá se být vyšší v suchém bentonitu než v suspenzích. Aplikace externího tlaku až do výše 15 MPa pravděpodobně nemá žádný vliv na rozvoj mikrobiální aktivity a limitní hodnota objemové hmotnosti pro potlačení mikrobiální aktivity se liší u jednotlivých bentonitů a měla by být předmětem cílených analýz u každého experimentálně používaného typu bentonitu, neboť její znalost je jedním ze základních bezpečnostních kritérií HÚ RAO.

Heterogenita dat neumožňuje zhodnocení stability bentonitu. Z tohoto důvodu bylo po dohodě s objednatelem projektu přistoupeno k rozdělení statistického zpracování do dvou částí. Stávající zpráva (č. zprávy 624/2022) bude v budoucnu sloužit pouze jako podkladová (datová) zpráva.

V následující části (č. zprávy TZ 632/2022) bude proveden výběr dat. Z bentonitů budou vybrány pouze ty, u kterých byla na počátku jejich zpracování provedena homogenizace v celém objemu (bentonity B75, BaM a BCV, Rokle kopaná). Metody budou vybrány s ohledem na: dostatek dat pro OS i NS; jeden (max. dva) druhy analýzy pro danou analytickou metodu.

Jako málo reprezentativní nebo málo citlivé považujeme metody SWEP_CLT (metoda není reprezentativní a není u ní dostatek dat), WL stanovený Cassagrandeho metodou (nepřesná metoda) a SSA_BET (nelze pomocí ní charakterizovat celkový specifický povrch).

U ovlivněného stavu bentonitu budou vyloučeny parametry, které nepřinášejí zásadní informace ve vztahu ke změnám bentonitu v důsledku jeho zatížení: THC, HEC, SpD a RC.

4 Reference

- ASTM D 5890–11: Standard Test Method for Swell Index of Clay Mineral Component of Geosynthetic Clay Liners, 2011
- 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.
- BENGTSSON, A. & PEDERSEN, K. (2017): Microbial sulphide-producing activity in water saturated Wyoming MX-80, Asha and Calcigel bentonites at wet densities from 1500 to 2000kgm⁻³. Applied Clay Science 137: 203–212. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.12.024>
- 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.
- CARLSON L. (2004): Bentonite Mineralogy Part 1: Methods of Investigation-ali terature Review Part 2: Mineralogical Research of Selected Bentonites. Posiva Working Report 2004-02, POSIVA, Olkiluoto, Finsko.
- CARLSON L, KETO P. (2006): Verification of Substitution of Bentonites by Montmorillonitic Clays, Summary Report on Czech Montmorillonitic Clays. POSIVA Working Report 2006-62. POSIVA, Olkiluoto, Finsko.
- 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. (2021): 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. SÚRAO, 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. ZL Transport 3_2.PZ. SÚRAO TZ 24/2015, Praha
- ČERVINKA R., VOPÁLKA D. A KOL. (2016): Transport radionuklidů z úložiště / Vstupní parametry a procesní modely pro hodnocení transportu radionuklidů přes inženýrské bariéry. ZL Transport 3_3.PZ SÚRAO TZ 51/2016
- ČERVINKA, R., VAŠÍČEK, R., VEČERNÍK, P. & KAŠPAR, V. (2018): SÚRAO report 419/2019: Kompletní charakterizace bentonitu BCV 2017
- ČERVINKA R., VOPÁLKA D. A KOL. (2019): Transport radionuklidů z ložiště / Vstupní parametry a procesní modely pro zhodnocení transportu radionuklidů přes inženýrské bariéry. 2. Průběžná zpráva. ZL TRANSPORT 3_4.PZ. SÚRAO TZ 352/2019
- ČERNOCHOVÁ K., KAŠPAR V., KRUIS J., MAŠÍN D., NAJSER J., SVOBODA, J., VAŠÍČEK, R. (2021): WP 7 HITEC: Souhrn výstupů českých stran projektu EURAD, SÚRAO TZ 562/2021, Praha. str. 71
- DIETEL J., UFER K., KAUFHOLD S., DOHRMANN R. (2019): Crystal structure model development for soil clay minerals – II. Quantification and characterization of hydroxy-interlayered smectite (HIS) using the Rietveld refinement technique. Geoderma 347, 1-12.
- 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: II. Alternative Methods. Clays and Clay Minerals 60, 176–185.

- EYDAL, H. S. C. & PEDERSEN, K. (2007): Use of an ATP assay to determine viable microbial biomass in Fennoscandian Shield groundwater from depths of 3–1000 m. *Journal of Microbiological Methods* 70(2): 363–373.
- FARDEAU, M.-L., BARSOTTI, V., CAYOL, J.-L., GUASCO, S., MICHOTÉY, 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. 10.1557/PROC-663-573.
- FERNÁNDEZ R., RUIZ A. I., CUEVAS J. (2014): The role of smectite composition on the hyperalkaline alteration of bentonite. *Applied Clay Science* 95: 83–94.
- FRANČE J. (1992): Bentonity ve východní části Doupovských hor. – Sborník geol. věd, Ložisková geologie, mineralogie. 30, 43–90.
- 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.
- HALLBECK, L. & PEDERSEN, K. (2012): Culture-dependent comparison of microbial diversity in deep granitic groundwater from two sites considered for a Swedish final repository of spent nuclear fuel. *FEMS Microbiology Ecology* 81(1): 66–77. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2011.01281.x>
- HILSEN R. E., KOURNIKAKIS B., FORD B. (2005): Inactivation of Microorganisms by Gamma Irradiation. *Bacillus atropeus* spores and *Erwinia herbicola*. Technical Memorandum DRDC Suffield TM 2005-235. Defence Research and Development Canada.
- 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., DOHRMANN R., UFER K., MEYER F.M. (2012): Comparison of methods for the quantification of montmorillonite in bentonites. *Applied Clay Science* 22(3): 145-151.
- KOLAŘÍKOVÁ I., ŠVANDOVÁ J., PŘIKRYL R., VINŠOVÁ H., JEDINÁKOVÁ-KŘÍŽOVÁ V., ZEMAN J. (2010): Mineralogical changes in bentonite barrier within Mock-Up-CZ experiment. *Applied Clay Science* 47(1–2): 10-15.
- KŘÍŽOVÁ V., PŘIKRYL R., ZEMAN J. (2006a): Mineralogický, chemický a geochemický výzkum stability dlouhodobě tepelně zatíženého materiálu bentonitové bariéry na vzorcích získaných z experimentu MOCK-UP-CZ. Průběžná technická zpráva č. 2. SÚRAO 2006/018/Kunc SÚRAO TZ 14/06. VŠCHT v Praze.
- KŘÍŽOVÁ V., PŘIKRYL R., ZEMAN (2006b): Mineralogický, chemický a geochemický výzkum stability dlouhodobě tepelně zatíženého materiálu bentonitové bariéry na vzorcích získaných z experimentu MOCK-UP-CZ. Průběžná technická zpráva č. 3. SÚRAO 2006/018/Kunc SÚRAO TZ 62/06. VŠCHT v Praze.
- KŘÍŽOVÁ V., VINŠOVÁ H., PŘIKRYL R., HANUSOVÁ I., ADAMCOVÁ J., ZEMAN J. (2008a): Mineralogický, chemický a geochemický výzkum stability dlouhodobě tepelně zatíženého materiálu bentonitové bariéry na vzorcích získaných z experimentu MOCK-UP-CZ. Závěrečná zpráva. SÚRAO 2006/018/Kunc SÚRAO TZ 5/08. VŠCHT v Praze.
- KŘÍŽOVÁ V., VINŠOVÁ H., PŘIKRYL R., ZEMAN J. Hanuláková D. (2008b): Sledování dlouhodobé stability inženýrských bariér na bázi bentonitu s využitím zatěžovacích procedur a experimentů „in situ“ a hodnocení jejich retardační funkce. Stručná zpráva č. 1. SÚRAO 2008/024/Šu. VŠCHT v Praze.
- KŘÍŽOVÁ V., VINŠOVÁ H., VÍDENSÁ 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.
- Muurinen A., Carlsson T. (2013) Bentonite Pore Structure Based on SAXS, Chloride Exclusion and NMR Studies. VTT Working Report 2013-53.
- NAJSER J. A KOL. (2020): Výsledky laboratorních zkoušek bentonitu „BCV“ za laboratorní teploty. TAČR TK01010063. Odborná studie. Univerzita Karlova v Praze.
- NAJSER J., MAŠÍN D., SVOBODA J., VAŠÍČEK R., ČERNOCHOVÁ K. A KOL. (2021): Výsledky laboratorních zkoušek bentonitu „BCV“ za zvýšené teploty do 80 °C. TA ČR TK01010063. Odborná studie. Univerzita Karlova v Praze.
- 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 ET AL. (2004a): Verification of Substitution of Bentonites by Montmorillonitic Clays. Order No.: 101 502. SÚRAO TZ 17/04. Centre of experimental geotechnics CTU in Prague.
- PACOVSKÝ J. ET AL. (2004b) Verification of replacing bentonite by montmorillonitic clays_Final report, SÚRAO TZ 40/04. Order No.: 101 502. SÚRAO TZ 40/04. Centre of experimental geotechnics CTU in Prague.

- PACOVSKÝ J., SVOBODA J. (2007a): Fyzikální modelování – Uplatnění přírodních bentonitů. Analýza, vývoj a experimentální ověření materiálů na bázi bentonitů a smektitických jíílů. Dílčí výzkumná zpráva za rok 2007. SÚRAO TZ 50/07. CIDEAS – Centrum integrovaného navrhování progresivních stavebních konstrukcí.
- PACOVSKÝ J., MATĚJKA P., MANDL M., SEDLÁČEK I. (2007b): Geotechnický, bakteriologický a korozní výzkum dlouhodobě tepelně zatíženého materiálu bentonitové bariéry při saturaci syntetickou granitickou vodou. Zpráva o plnění k 15.11.2007. MOCK-UP-CZ. SÚRAO 2006/017/Kunc. Centrum experimentální geotechniky ČVUT v Praze.
- PACOVSKÝ J., SVOBODA J., MATĚJKA P., ČLUPEK M., ZEMAN J., MANDL M., SEDLÁČEK I. (2008): Geotechnický, bakteriologický a korozní výzkum dlouhodobě zatíženého materiálu bentonitové bariéry při saturaci syntetickou granitickou vodou. Závěrečná zpráva. Dismantling experimentu MOCK-UP-CZ. SÚRAO 2006/017/Kunc. SÚRAO TZ 08/08. Centrum experimentální geotechniky ČVUT v Praze.
- PACOVSKÝ J., VAŠÍČEK R., HAUSMANNOVÁ L. (2010a): 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.
- PACOVSKÝ J., VAŠÍČEK R., HAUSMANNOVÁ L. (2010b): Geotechnický výzkum přírodních zelených jíílů miocénního cyprisového souvrství z lokality Skalná - Nová Ves. Zpráva o plnění č. 1. SO2010-070. SÚRAO TZ 33/2010. Centrum experimentální geotechniky ČVUT v Praze.
- PACOVSKÝ J., VAŠÍČEK R., HAUSMANNOVÁ L. (2011): Geotechnický výzkum přírodních zelených jíílů miocénního cyprisového souvrství z lokality Skalná - Nová Ves. Závěrečná zpráva. SO2010-070. SÚRAO TZ 33/2011. Centrum experimentální geotechniky ČVUT v Praze.
- 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.
- 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.
- 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., VAŠÍČEK R., ŠTÁSTKA J., NÁDHERNÁ D., PACOVSKÁ D., PACOVSKÝ J. (2019a): Experimentální hodnocení plynopropustnosti inženýrských bariér hlubinného úložiště – Závěrečná zpráva. Výzkumná podpora pro bezpečnostní hodnocení hlubinného úložiště. SÚRAO TZ 384/2019. ČVUT v Praze.
- SVOBODA J., VAŠÍČEK R., PACOVSKÁ D., ŠTÁSTKA J., FRANĚK J., RUKAVIČKOVÁ L., VEČERNÍK P., ČERVINKA R., NAHODILOVÁ R., LAUFEK F., ŘIHOŠEK J., BURIÁNEK D. (2019b): Interakční experiment – Přípravné a podpůrné práce. Průběžná zpráva. Interakční fyzikální modely in-situ v PVP Bukov. SÚRAO TZ 385/2019. ČVUT v Praze.
- ŠACHLOVÁ Š., ČERNOCHOVÁ K., ČERNÁ K., SVOBODA J., VAŠÍČEK R., MACKOVÁ D., HAVLOVÁ V., ZUNA M., KOLKOVÁ K., STIBLÍKOVÁ P., HLAVÁČKOVÁ V. (draft): Analýza českých bentonitů – Vyhodnocení dat z databáze (podkladová zpráva), Zpráva SÚRAO 624/2022, Praha.
- ŠEVCŮ A., STEINOVÁ J., BURKARTOVÁ K., ČERNÁ K. (2018): Microbial diversity in aged bentonites. MIND Project.
- ŠTÁSTKA J., PACOVSKÝ J., SVOBODA J., VAŠÍČEK R. (2018) Závěrečná zpráva Mock-up-Josef (2011-2018). Závěrečná zpráva k projektu. SÚRAO TZ 2014-3047. Centrum experimentální geotechniky ČVUT v Praze.
- ŠTÁSTKA J., HANUSOVÁ I., HAUSMANNOVÁ L., KUČEROVÁ M. (2022): In-situ testing of Czech bentonite for radioactive waste disposal in Mock-up Josef experiment. Annals of Nuclear Energy 172: 109059.
- 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.
- UFER K., STANJEK H., ROTH G., DOHRMANN R., KLEEGERG R., KAUFHOLD S. (2008): Quantitative phase analysis of bentonites by the Rietveld method. Clays and Clay Minerals 56. 272-282. 10.1346/CCMN.2008.0560210.
- VAŠÍČEK R. (2017): LABORATORNÍ ZKOUŠKY NA BENTONITU BAM. SÚRAO Č. BAM 0V2017-6132. CENTRUM EXPERIMENTÁLNÍ GEOTECHNIKY ČVUT V PRAZE.
- 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., PACOVSKÝ J., HAUSMANNOVÁ L., SVOBODA J., HOLÍKOVÁ P., KAISR Z., SMUTEK J., LEVOROVÁ M., VENKRBEC Z. (2011): Výsledky řešení projektu FR-TI1/362 na CEG FSV ČVUT v Praze v r. 2011 - „Výzkum vlastností materiálů pro bezpečné ukládání radioaktivních odpadů a vývoj postupů jejich hodnocení“. 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., LEVOROVÁ M., HAUSMANNOVÁ L., ŠTÁSTKA J., VEČERNÍK P., GONDOLLI J., TRPKOŠOVÁ D. (2014): D3.17 Interim results of EPSP laboratory testing. DOPAS Deliverable n 3.17. Centrum experimentální geotechniky ČVUT v Praze.
- VAŠÍČEK R., HAUSMANNOVÁ L., ŠTÁSTKA 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., HOFMANOVÁ E., SVOBODA J., ČERVINKA R. (2019): Geotechnická charakterizace homoionních forem bentonitu BCV 2017. Závěrečná zpráva – samostatná příloha. Výzkumná podpora pro bezpečnostní hodnocení hlubinného úložiště. ZL Transport 3. SÚRAO TZ 425/2019. ÚJV Řež, a.s.
- 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.
- 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.

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.
- DOPAS (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
- 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

MIND (2015-2019) Development of the safety case knowledge base about the influence of microbial processes on geological disposal of radioactive wastes (MIND), Číslo projektu: 661880, Financování: Evropská komise v programu Euratom/Horizon2020.

ZL-MIC (2014-2019) Výzkumná podpora pro bezpečnostní hodnocení hlubinného úložiště - Chování UOS pro VJP a RAO / Mikrobiální koroze (ZL-MIC), Číslo smlouvy: SO2014-061, Financování: SÚRAO.

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

MOCK-UP-JOSEF (2011 – 2018), Číslo Smlouvy SÚRAO: SO 2011-21, Financování: SÚRAO.

Výzkum vlastností materiálů pro bezpečné ukládání radioaktivních odpadů a vývoj postupů jejich hodnocení (2009-2013), Financování: MPO TIP č. FR-TI1/362.

Ověřování nahraditelnosti bentonitů montmorilonitickými jíly (2003-2004), č. smlouvy 101 502, SÚRAO

ZL-KP (2014-2019) Výzkumná podpora pro bezpečnostní hodnocení hlubinného úložiště – Chování UOS pro VJP a RAO / Korozní produkty (ZL-KP), Číslo smlouvy: SO2014-061, Financování: SÚRAO.



SÚRAO

SPRÁVA ÚLOŽIŠŤ
RADIOAKTIVNÍCH
ODPADŮ

NAŠE
BEZPEČNÁ
BUDOUCNOST

www.surao.cz