

Technická zpráva číslo 425/2019

**GEOTECHNICKÁ
CHARAKTERIZACE
HOMOIONNÍCH FOREM
BENTONITU BCV 2017
ZÁVĚREČNÁ ZPRÁVA –
SAMOSTATNÁ PŘÍLOHA**

Autoři: Ing. Radek Vašíček, Ph.D., Ing. Eva
Hofmanová, Ph.D.,
a kolektiv

ÚJV Řež, a. s.

Praha, prosinec 2019

Název projektu: Výzkumná podpora pro bezpečnostní hodnocení hlubinného úložiště

Název dílčího projektu: Transport radionuklidů z úložiště / Vstupní parametry a procesní modely pro hodnocení transportu radionuklidů přes inženýrské bariéry

Název zprávy: Geotechnická charakterizace homoionních forem bentonitu BCV 2017

Závěrečná zpráva – Samostatná příloha

Evidenční číslo objednatele: SÚRAO TZ 425/2019

Evidenční číslo poskytovatele: PB-2019-ZZ-S2565-013-Transport3_Priloha_HomoionniJily

ŘEŠITELÉ:

CEG FSv ČVUT v Praze ¹, ÚJV Řež, a. s. ²

Autoři: Ing. Radek Vašíček, Ph. D. ¹, Ing. Eva Hofmanová, Ph. D. ²

Autorský kolektiv: Radek Vašíček¹, Jiří Svoboda¹, Eva Hofmanová², Radek Červinka²



SÚRAO

Obsah

1	Úvod	9
2	Výsledky geotechnických zkoušek	10
2.1	Swell index	10
2.2	Mez tekutosti	11
2.3	Součinitel hydraulické vodivosti a bobtnací tlak	12
2.3.1	Součinitel hydraulické vodivosti	13
2.3.2	Bobtnací tlak	16
2.4	Zhodnocení vlivu vyměnitelného kationtu na geotechnické vlastnosti	19
3	Závěr	23
4	Reference	24

Seznam obrázků:

Obr. 1	Swell index po 24 h - zleva BCV_2017, Ca-BCV, Na/Ca-BCV, Na-BCV	11
Obr. 2	Swell index po 24 h, detail rozhraní bentonit/ voda - zleva BCV_2017, Ca-BCV, Na/Ca-BCV, Na-BCV	11
Obr. 3	Závislost součinitele hydraulické vodivosti na objemové hmotnosti	14
Obr. 4	Závislost součinitele hydraulické vodivosti na objemové hmotnosti v semilogaritmickém měřítku	14
Obr. 5	Závislost součinitele hydraulické vodivosti na objemové hmotnosti; porovnání s BCV_2017, BaM_2014	15
Obr. 6	Závislost součinitele hydraulické vodivosti na objemové hmotnosti v semilogaritmickém měřítku; porovnání s BCV_2017, BaM_2014	15
Obr. 7	Závislost bobtnacího tlaku na objemové hmotnosti	16
Obr. 8	Závislost bobtnacího tlaku na objemové hmotnosti v semilogaritmickém měřítku	17
Obr. 9	Závislost bobtnacího tlaku na objemové hmotnosti; porovnání s BCV_2017 a BaM_2014	18
Obr. 10	Závislost bobtnacího tlaku na objemové hmotnosti v semilogaritmickém měřítku; porovnání s BCV_2017 a BaM_2014	18
Obr. 11	Změny hodnot (A) swell indexu a meze tekutosti v závislosti na podílu monovalentních kationtů (včetně materiálů BaM a BCV) a procentuální změny (B) oproti Ca-formě	19
Obr. 12	Změny hodnot (A) bobtnacího tlaku v závislosti na podílu monovalentních kationtů a procentuální změny (B) oproti Ca-formě	20
Obr. 13	Změny hodnot (A) součinitele hydraulické vodivosti v závislosti na podílu monovalentních kationtů a procentuální změny (B) oproti Ca-formě	20

Seznam tabulek:


Tab. 1 Výsledky stanovení obsazení kationtů na výměnných místech a kationtově-výměnné kapacity studovaných materiálů. Uvedená hodnota CEC odpovídá stanovení z úbytku mědi pomocí UV-VIS spektrofotometrie.	9
Tab. 2 Přehled výsledků swell indexu studovaných materiálů (ml/2 g) a výchozího bentonitu.	10
Tab. 3 Přehled výsledků meze tekutosti w_L (%).	12
Tab. 4 Výsledky stanovení součinitele hydraulické vodivosti a bobtnacího tlaku.....	13

Seznam elektronických příloh:

Příloha 1: Stanovení swell indexu


Příloha 2: Stanovení meze tekutosti

Příloha 3 Stanovení součinitele hydraulické vodivosti a bobtnacího tlaku

 SÚRAO	Geotechnická charakterizace homoionních forem bentonitu BCV	Evidenční označení:
	Závěrečná zpráva-samostatná příloha	SÚRAO TZ 425/2019

Seznam použitých zkratk:

BCV / BaM	bentonity – komerční produkty firmy KERAMOST, a. s. (Bentonit Černý vrch / Bentonit a Montmorillonit)
CEC	kationtová výměnná kapacita (<i>cation exchange capacity</i>)
CEG FSv ČVUT	Centrum experimentální geotechniky, Fakulta stavební, České vysoké učení technické v Praze
EMDD	efektivní objemová hmotnost montmorillonitu (<i>effective montmorillonite dry density</i>)
HÚ	hlubinné úložiště
SI	swell index
SSA	specifický měrný povrch (<i>specific surface area</i>)
SÚRAO	Správa úložišť radioaktivních odpadů
ÚJV	oddělení Chemie palivového cyklu, ÚJV Řež, a. s.

 SÚRAO	Geotechnická charakterizace homoionních forem bentonitu BCV	Evidenční označení:
	Závěrečná zpráva-samostatná příloha	SÚRAO TZ 425/2019

Abstrakt

Tato samostatná příloha závěrečné zprávy ZL Transport3 pojednává o geotechnické charakterizaci forem bentonitu BCV – sodné (Na-BCV), vápenaté (Ca-BCV) a směsné (Na/Ca-BCV) s cílem identifikovat vliv zastoupení vyměnitelných kationtů. Byly měřeny tyto klíčové geotechnické parametry: swell index, mez tekutosti a závislost bobtnacího tlaku a hydraulické vodivosti v intervalu objemových hmotností $\rho_d \sim 1350-1750 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Citlivost těchto parametrů na zastoupení vyměnitelných kationtů klesala se vzrůstající objemovou hmotností. Od objemové hmotnosti $\sim 1500 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ nebyly pozorovány žádné významné změny v geotechnickém chování studovaných materiálů.

Klíčová slova


bentonit BCV, geotechnické chování, vyměnitelný kationt

Abstract

This stand-alone supplement of the final report of subproject Transport3 discusses the geotechnical characterization of forms of bentonite BCV - sodium (Na-BCV), calcium (Ca-BCV) and mixed (Na/Ca-BCV) forms to identify the impact of exchangeable cations. The following key geotechnical parameters were measured: swell index, liquid limit, and dependence of swelling pressure and hydraulic conductivity on the dry density in the range of $1350-1750 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. The sensitivity of these parameters on the population of exchangeable cations decreased with increasing dry density. No significant changes in the geotechnical behaviour of the studied materials were observed above dry density $\sim 1500 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

Keywords

bentonite BCV, geotechnical behaviour, exchangeable cation

	Geotechnická charakterizace homoionních forem bentonitu BCV Závěrečná zpráva-samostatná příloha	Evidenční označení: SÚRAO TZ 425/2019

1 Úvod

Na konci roku 2017 byl zadavatelem (SÚRAO) zvolen nový bentonit s označením BCV_2017 (ložisko Černý vrch, Keramost, a. s.), který byl převzat ÚJV, a. s. k detailní charakterizaci (Červinka et al. 2018). Byly stanoveny vybrané geochemické (silikátová a fázová analýza, CEC, SSA, výluhy apod.) a geotechnické vlastnosti (součinitel hydraulické a tepelná vodivost, bobtnací tlak, mez tekutosti apod.).

V průběhu řešení ZL Transport3 vyvstal požadavek na stanovení vybraných geotechnických parametrů homoionních bentonitů (Na a Ca-forma, mix obou forem 50/50) vedle difúzních vlastností. Jako zdrojový bentonit byl zvolen BCV_2017 (zatímco difúzní studie byly provedeny na homoionních formách bentonitu BaM_2014). V rámci dalšího rozšíření tohoto ZL (Dodatek 2) byly v první polovině r. 2019 připraveny homoionní formy bentonitu BCV_2017 (postup přípravy viz Červinka et al. (2015), připraveno ca. 300 g), které byly následně podrobeny geotechnickým zkouškám v CEG (květen–červenec 2019). Vzhledem k technické a časové náročnosti přípravy materiálů a potřebě relativně velkého množství pro geotechnické zkoušky bylo nutné přistoupit k znovuvyužití materiálů po zkouškách předchozích. Stanovení meze tekutosti bylo proto provedeno s každým materiálem dvakrát, poprvé s „čerstvým“ a podruhé s materiálem „recyklovaným“ po předchozí zkoušce, jehož část byla krátkodobě vysušena při 105–110 °C a část znovuvyužita se „vstupní“ vlhkostí nad úrovní meze tekutosti (140 % a více).

Kontrola přípravy homoionních forem bentonitu byla provedena stanovením obsazení kationtů na výměnných místech pomocí Cu(II)-trienu (Červinka 2014), viz Tab. 1.

- BCV_Na_1/4/2019 dále značen jako Na-BCV
- BCV_Ca_25/3/2019 dále značen jako Ca-BCV a
- BCV_Na/Ca_17/4/2019 dále značen jako Na/Ca-BCV.

Je vidět, že nebylo dosaženo plné výměny za sodík u Na-BCV. U všech připravených forem zůstal hořčík i draslík v iontovýměnném komplexu. Označení homoionní není tedy přesné, ale spíše bentonit s dominantním zastoupením daného kationtu. Tab. 1 také prezentuje srovnání s výchozím bentonitem, BCV_2017 (Červinka et al. 2018), a hlavním bentonitem studovaným v tomto projektu, BaM_2014 (Červinka et al. 2015).

Tab. 1 Výsledky stanovení obsazení kationtů na výměnných místech a kationtově-výměnné kapacity studovaných materiálů. Uvedená hodnota CEC odpovídá stanovení z úbytku mědi pomocí UV-VIS spektrofotometrie.

	Na-BCV dominantně Na ⁺	Ca-BCV dominantně Ca ²⁺	Na/Ca-BCV mix Na ⁺ /Ca ²⁺ 50/50	BCV_2017	BaM_2014
Na ⁺ (%)	78	1	42	11	7
Ca ²⁺ (%)	16	95	53	23	23
K ⁺ (%)	2	3	2	2	6
Mg ²⁺ (%)	4	2	3	64	64
CEC _{Cu-VIS} (mmol ⁺ ·100 g ⁻¹)	60,8 ± 3,4	62,0 ± 3,9	62,3 ± 0,7	60,9 ± 1,1	61,2 ± 2,0

2 Výsledky geotechnických zkoušek

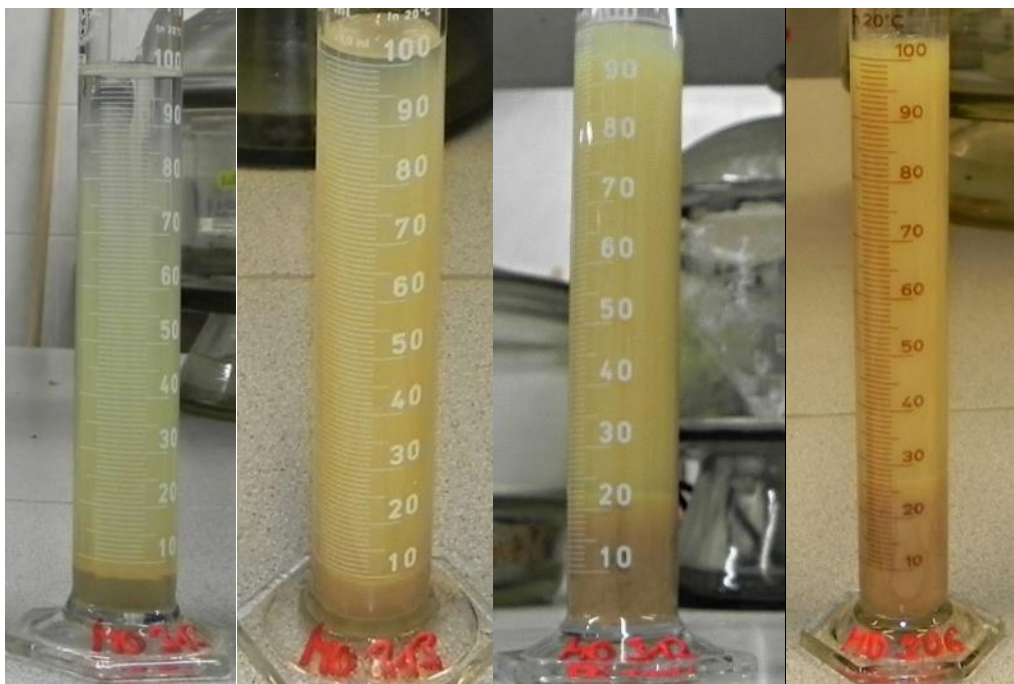
2.1 Swell index

Stanovení swell indexu (SI, ml/2 g) bylo provedeno dle „ASTM D5890 – 11. Standard Test Method for Swell Index of Clay Mineral Component of Geosynthetic Clay Liners“. Výsledná hodnota uvádí objem 2 gramů vysušeného materiálu po jednodenním nabobtnání (24 h). Nad rámec předpisu byl proveden i odečet po 48 h. Byla použita destilovaná voda. Bylo tak možno předpokládat stanovení maximálních hodnot u jednotlivých forem bentonitu i maximálních rozdílů mezi nimi (např. Ahmed et al. 2016; Jenni a Mäder 2018). Pro každý materiál bylo provedeno pět zkoušek, výsledkem je průměrná hodnota (záznamy zkoušek SI008-SI010, Příloha 1), viz Tab. 2.

Tab. 2 Přehled výsledků swell indexu studovaných materiálů (ml/2 g) a výchozího bentonitu.

	Na-BCV	Na/Ca-BCV	Ca-BCV	BCV
SI_24 h	22,8 ± 1,3	18,2 ± 0,5	7,5 ± 0,5	7,9 ± 0,5
SI_48 h	23,6 ± 1,5	19,0 ± 0,8	7,5 ± 0,5	

Výsledky tohoto jednoduchého testu jasně ukazují významné rozdíly ve volném bobtnání Na- a Ca-formy. Dále je patrné, že hodnota swell indexu zdrojového bentonitu je blízká jeho Ca-formě. Hodnota pro Na-BCV je cca trojnásobná oproti Ca-BCV i zdrojovému BCV. Výsledek pro směsný materiál Na/Ca-BCV (fakticky 42/53, viz Tab. 1) neleží uprostřed intervalu Ca-Na, ale významně blíže k Na-BCV. Obr. 1 a Obr. 2 (detail) ukazují odměrné válce v době 1. odečtu (tj. po 24 h). Při porovnání hodnot odečtených po 24 h a 48 h je zřejmé, že Ca-BCV má objem nabobtnalého bentonitu stabilní již po 24 h, kdežto při zvýšeném podílu Na⁺ (Na/Ca-BCV, Na-BCV) objem mírně roste (o cca 4 %). Birgersson et al. (2009) sledovali volné bobtnání Na- a Ca-formy bentonitu Wyoming v mnohem delším časovém horizontu. Na-forma zvětšovala svůj objem i po 60ti dnech (na úrovni takřka čtyřnásobku hodnoty po jednom dni, zatímco Ca-forma prakticky po prvním dni bobtnat přestala). Také u směsného vzorku (Na/Ca 20/80) nedošlo za dobu 60 dnů k ustálení bobtnání. I přes nízké zastoupení sodíku v tomto vzorku, absolutní hodnota SI leželo v cca v polovině intervalu mezi Na- a Ca-formou.




Obr. 1 Swell index po 24 h - zleva BCV_2017, Ca-BCV, Na/Ca-BCV, Na-BCV.



Obr. 2 Swell index po 24 h, detail rozhraní bentonit/ voda - zleva BCV_2017, Ca-BCV, Na/Ca-BCV, Na-BCV.

2.2 Mez tekutosti

Stanovení meze tekutosti (w_L , %) bylo provedeno podle ČSN EN ISO 17892-12. *Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemín – Část 12: Stanovení meze tekutosti a meze plasticity*. Stanovení bylo pro každý materiál provedeno na dvou vzorcích (záznamy wL082-87; Příloha 2) – s výchozím „čerstvým“ materiálem a s „recyklovaným“ materiálem, kdy část materiálu byl pro druhou zkoušku použit ze zkoušky předchozí ($w > w_L$) a současně jeho část byla krátkodobě vysušena při 105–110 °C. Zkouška byla provedena jako akreditovaná s protokolem o zkoušce č. 182001/2019 (Příloha 2). Byla použita destilovaná voda. Vzhledem k použití destilované vody se naměřené hodnoty, resp. rozdíly mezi materiály, lze považovat za maximální, při využití vody s obsahem rozpuštěných solí lze očekávat hodnoty nižší. Výsledky stanovení meze tekutosti pro oba typy vzorků studovaných materiálů jsou shrnuty v Tab. 3 spolu s výchozím bentonitem BCV_2017 a BaM_2014.

	Geotechnická charakterizace homoionních forem bentonitu BCV	Evidenční označení:
	Závěrečná zpráva-samostatná příloha	SÚRAO TZ 425/2019

Tab. 3 Přehled výsledků meze tekutosti w_L (%).

	vzorek		reference
	čerstvý	recyklovaný	
Na-BCV	307,4 ± 4,9	299,0 ± 4,8	tato zpráva
Na/Ca-BCV	260,8 ± 4,2	269,7 ± 4,3	tato zpráva
Ca-BCV	137,7 ± 2,2	132,7 ± 2,1	tato zpráva
BCV_2017	140,2 ± 2,2	x	Červinka et al. (2018) Svoboda et al. (2019)
BaM_2014	124,2 ± 2,0	x	Vašíček (2017)


Z přehledu výsledků v Tab. 3 je zřejmé, že hodnoty w_L pro zdrojový BCV_2017 leží v intervalu vymezeném koncovými členy (Ca-BCV vs. Na-BCV), avšak, stejně jako u swell indexu, velmi těsně k hranici intervalu dané Ca-formou (Ca-BCV). Mez tekutosti pro Na-BCV byla stanovena více než dvojnásobná než pro Ca-BCV (2,2x). Výsledky pro smíšenou formu Na/Ca-BCV jsou, opět jako u swell indexu, v horní polovině intervalu vymezeného hraničními formami.

Důvodem pro znovuvyužití – recyklaci materiálu byla možnost získat alespoň dva výsledky na každém z nich. Pouze čerstvý materiál pro obě zkoušky nebyl využit kvůli potřebě poměrně velkého množství (cca 150 g) a současně velké časové a finanční náročnosti jejich přípravy. Současně bylo předpokládáno, že mez tekutosti u recyklovaných vzorků nebude sušením, nutným pro vyhodnocení zkoušky, výrazně ovlivněna. Předpoklad se zakládal na faktu, že vysušená (105-110 °C/ 24 h) byla pouze menší část vzorku z předchozí zkoušky (20-30 g z cca 150 g). Na druhou stranu, zbytek materiálu byl po předchozí zkoušce ponechán ve vlhkém stavu odpovídajícím stavu při ukončení předchozí zkoušky. Rozmícháním s vysušeným materiálem byl získán materiál vstupní pro zkoušku další, a to s penetrací blízkou dolní mezi pro zahájení zkoušky následující. Při porovnání výsledků w_L pro materiál čerstvý a recyklovaný (Tab. 3) není vidět významný rozdíl. Lze tedy konstatovat, že provedením druhé sady zkoušek na recyklovaném materiálu bylo přínosné, neboť rozšiřuje počet výsledků na každé z forem bentonitu.

2.3 Součinitel hydraulické vodivosti a bobtnací tlak

Na kompakovaných válcových vzorcích studovaných materiálů o rozměrech $d = 30$ mm a $L = 20$ mm byla provedena stanovení součinitele hydraulické vodivosti k ($m \cdot s^{-1}$) a bobtnacího tlaku σ_{sw} (MPa) souběžně, tj. na totožných vzorcích, podle interní neakreditované metodiky CEG FSv ČVUT č. OL 182/21, 22 (Vašíček a Hausmannová 2012) vycházející z ČSN CEN ISO/TS 17892-11. Stanovení k a σ_{sw} bylo provedeno pro každý ze tří studovaných materiálů, v souladu se zadáním ZL, pro pět různých objemových hmotností ρ_d v rozsahu cca 1350–1750 $kg \cdot m^{-3}$. V případě Na-BCV byl ještě navíc proveden test při cca 1100 $kg \cdot m^{-3}$. Pro výchozí bentonit BCV_2017 byla využita data z Červinka a kol. (2018) a Svoboda a kol. (2019).

Při zkouškách byl aplikován konstantní sytící tlak cca 1 MPa, vyvíjený tlakovou lahví s argonem. Tlak je ve vodním zásobníku přenášen na destilovanou vodu, která následně sytí vzorek. Zpětný tlak (backpressure) nebyl aplikován, tj. byl roven tlaku atmosférickému. Vzhledem k použití destilované vody k syčení během zkoušky se naměřené hodnoty bobtnacího tlaku jeví jako maximální, při použití sytícího media s obsahem rozpuštěných solí lze očekávat hodnoty nižší. U hydraulické vodivosti se předpokládá efekt opačný (Karnland et al. 2006; Pusch 2001; Jenni a Mäder (2018)).

	Geotechnická charakterizace homoionních forem bentonitu BCV	Evidenční označení:
	Závěrečná zpráva-samostatná příloha	SÚRAO TZ 425/2019

Záznam z testů je uveden v Příloze 3 (protokoly P708-712 a P725 (Na-BCV); P713-P717 (Ca-BCV); P718-P722 (Na/Ca-BCV), výsledky zkoušek jsou shrnuty do Tab. 4. Nejistoty stanovení jsou stanoveny jako rozšířené kombinované nejistoty ($k = 2$); relativní nejistota stanovení bobtnacího tlaku je 6,9 % a objemové hmotnosti 1,2 %, zatímco relativní nejistota stanovení součinitele hydraulické vodivosti se odvíjí od měřené hodnoty, neboť oblast „vyšších“ hydraulických vodivostí ($k = 8 \cdot 10^{-13} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) je zatížena menší nejistotou měření (6,2 %), pro velmi nízké hydraulické vodivosti ($k = 5 \cdot 10^{-14} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) je relativní nejistota měření vyšší (22 %).

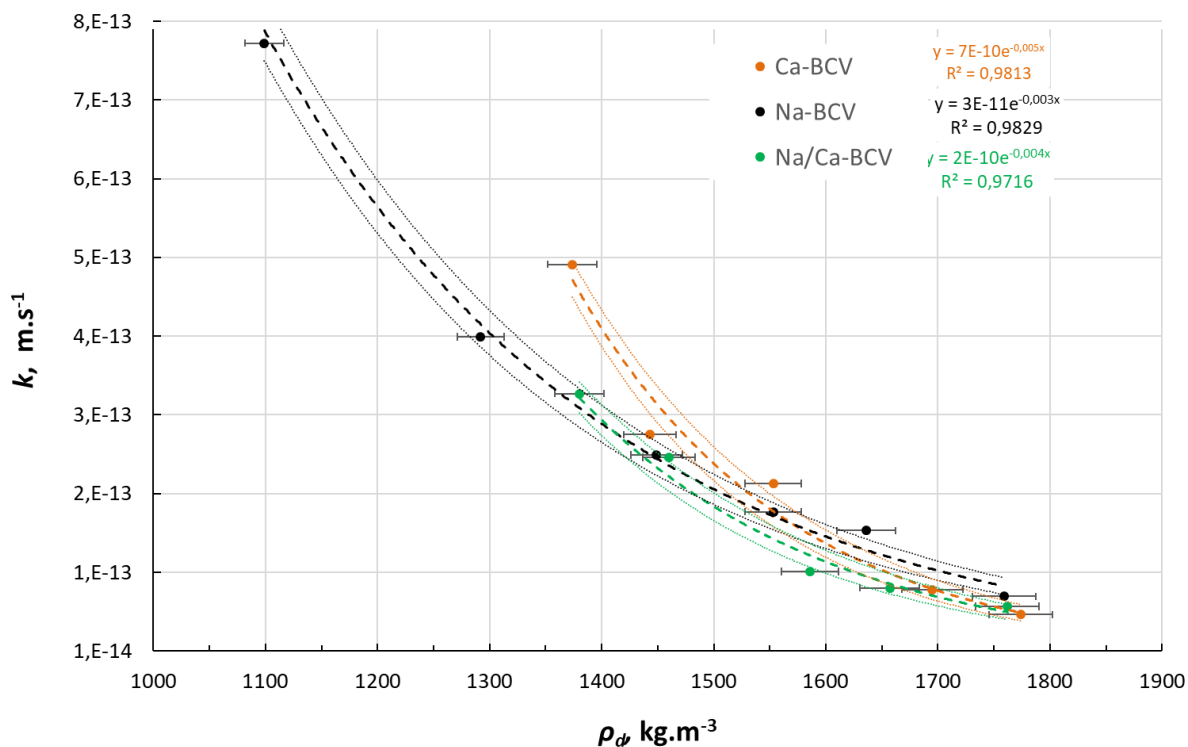
Výsledné hodnoty k a σ_{sw} v závislosti na objemové hmotnosti studovaných materiálů ve srovnání s výchozím bentonitem BCV_2017 a BaM_2014 (Vašíček 2017) jsou vykresleny na Obr. 3 - Obr. 10.

Tab. 4 Výsledky stanovení součinitele hydraulické vodivosti a bobtnacího tlaku.

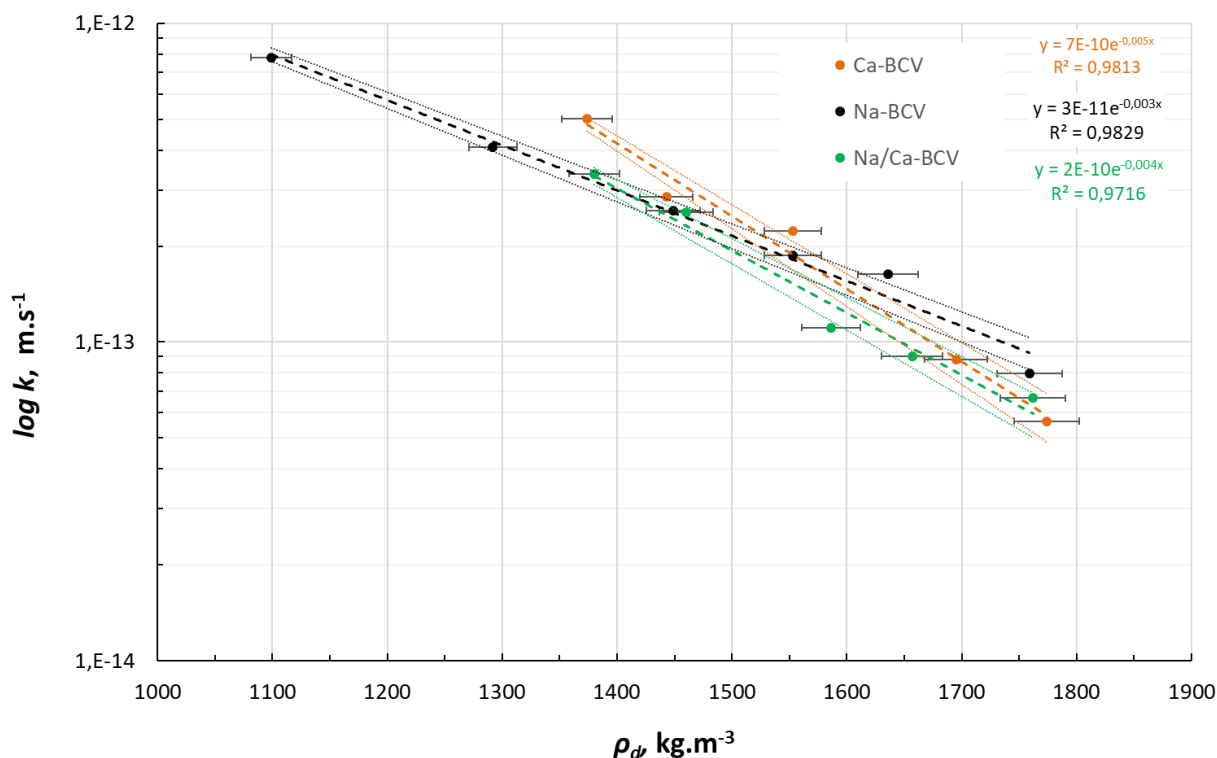
	č. protokolu	objemová hmotnost ρ_d ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	vlhkost při ukončení zk. w_{sat} (%)	součinitel hydr. vodivosti $k \cdot 10^{13}$ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	bobtnací tlak σ_{sw} (MPa)
Na-BCV	P708	1292	42,4	4,09	1,76
	P709	1449	37,1	2,59	3,20
	P710	1553	32,2	1,87	5,53
	P711	1099	55,4	7,82	0,66
	P712	1759	23,6	0,80	15,89
	P725	1636	27,3	1,63	8,30
Ca-BCV	P713	1374	39,7	5,01	1,39
	P714	1443	36,5	2,85	2,22
	P715	1553	32,3	2,23	3,15
	P716	1695	25,6	0,88	9,85
	P717	1774	21,9	0,56	20,23
Na/Ca-BCV	P718	1380	37,6	3,37	2,14
	P719	1460	36,3	2,56	3,04
	P720	1586	26,8	1,11	8,77
	P721	1657	24,3	0,90	12,03
	P722	1762	22,0	0,67	18,91

2.3.1 Součinitel hydraulické vodivosti

Závislosti součinitele hydraulické vodivosti na suché objemové hmotnosti jsou na Obr. 3 až Obr. 6. Experimentální data jsou zobrazena vždy ve dvou měřítkách, lineárním a semilogaritmickém, pro lepší orientaci v hodnotách. U objemové hmotnosti jsou nejistoty měřených hodnot vyznačeny chybovými úsečkami. U součinitele hydraulické vodivosti jsou, vzhledem k nekonstantní velikosti nejistoty, znázorněny horní a dolní hranice intervalů spolehlivosti určené pro exponenciální proložení měřených dat. Součástí grafů jsou také rovnice těchto exponenciálních závislostí, které byly dále využity ke zhodnocení vlivu kationtu na geotechnické vlastnosti (kap. 2.4).



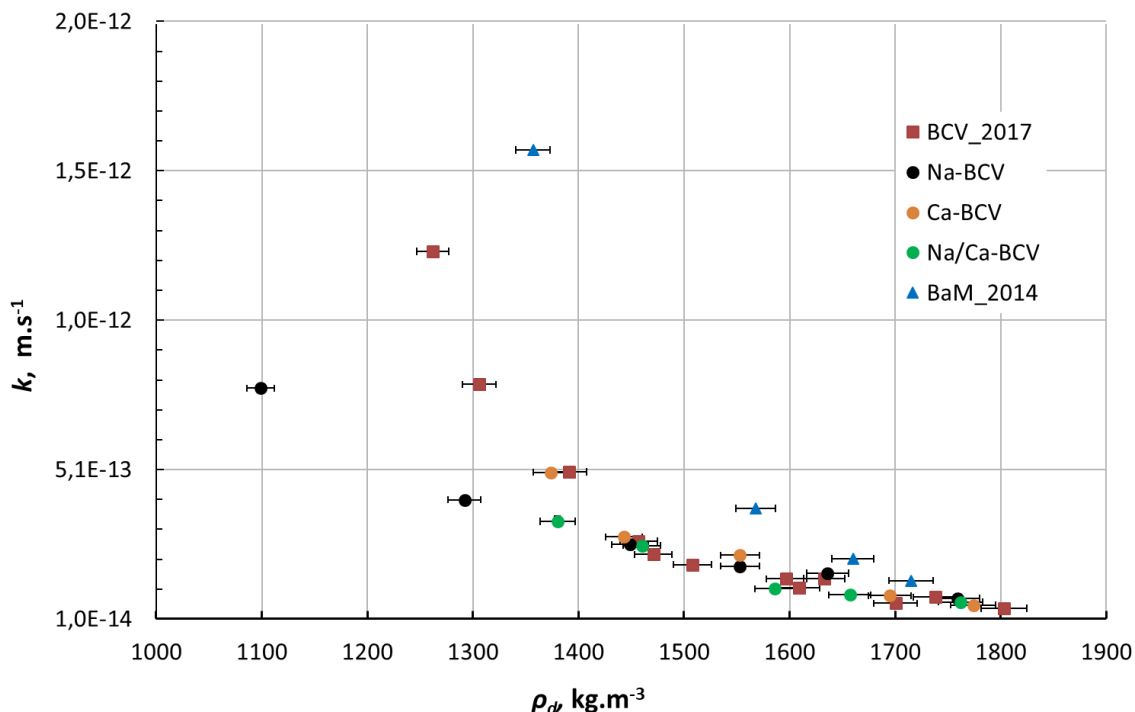
Obr. 3 Závislost součinitele hydraulické vodivosti na objemové hmotnosti.



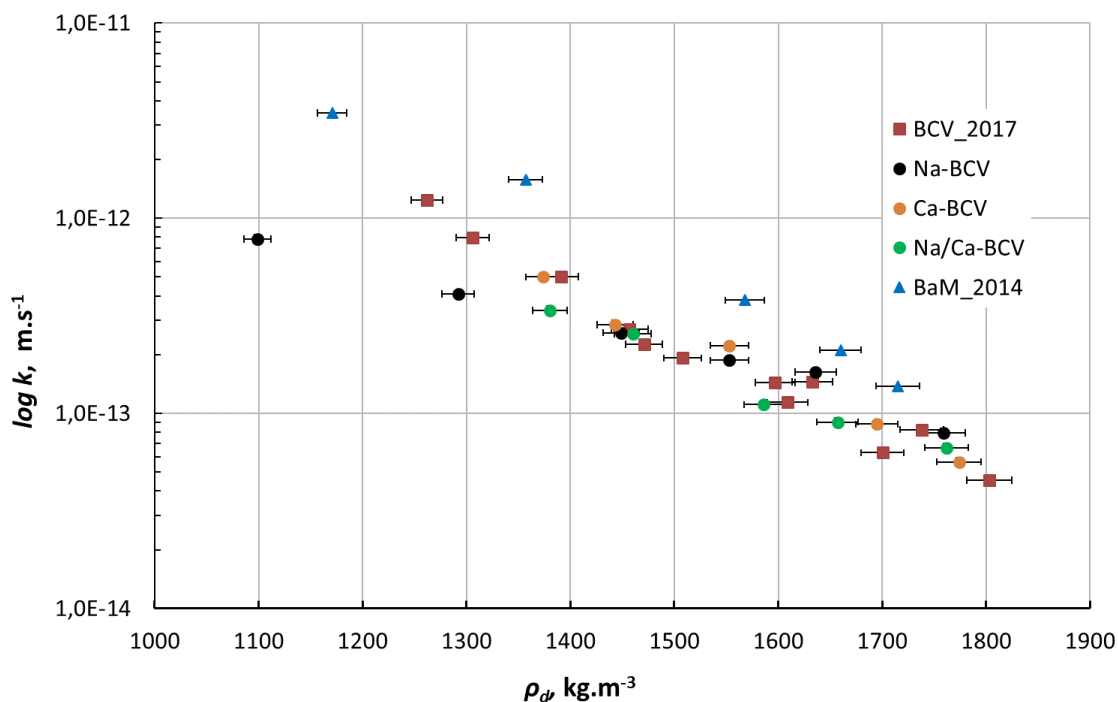
Obr. 4 Závislost součinitele hydraulické vodivosti na objemové hmotnosti v semilogaritmicím měřítku.

Při hodnocení součinitele hydraulické vodivosti homoionních forem bentonitu a jejich směsí (Obr. 3; Obr. 4) je možno pozorovat nejvýraznější rozdíly při nižších objemových hmotnostech s tím, že se tyto stírají u ρ_d cca $1500 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. „Lepších“ hodnot, tj. nižší hydraulické vodivosti, dosahuje Na-BCV i směs Na/Ca-BCV oproti Ca-BCV v oblasti nižších objemových hmotností. Pro Na/Ca-BCV je dostupná pouze jedna hodnota, která toto pozorování umožňuje ($\rho_d \sim 1380 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$). Doplnění zkouškami při nižších objemových hmotnostech

($\rho_d \sim 1100-1300 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) pro Ca-BCV a Na/Ca-BCV by pomohlo závěr potvrdit. V oblasti vyšších objemových hmotností nebyl stanoven významný rozdíl v součiniteli hydraulické vodivosti studovaných materiálů.



Obr. 5 Závislost součinitele hydraulické vodivosti na objemové hmotnosti; porovnání s BCV_2017, BaM_2014.



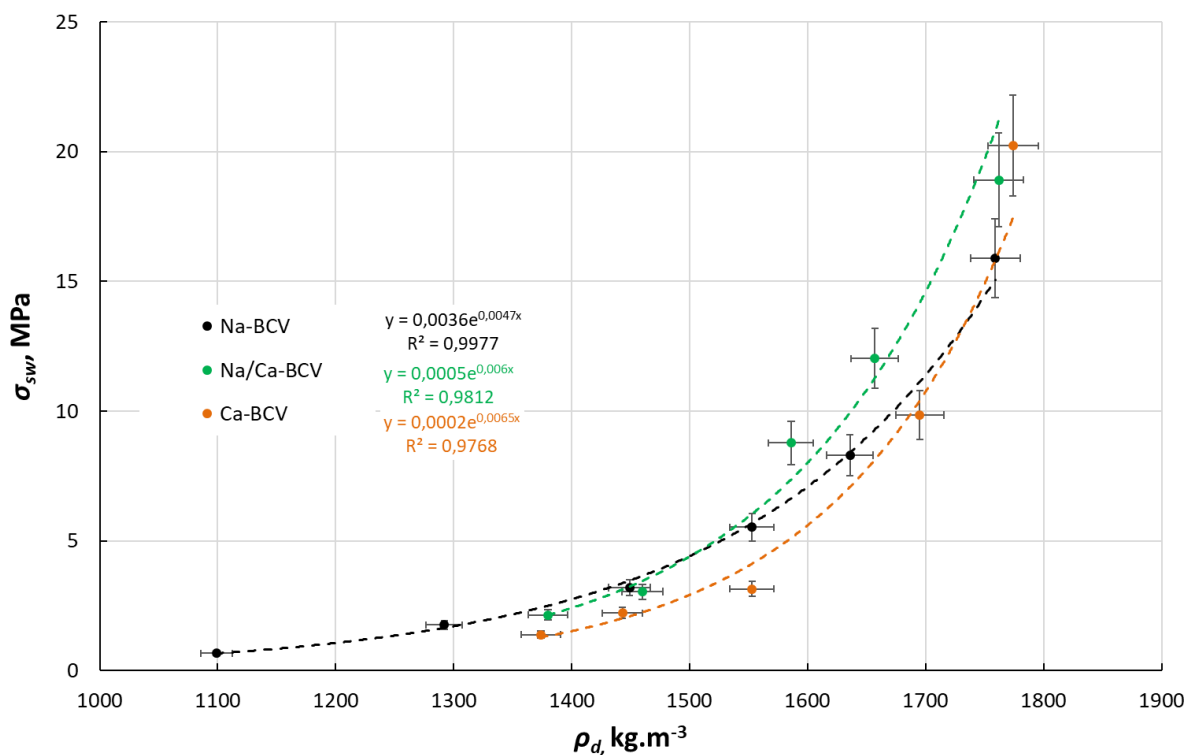
Obr. 6 Závislost součinitele hydraulické vodivosti na objemové hmotnosti v semilogaritmicím měřítku; porovnání s BCV_2017, BaM_2014.

Při porovnání homoionních forem a zdrojového BCV_2017 se u součinitele hydraulické vodivosti, stejně jako u w_L a SI, ukazuje přičylnost vlastností zdrojového materiálu k Ca-formě. Tato přičylnost je zejména viditelná opět u nižších objemových hmotností do $\rho_d \sim 1450 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. U vyšších objemových hmotností jsou rozdíly mezi jednotlivými typy bentonitů setřeny, resp. nelze pozorovat systematický posun pro žádný z materiálů.

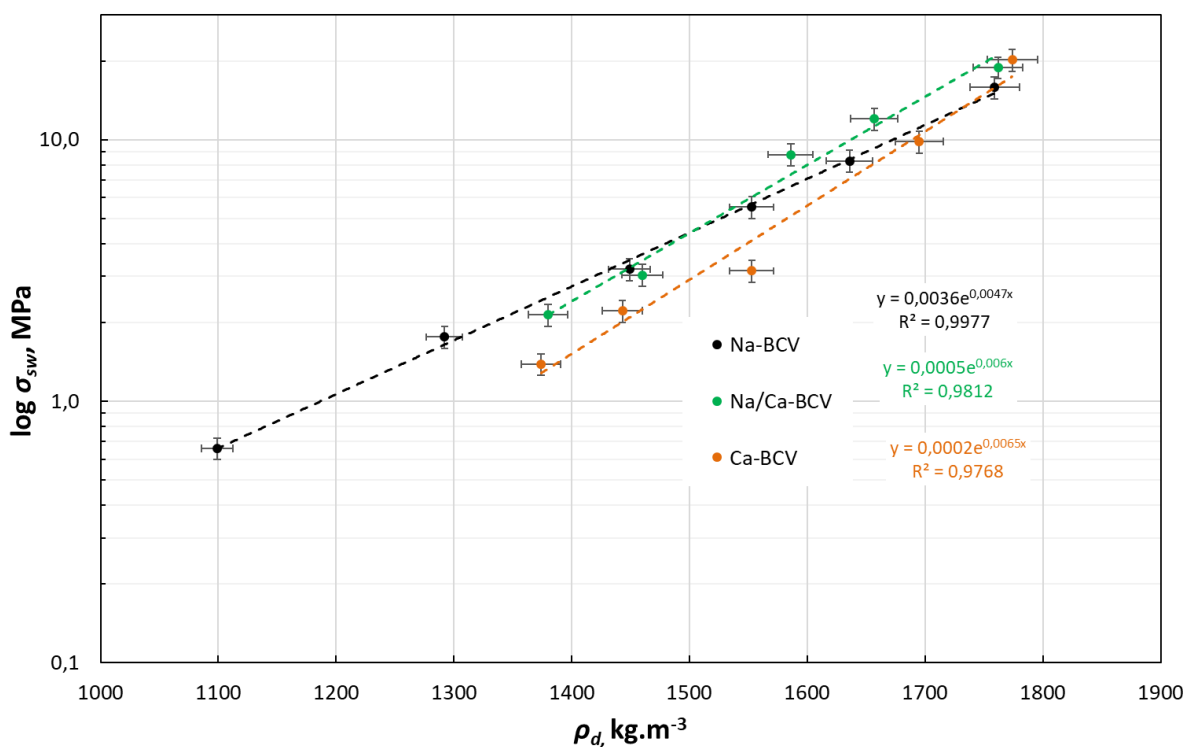
V celém měřeném rozsahu objemových hmotností vykazoval BaM_2014 systematicky mírně vyšší hodnoty součinitele hydraulické vodivosti.

2.3.2 Bobtnací tlak

Závislosti bobtnacího tlaku na suché objemové hmotnosti jsou zobrazeny na Obr. 7 až Obr. 10, opět ve dvou měřítkách pro lepší orientaci v hodnotách. Nejistoty bobtnacího tlaku a objemové hmotnosti jsou vyznačeny chybovými úsečkami. Součástí grafů jsou také rovnice exponenciálních závislostí, které byly dále využity ke zhodnocení vlivu kationtu na geotechnické vlastnosti (kap. 2.4).

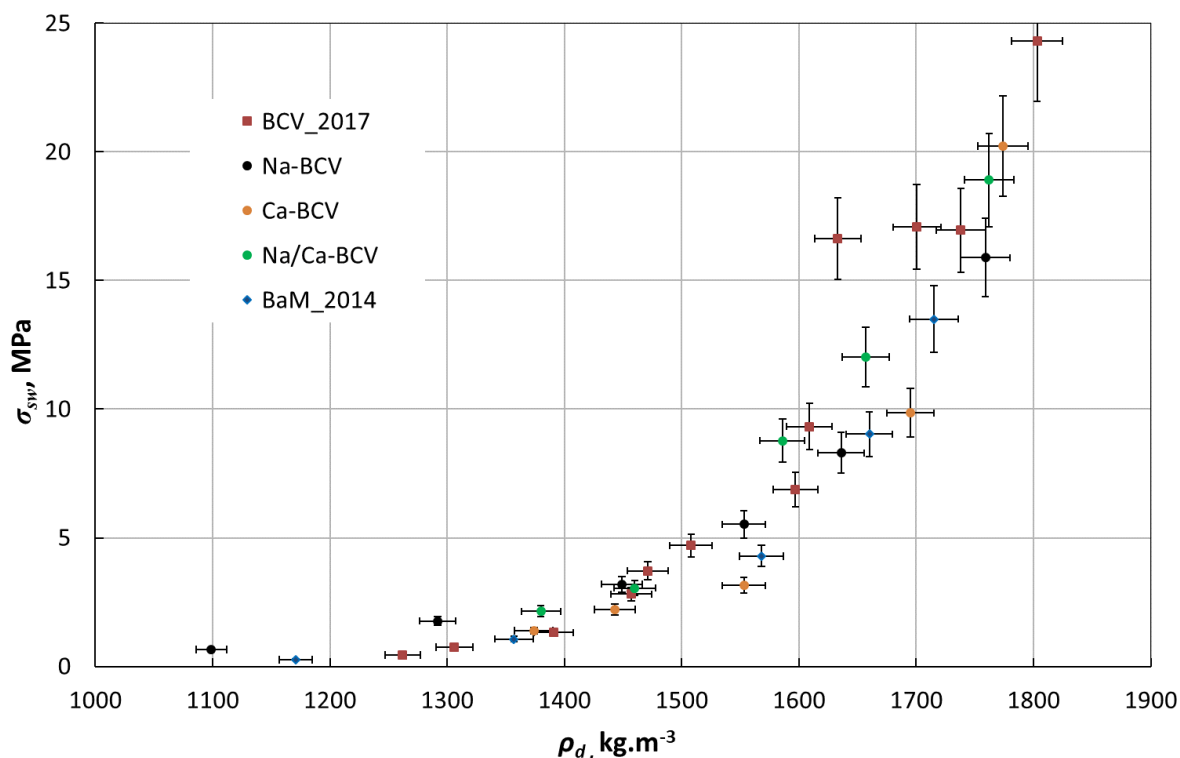


Obr. 7 Závislost bobtnacího tlaku na objemové hmotnosti.

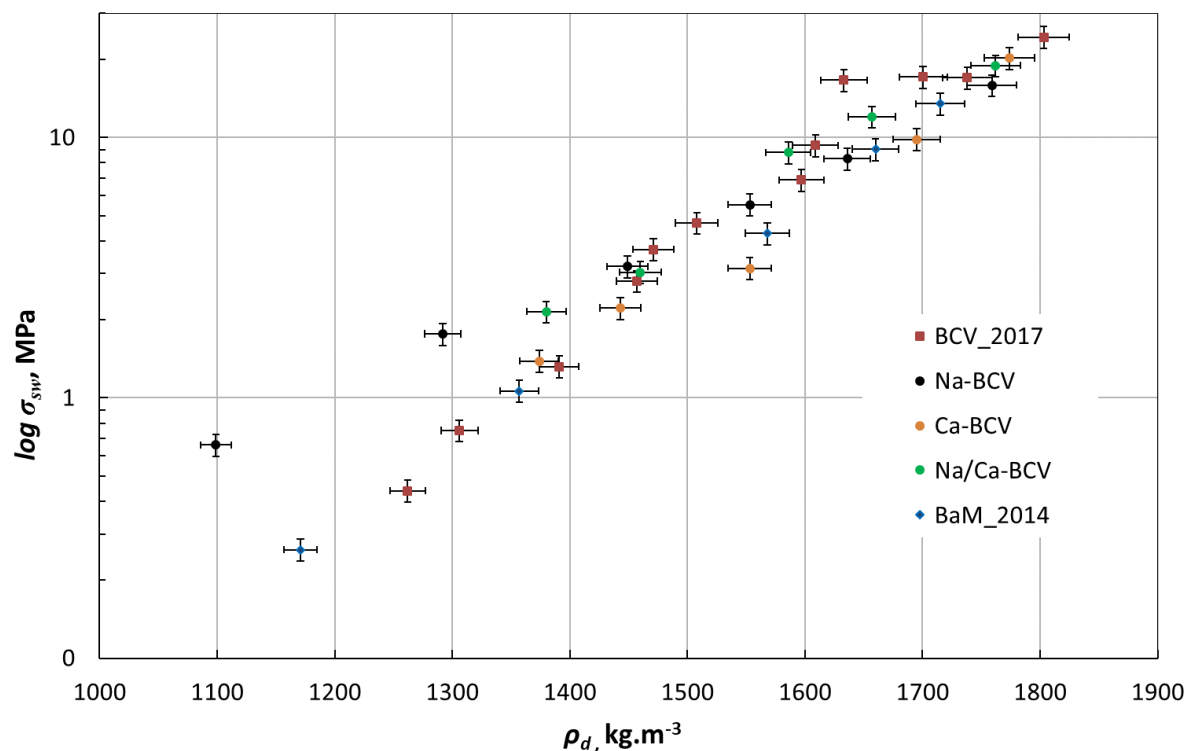


Obr. 8 Závislost bobtnacího tlaku na objemové hmotnosti v semilogaritmickém měřítku.

Při hodnocení bobtnacího tlaku (Obr. 7) homoionních forem bentonitu a jejich směsi je možno pozorovat obdobné chování jako u k – nejvýraznější relativní rozdíly bobtnacích tlaků jsou při malých objemových hmotnostech s tím, že se tyto stírají v rozmezí $\rho_d \sim 1500-1600 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. V oblasti vyšších objemových hmotností nebyl stanoven významný rozdíl v hodnotách bobtnacích tlaků studovaných materiálů. „Lepších“ hodnot, tj. vyšších bobtnacích tlaků a nižších součinitelů hydraulické vodivosti dosahují Na-BCV a Na/Ca-BCV oproti Ca-BCV v oblasti nižších objemových hmotností. Pro Na/Ca-BCV je dostupná pouze jedna hodnota, která toto pozorování umožňuje ($\rho_d \sim 1380 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$). Doplnění zkouškami při nižších objemových hmotnostech $\rho_d \sim 1100-1300 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ pro Ca-BCV a Na/Ca-BCV by pomohlo závěr potvrdit.




Obr. 9 Závislost bobtnacího tlaku na objemové hmotnosti; porovnání s BCV_2017 a BaM_2014.



Obr. 10 Závislost bobtnacího tlaku na objemové hmotnosti v semilogaritmickém měřítku; porovnání s BCV_2017 a BaM_2014.

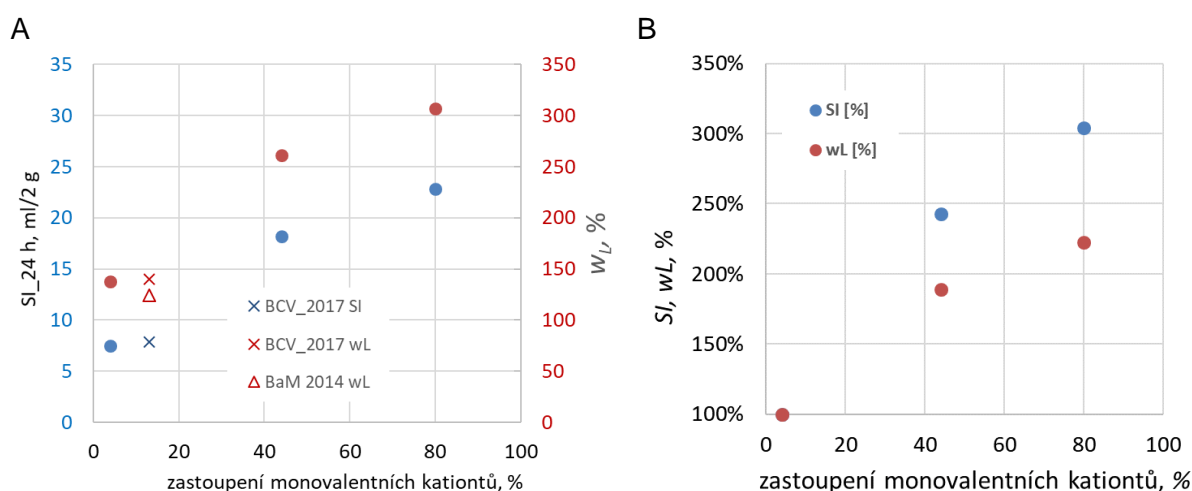
Při porovnání homoionních forem a zdrojového BCV_2017 se i u bobtnacího tlaku (Obr. 10, Obr. 9) potvrzuje obdobné chování jako u součinitele hydraulické vodivosti – přičylnost zdrojového materiálu k Ca-formě, viditelná opět zejména u nižších objemových hmotností. U vyšších objemových hmotností jsou rozdíly mezi jednotlivými typy bentonitů setřeny, resp.

	Geotechnická charakterizace homoionních forem bentonitu BCV Závěrečná zpráva-samostatná příloha	Evidenční označení: SÚRAO TZ 425/2019

nelze pozorovat systematický posun pro žádný z materiálů, což odpovídá i údajům v literatuře (např. Karnland 2010). Bentonit BaM vykazuje obdobné výsledky jako BCV_2017, resp. Ca-BCV, na rozdíl od výsledků měření koeficientu hydraulické vodivosti.

2.4 Zhodnocení vlivu vyměnitelného kationtu na geotechnické vlastnosti

Následující odstavce se snaží zhodnotit vztahy mezi studovanými geotechnickými vlastnostmi, dominantním vyměnitelným kationtem a objemovou hmotností bentonitového materiálu. Vliv vyměnitelného kationtu na SI a w_L je zobrazen na Obr. 11, kde jsou shrnuty výsledky zkoušek v závislosti na obsahu monovalentních kationtů.

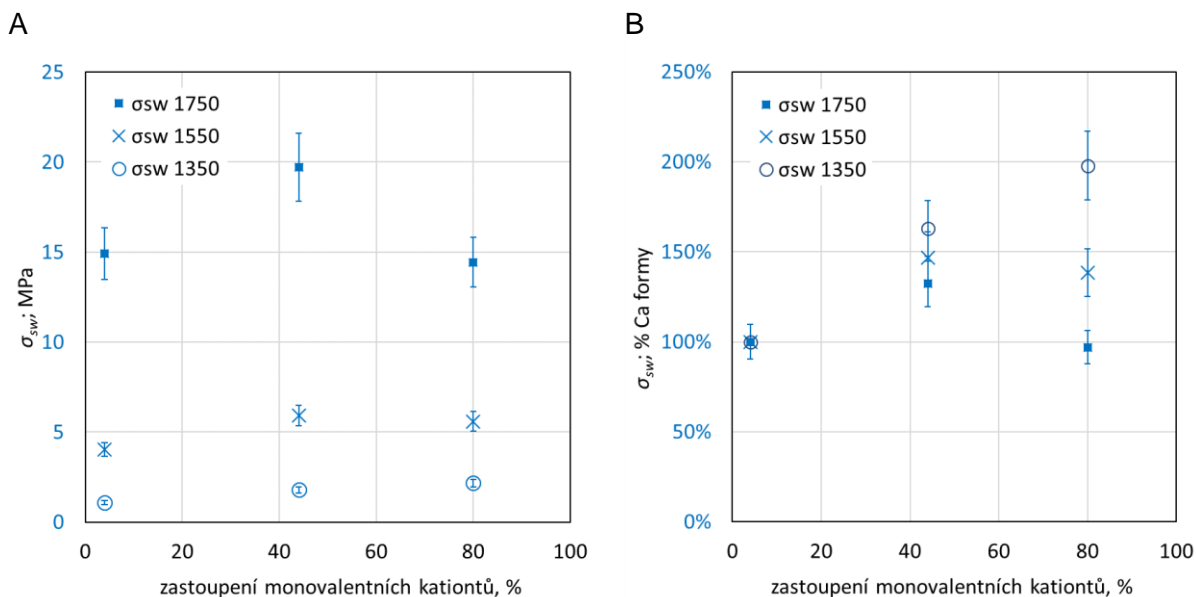


Obr. 11 Změny hodnot (A) swell indexu a meze tekutosti v závislosti na podílu monovalentních kationtů (včetně materiálů BaM a BCV) a procentuální změny (B) oproti Ca-formě.

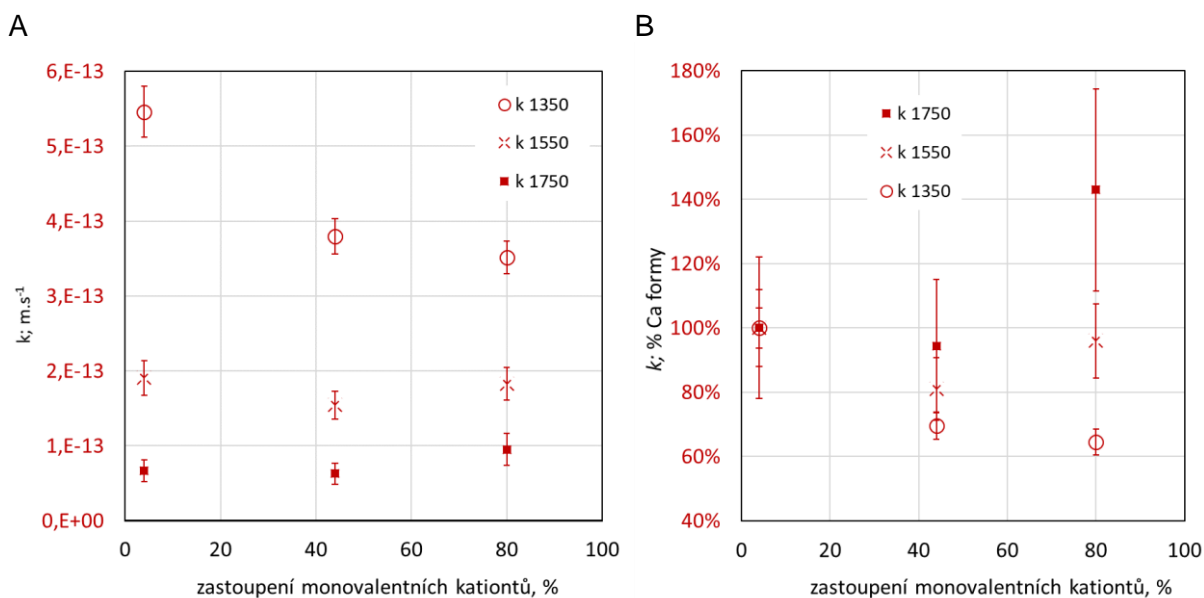
U obou parametrů (SI, w_L) lze pozorovat obdobné chování, a to výraznější nárůst mezi Ca-BCV a směsí Na/Ca (o cca 143 % u SI resp. o 89 % u w_L), další nárůst (Na/Ca-BCV \rightarrow Na-BCV) je méně než poloviční (61 % u SI resp. o 33 % u w_L). Výrazný nárůst SI již při 20% zastoupení Na⁺ uvádí např. Birgersson a kol. (2009).

Z procentuálního vyjádření nárůstů je vidět, že vliv dominantního vyměnitelného kationtu byl výraznější při stanovení swell indexu než při stanovení meze tekutosti. Při stanovení swell indexu se bentonit vyskytuje zjevně při podstatně menší objemové hmotnosti sušiny (= suspenze; $\rho_d \sim$ první desítky $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) než při stanovení meze tekutosti (= hmota na hranici plastického a tekutého chování; $\rho_d \sim$ první stovky $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$).

Změny k a σ_{sw} byly zhodnoceny s pomocí exponenciálních závislostí (Obr. 3, Obr. 4, Obr. 7, Obr. 8; $R^2 > 0,97$). Byly dopočteny hodnoty k a σ_{sw} pro objemové hmotnosti odpovídající krajním a střední hodnotě rozsahu, v jakém byly parametry měřeny (1350, 1550, 1750 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$). Získané výsledky byly poté vyjádřeny jako procentuální podíl vůči hodnotě pro Ca-BCV a vyneseny do grafů (Obr. 12 a Obr. 13).




Obr. 12 Změny hodnot (A) bobtnacího tlaku v závislosti na podílu monovalentních kationtů a procentuální změny (B) oproti Ca-formě.



Obr. 13 Změny hodnot (A) součinitele hydraulické vodivosti v závislosti na podílu monovalentních kationtů a procentuální změny (B) oproti Ca-formě.

Z vývoje hodnot σ_{sw} i k jsou zřejmé nejvýraznější relativní změny s měnícím se obsahem Na^+ pro nízké objemové hmotnosti ($\rho_d = 1350 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) – pro σ_{sw} jde o přibližně lineární nárůst na dvojnásobek. U k se jedná o pokles na cca 60 % hodnotu s tím, že v obou případech je pozorován mírně větší vliv v prvním intervalu (Ca-BCV \rightarrow Ca/Na-BCV). Materiál o „střední“ objemové hmotnosti ($1550 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) vykazuje v prvním intervalu obdobné změny (pokles k , nárůst σ_{sw}), avšak v druhé části, tj. při zvyšování podílu Na^+ (44 \rightarrow 80 %) se hodnota již výrazně nemění.

	Geotechnická charakterizace homoionních forem bentonitu BCV Závěrečná zpráva-samostatná příloha	Evidenční označení: SÚRAO TZ 425/2019

U vysokých objemových hmotností ($\rho_d = 1750 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) σ_{sw} v první části intervalu také roste, i když v nejmenší míře ze všech tří objemových hmotností. Hodnota k stagnuje. Oproti tomu při zvýšení podílu Na^+ z 44 na 80 % dochází k poklesu σ_{sw} cca na úroveň 100 % (tj. stejné jako pro Ca-BCV) a k nárůstu k o cca 40 %. Informaci o změnách k u vysokých objemových hmotností je však nutno hodnotit obezřetně, a to s ohledem na relativně velkou nejistotu stanovení k u nejvyšších objemových hmotností – nad 20 % (v závislosti na absolutní měřené hodnotě).

Největších změn tedy doznávají parametry σ_{sw} (nárůst o 100 %) a k (pokles o 40 %) pro nejmenší objemové hmotnosti sušiny ($\rho_d = 1350 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) a tento efekt s rostoucí objemovou hmotností klesá.


Hodnoty ρ_d při stanovení součinitele hydraulické vodivosti a bobtnacího tlaku jsou zjevně vyšší než při stanovení SI (= suspenze; $\rho_d =$ první desítky $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) resp. w_L , ($\rho_d =$ první stovky $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) kde byly pozorovány změny vyšší (nárůst SI o 200 % a w_L o 120 %). Při stanovení swell indexu je tedy vliv dominantního kationtu/formy bentonitu na výsledek nejvýraznější, u w_L mírně menší a pro σ_{sw} vliv dále klesá se zvyšující se objemovou hmotností. Efekt dominantního vyměnitelného kationtu na výsledky geotechnických zkoušek (SI, w_L a σ_{sw}) tedy s objemovou hmotností klesá. Současně se potvrzuje, že směs Na/Ca je svým chováním blíže Na-formě, než Ca-formě.

Při aplikaci poznatků ohledně vztahu geotechnických vlastností, dominantního vyměnitelného kationtu a objemové hmotnosti bentonitu je nutné brát v potaz skutečný význam parametrů stanovených při jednotlivých objemových hmotnostech. Jistě vyšší důležitost pro hodnocení bezpečnosti HÚ bude mít bobtnací tlak než swell index a mez tekutosti, i když dva posledně jmenované mohou, kromě výzkumných účelů, dobře sloužit např. při provozní kontrole kvality bentonitu při výstavbě HÚ.

Vztah homoionních forem a zdrojového materiálu

Jedním z předpokladů při přípravě experimentálního plánu bylo, že výsledky pro zdrojový BCV_2017 budou v intervalu hraničních hodnot daných koncovými členy (Na-BCV a Ca-BCV). U všech sledovaných parametrů hodnoty zdrojového BCV_2017 leží uvnitř intervalu daným Ca- a Na-formou, i když velmi blízko hranici danou Ca-formou. Tuto blízkost lze pravděpodobně vysvětlit právě dominancí dvojmocných kationtů ve výměnných pozicích ($\text{Ca}+\text{Mg} \sim 87 \%$, viz Tab. 1). Výrazné množství Mg^{2+} , které bentonit BCV obsahuje (64 %), patrně ovlivňuje geotechnické chování bentonitu obdobně jako Ca^{2+} - oproti Na-formě je výrazně méně bobtnavý při malých objemových hmotnostech (např. Birgersson et al. 2009; Karnland 2010). Vzhledem k obsahu Mg^{2+} by bylo vhodnější pro testování vztahu homoionních forem a zdrojového materiálu studovat Mg-formu. Do hodnocení tohoto vztahu také vstupuje i zastoupení Na^+ (11 %) v BCV. Bylo demonstrováno, že sodík, i v poměrně malém množství, výrazně ovlivňuje některé geotechnické vlastnosti. Zatímco přípravou homoionní Ca-formy došlo k odstranění karbonátových fází a tedy k mírnému nabohacení zbylých fází (jílových). Lze konstatovat, že změny ve složení Ca-formy (oproti zdrojovému BCV_2017), způsobené přípravou měly přibližně stejný, vzájemně se vyvažující efekt, tj. tyto materiály se chovají takřka totožně.

Tyto experimenty tedy splnily svůj cíl - přispět k porozumění vlivu vyměnitelného kationtu na geotechnické chování bentonitu pro interpretaci výsledků některých projektů (H2020 CEBAMA, Fyzikálně interakční modely Bukov, ZL Plynopropustnost), kde byly použity české bentonity s obsahem smektitu 55-65 hm. % (Červinka et al. 2018). Při srovnávání výsledků výzkumu na různých bobtnavých materiálech (přírodních či čistých formách) a závislosti

 SÚRAO	Geotechnická charakterizace homoionních forem bentonitu BCV	Evidenční označení:
	Závěrečná zpráva-samostatná příloha	SÚRAO TZ 425/2019


geotechnických parametrů k a σ_{sw} na objemové hmotnosti se naráží na rozdíly v obsahu smektitu. V navazujících pracích by bylo vhodné se zaměřit na vliv obsah smektitu na geotechnické chování. Obsah montmorillonitu dominantně ovlivňuje polohu křivek v závislostech k a σ_{sw} na objemové hmotnosti (posun ve směru osy objemové hmotnosti). Zohlednění množství montmorillonitu tak významně napomáhá k jejich hodnocení (např. Karnland 2010). Podle Dixona a kol. (2002) vyjadřují Jenni a Mäder (2018) tyto závislosti na tzv. EMDD (effective montmorillonite dry density). Tímto vyjádřením se výsledky pro bentonity různého složení (resp. s různým obsahem montmorillonitu) „znormují“ vzhledem k této zásadní složce. Díky tomu je pak možné identifikovat vliv přidavných minerálů.

Po otestování přístupu EMDD se nabízí jeho využití i jako mezičlánek při stanovení kritérií pro buffer a backfill v oblastech, kde je objemová hmotnost relevantním parametrem. Jako užitečný mezistupeň se EMDD jeví zejména pro situaci, kdy není definitivně znám (dostupný) bentonit pro výstavbu HÚ. Na konci řetězce kritérií bude však vždy, již pro konkrétní materiál, stát objemová hmotnost (sušiny, ρ_d).

Příklad řetězce: parametr (např. součinitel hydraulické vodivosti k) -> limit ($k < 1 \cdot 10^{-12} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) -> EMDD -> $1400 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ -> pro materiál xy min. $\rho_d > 1550 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

Pro praktickou aplikaci je však nutné zůstat u objemových hmotností pro každý konkrétní materiál, neboť objemová hmotnost ovlivňuje např. pevnostně-deformační chování. Kromě toho může hrozit riziko, že, při nižším obsahu montmorillonitu, nebude možné využít dostupné technologie pro zpracování, resp. zpracování na požadovanou objemovou hmotnost bude velmi obtížné.

Pro plynopropustnost bentonitové bariéry (v návaznosti na ZL Plynopropustnost) je zásadním parametrem bobtnací tlak. Z výsledků je zřejmá oblast pro BCV_2017 ($\rho_d = 1400\text{-}1500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, čemuž odpovídá 1-4 MPa), do které se hodnoty pro různé varianty BCV (Na, Ca...) liší. Hodnoty od cca $1500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ jsou již obdobné. U nižších objemových hmotností je rozdíl až 800 kPa. Pro mechanický průnik plynu bentonitem o vyšším bobtnacím tlaku je nutný úměrně vyšší tlak pronikajícího plynu. Pokud přijmeme názor, že je žádoucí co nejlepší odvod plynu od ÚOS, nikoliv jeho utěsnění, jako vhodnější řešení z hlediska plynopropustnosti se jeví využití materiálů s nižším bobtnacím tlakem při nižších objemových hmotnostech. Tato úvaha jde však proti dalším požadavkům na funkčnost bariéry. Důležité ale bude poznání, zda se prostup plynu dominantně realizuje průrazem a uzavřením vytvořené preferenční cesty nebo průběžným pronikáním.

	Geotechnická charakterizace homoionních forem bentonitu BCV Závěrečná zpráva-samostatná příloha	Evidenční označení: SÚRAO TZ 425/2019

3 Závěr


V rámci experimentálních prací byly připraveny a testovány homoionní formy (Na- a Ca-) a směs 50/50 (Na/Ca-) bentonitů připravených ze zdrojového bentonitu BCV_2017. Geotechnické testy zahrnovaly stanovení swell indexu, meze tekutosti a stanovení součinitele hydraulické vodivosti a bobtnacího tlaku pro různé objemové hmotnosti studovaných forem bentonitů. Tato zpráva také zahrnovala srovnání s výchozím bentonitem BCV_2017 a předchozím bentonitem BaM_2014.

Stanovení swell indexu i meze tekutosti se jeví jako užitečný ukazatel pro výzkumné účely i kontrolu kvality při výběru materiálu pro buffer a backfill či provozní kontrole při výstavbě. Důvodem je nejvyšší „citlivost“ těchto metod na změny ve složení bentonitu, resp. obsazení výměnných pozic různými kationty. Současně mohou „včas a levně“ indikovat začínající změny v materiálu při dlouhodobých experimentech. Dalším krokem musí být ověření, zda (ne)jsou ovlivněny další parametry, jako bobtnací tlak či součinitel hydraulické vodivosti. Nejistotou vždy zůstane, v jaké míře budou odpovídat podmínky při zkoušce danému konkrétnímu případu z experimentu (doba saturace, chemismus vody atp.).

Klíčovými geotechnickými faktory pro dlouhodobou bezpečnost HÚ jsou součinitel hydraulické vodivosti a bobtnací tlak. Byl potvrzen vliv dominantního vyměnitelného kationtu při malých objemových hmotnostech, kde Na-forma vykazuje nejvyšší hodnoty bobtnacího tlaku a nejnižší součinitel hydraulické vodivosti (ve shodě s Karnland 2010; Jenni a Mäder 2018). Současně se potvrzuje dominantní vliv Na⁺ ve smíšeném materiálu Na/Ca-BCV (50/50), který vykazuje obdobné chování jako Na-BCV. V dlouhodobém vývoji HÚ však nehraje roli výchozí zastoupení vyměnitelných kationtů v bentonitu, ale zastoupení po interakci s možnými podzemními vodami v HÚ (množství a typ rozpuštěných solí), kterými bude bentonit reálně sycen (Karnland 2010). Bylo demonstrováno, že se vzrůstající objemovou hmotností (nad cca 1500 kg·m⁻³) klesá citlivost obou parametrů, k i σ_{sw} , na obsazení iontovým výměnných pozic.


Jedním z předpokladů při přípravě experimentálního plánu bylo, že výsledky pro zdrojový BCV_2017 budou v intervalu hraničních hodnot daných koncovými členy Na-BCV a Ca-BCV. Zdrojový materiál obsahuje i výrazné množství Mg²⁺, který patrně ovlivňuje chování bentonitu obdobně jako Ca²⁺. U všech sledovaných parametrů leží hodnoty zdrojového BCV_2017 uvnitř intervalu daným Ca- a Na-formou, velmi blízko hranici dané Ca-formou. Tuto blízkost lze pravděpodobně vysvětlit právě dominancí dvojmocných kationtů ve výměnných pozicích. Do hodnocení ve vztahu ke zdrojovému BCV_2017 vstupuje i méně výrazné zastoupení Na⁺ a odstranění karbonátů při přípravě homoionních forem. Lze však konstatovat, že změny ve složení Ca-formy (oproti zdrojovému BCV_2017), způsobené přípravou měly přibližně stejný, vzájemně se vyvažující efekt.

Z důvodu různého obsahu montmorillonitu v různých kandidátních buffer/backfill materiálech navrhujeme otestovat přístup škálování na základě tzv. „effective montmorillonite dry density“ – EMDD na geotechnické parametry.

	Geotechnická charakterizace homoionních forem bentonitu BCV	Evidenční označení:
	Závěrečná zpráva-samostatná příloha	SÚRAO TZ 425/2019

4 Reference

- AHMED A. A., SAAID I. M., AKHIR N. A. M., RASHEDI M. (2016): Influence of various cation valence, salinity, pH and temperature on bentonite swelling behaviour. AIP Conference Proceedings 1774 (1) 040005, 9 s.
- ASTM D5890–11. *Standard Test Method for Swell Index of Clay Mineral Component of Geosynthetic Clay Liners*. ASTM International, West Conshohocken, 2011, 7 s.
- BIRGERSSON M., BÖRGESSON L., HEDSTRÖM M., KARNLAND O., NILSSON U. (2009): Bentonite erosion – Final Report, SKB Technical report TR-09-34, Švédsko, 164 s.
- ČERVINKA R. (2014): Stanovení kationtově výměnné kapacity (CEC) a výměnných kationtů pomocí metody s Cu(II)triethylentetraminem. Certifikovaná metodika. Č. j. SÚJB/ONRV/15452/2014, 14 s.
- ČERVINKA R., VOPÁLKA D., ADAM R., BRÁZDA L., DRTINOVÁ B., HOFMANOVÁ E., KITNEROVÁ J., RAMEŠOVÁ L. REIMITZ D., ŠIMÚTHOVÁ Z., ŠTAMBERG K., VETEŠNÍK A. (2015): Transport radionuklidů z úložiště / Vstupní parametry a procesní modely pro hodnocení transportu radionuklidů přes inženýrské bariéry: 1. průběžná zpráva. SÚRAO Technická zpráva 24/2015, Česká republika, 176 s.
- ČERVINKA R., VAŠÍČEK R., VEČERNÍK P., KAŠPAR V. (2018): Kompletní charakterizace bentonitu BCV 2017 - průběžná zpráva. SÚRAO Technická zpráva 419/2019, Česká republika, 33 s.
- ČSN CEN ISO/TS 17892-11 (ČSN 72 1007). Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin – Část 11: Stanovení propustnosti zemin při konstantním a proměnném spádu. Účinnost od 1.5.2005. Český normalizační institut, 2005, 19 s.
- ČSN EN ISO 17892-12 (ČSN 72 1007). Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin – Část 12: Stanovení meze tekutosti a meze plasticity. Účinnost od 1.12.2018. Český normalizační institut, 2018, 40 s.
- DIXON D. A., CHANDLER N. A., BAUMGARTNER P. (2002): The influence of groundwater salinity and interfaces on the performance of potential backfill materials. In: Proceedings of the 6th international workshop on design and construction of final repositories, backfilling in radioactive waste disposal, Brussels, 11–13 March 2002. l'Organisme national des déchets radioactifs et des matières fissiles enriches/de Nationale Instelling voor radioactief afval en verrijkte splijtstoffen (ONDRAF/NIRAS), Belgium. Transactions, Section IV, paper 9.
- JENNI A., MÄDER U. (2018): Coupling of chemical and hydromechanical properties in bentonite, Applied Geochemistry 97, 147-156.
- KARNLAND O. (2010): Chemical and mineralogical characterization of the bentonite buffer for the acceptance control procedure in a KBS-3 repository. SKB Technical report TR-10-60, Švédsko, 25 s.
- KARNLAND O., OLSSON S., NIELSSON U. (2006): Mineralogy and Sealing Properties of Various Bentonites and Smectite-rich Clay Materials. SKB Technical Report TR-06-30, Švédsko, 112 s.
- PUSCH R. (2001): Experimental study of the effect of high porewater salinity on the physical properties of a natural smectitic clay. SKB Technical Report TR-01-07, Švédsko, 32 s.
- SVOBODA J., VAŠÍČEK R., PACOVSKÁ D., ŠTÁSTKA J., FRANĚK J., RUKAVIČKOVÁ L., VEČERNÍK P., ČERVINKA R., NAHODILOVÁ R., LAUFEK F., ŘIHOŠEK J., BURIÁNEK D. (2019): Interakční experiment – Přípravné a podpůrné práce. Dílčí etapová zpráva zakázky Interakční fyzikální modely in-situ v PVP Bukov; Technická zpráva SÚRAO 385/2019, Česká republika, 126 s.

 SÚRAO	Geotechnická charakterizace homoionních forem bentonitu BCV	Evidenční označení:
	Závěrečná zpráva-samostatná příloha	SÚRAO TZ 425/2019

VAŠÍČEK R., HAUSMANNOVÁ L. (2012): Stanovení hydraulické vodivosti a bobtnacího tlaku – Interní postupy č. 182/21 a 182/22. Centrum experimentální geotechniky Fakulta stavební ČVUT v Praze. 18 s.

VAŠÍČEK R. (2017): Zpráva zakázky Laboratorní zkoušky na bentonitu BaM. Zak. SÚRAO č. BaM Ov2017-6132, Centrum Experimentální Geotechniky Fakulta Stavební ČVUT V Praze, 14 s.

NAŠE BEZPEČNÁ BUDOUCNOST



SÚRAO

Správa úložišť radioaktivních odpadů

Dlážděná 6, 110 00 Praha 1

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

www.surao.cz