

Univerzita Karlova
Přírodovědecká fakulta

Studijní program: Geologie
Studijní obor: Geotechnologie



Adam Charvát

Těsnící vlastnosti bentonitů z pohledu hlubinných úložišť

Sealing properties of bentonites in deep geological repositories

Bakalářská práce

Vedoucí bakalářské práce: RNDr. Jan Najser, Ph.D.

Praha, 2021

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracoval/a samostatně a že jsem uvedl/a všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze dne

.....

Adam Charvát

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce RNDr. Janu Najserovi, Ph.D. za cenné rady, trpělivost a vedení práce. Dále bych chtěl poděkovat všem členům mé rodiny a partnerce za pomoc při zpracovávání této bakalářské práce.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá zhodnocením materiálu bentonit, který je uvažován do konceptu hlubinného úložiště k zajištění optimálních podmínek pro bezpečné uložení nevyužitelného radioaktivního odpadu.

Teoretická část bakalářské práce je zaměřena na charakteristiku bentonitu, koncept hlubinného úložiště a bentonitovou bariéru. V závěru teoretické části je vytvořena rešerše těsnících vlastností vybraných bentonitů, která je doplněna o český bentonit BCV z lokality Černý vrch. Analytická část zahrnuje laboratorní zkoušky bobtnacího tlaku a volného bobtnání, které ověřují míru bobtnacího potenciálu bentonitu BCV. Na základě zjištěných vlastností všech bentonitů je provedeno srovnání jejich rozdílného chování.

Cílem bakalářské práce je srovnání klíčových charakteristik vybraných bentonitů zaručujících dostatečnou těsnící schopnost a jejich srovnání s bentonitem BCV. Práce je primárně zaměřena na parametry bobtnacího tlaku a hydraulické vodivosti, které se z hlediska těsnící schopnosti jeví jako zásadní. Na základě komparace světově studovaných bentonitů s českým bentonitem BCV je posouzena možnost jeho využití do hlubinného úložiště na našem území.

Nejlepší výsledky bobtnacího tlaku a hydraulické vodivosti byly při objemové hmotnosti menší než $1,5 \text{ g/cm}^3$ zaznamenány u bentonitu MX-80, při překročení objemové hmotnosti $1,5 \text{ g/cm}^3$ nabyly obdobných hodnot i bentonit FEBEX. Na základě výsledků lze konstatovat, že nejzásadnější význam pro míru bobtnacího potenciálu představuje mineralogie a převažující kationt ve struktuře bentonitu. Při vyšších hodnotách objemové hmotnosti však vliv kationtu slábně a hlavní roli pro bobtnací potenciál zaujímá primárně množství bobtnavého minerálu. Při posouzení mechanických parametrů bentonitu BCV bylo zjištěno, že se se svými výsledky jeví jako dostačující a je možné s ním počítat při plánování úložiště na našem území.

Klíčová slova: bentonit, montmorillonit, hlubinné úložiště, buffer, bobtnací tlak, hydraulická vodivost

Abstract

This bachelor thesis deals with evaluation of the material bentonite, which is considered in the concept of deep geological repository to ensure optimal conditions for the safe storage of unusable radioactive waste.

The theoretical part focuses on characteristics of bentonite, deep geological repository and bentonite barrier. At the end of the theoretical part, a review of sealing properties of selected bentonites is presented. The review includes also Czech bentonite BCV from Černý vrch deposit. The analytical part includes laboratory measurements of swelling pressure and free swelling to verify the rate of swelling potential of bentonite BCV. Based on the identified properties of all bentonites, a discussion of the causes of the different behaviours is carried out.

The objective of the bachelor thesis is to compare the key characteristics of selected bentonites guaranteeing sufficient sealing ability and to compare them with bentonite BCV. The work is mainly focused on parameters of swelling pressure and hydraulic conductivity, which seem to be the most important in terms of sealing abilities. Based on the comparison of the worldwide studied bentonites with Czech bentonite BCV, the possibility of its use to deep repository in Czech Republic is evaluated.

The best results of swelling pressure and hydraulic conductivity were identified for MX-80 at a mass volume less than $1,5 \text{ g/cm}^3$, bentonite FEBEX reached similar results when exceeding $1,5 \text{ g/cm}^3$. Based on the results, mineralogy and dominant cation in the structure of bentonite are the most crucial factors in the rate of swelling potential. However, at higher dry densities, the effect of the cation diminishes and the main role in swelling potential is primarily the amount of the swelling mineral. Mechanical parameters of BCV bentonite were found competitive in comparison with other evaluated bentonites and it can be considered for the planned radioactive waste repository in the Czech Republic.

Key words: bentonite, montmorillonite, deep geological repository, buffer, swelling pressure, hydraulic conductivity

OBSAH

1	Úvod.....	1
2	Bentonit jako přírodní materiál	2
2.1	Charakteristika bentonitu.....	2
2.2	Geologický původ.....	3
2.3	Mineralogické složení.....	4
2.4	Rozdělení bentonitu	5
2.5	Základní fyzikálně-chemické a mechanické vlastnosti	6
2.5.1	Bobtnací potenciál.....	6
2.5.2	Hydraulická vodivost	7
2.5.3	Kationtová výměnná kapacita (CEC).....	8
2.5.4	Plasticita	8
2.5.5	Objemová hmotnost	9
3	Úložiště radioaktivního odpadu	10
3.1	Roztřídění radioaktivního odpadu	10
3.2	Způsob ukládání radioaktivního odpadu	11
3.3	Hlubinné úložiště.....	11
3.3.1	Přírodní bariéra.....	12
3.3.2	Inženýrská bariéra	13
3.3.3	Procesy v bentonitové bariéře	14
3.3.4	Požadavky na buffer.....	15
4	Stěžejní charakteristiky vybraných bentonitů	17
4.1	Bentonit FEBEX.....	17
4.2	Bentonit MX-80.....	19
4.3	Bentonit Kunigel.....	22
4.4	Bentonit FoCa7.....	23
4.5	Bentonit GMZ.....	25

4.6	Bentonit BCV	26
5	Laboratorní zkoušky bentonitu BCV	29
5.1	Postup laboratorních zkoušek	29
5.1.1	Příprava zkoušek	29
5.1.2	Příprava vzorků	30
5.1.3	Zkouška volného bobtnání	31
5.1.4	Zkouška bobtnacího tlaku	31
5.2	Vyhodnocení zkoušek	32
5.2.1	Volné bobtnání	32
5.2.2	Bobtnací tlak	34
6	Srovnání vybraných charakteristik bentonitů	37
6.1	Komparace bobtnacího tlaku bentonitů	38
6.2	Komparace hydraulické vodivosti bentonitů	40
	Závěr	42
	Citovaná literatura	43
	Seznam obrázků	47
	Seznam tabulek	48

1 Úvod

V dnešní energeticky náročné době čelí naše planeta nevyhnutelnému vyčerpání veškerých zásob fosilních paliv, což vede k intenzivnímu pátrání po jiných způsobech tvorby energie. Podstatnou část produkce nahrazují jaderné elektrárny, jejichž využití je však spojeno s produkováním radioaktivního odpadu, který je třeba bezpečně uložit. Nejspolehlivější variantu pro ukládání radioaktivního odpadu představuje koncept hlubinného úložiště.

Podle Ministerstva průmyslu a obchodu České republiky je s uvažovanou volnou kapacitou bazénů a meziskladů v okolí jaderných elektráren naplánováno uložení radioaktivního odpadu do hlubinného úložiště zhruba na rok 2065. Po celkovém zhodnocení geologického území České republiky bylo k roku 2019 navrženo a předběžně charakterizováno šest lokalit, které se svou charakteristikou hodí pro vybudování hlubinného úložiště. Tyto lokality disponují nejlepšími geologickými podmínkami pro utěsnění vysokoaktivního odpadu za použití multibariérového systému (MPO, 2019).

Princip multibariérového systému spočívá v zadržení radioaktivního odpadu uvnitř několika vzájemně na sebe navazujících nepropustných bariér. K základním prvkům multibariérového systému patří úložný kontejner, přírodní bariéra a inženýrská bariéra. Přírodní bariérou se rozumí stabilní granitová hornina, zatímco v případě inženýrské bariéry se jedná o bentonitovou vrstvu, která musí zajistit dlouhodobou ochranu kontejnerů s radioaktivním odpadem (Vojtěchová, 2019).

Náplní bakalářské práce je teoretická rešerše bentonitu z pohledu jeho původu a složení, dále analýza jeho těsnících vlastností zahrnující především bobtnací tlak a hydraulickou vodivost. V další části je pozornost věnována hlubinným úložištím, multibariérovému systému a roli bentonitové bariéry při výstavbě samotného úložiště. Bakalářská práce dále popisuje mechanické vlastnosti vybraných bentonitů, které jsou ve světě nejčastěji spojovány s využitím pro plánovaná hlubinná úložiště. Mechanické vlastnosti vybraných bentonitů jsou následně porovnány s vlastnostmi českého bentonitu z lokality Černý vrch.

Cílem práce je vzájemná komparace stěžejních těsnících vlastností světových bentonitů a jejich srovnání s českým bentonitem. Tato bakalářská práce si dále klade za cíl zhodnotit kvalitu českého bentonitu a posoudit potenciál jeho využití pro úložiště plánované na našem území.

2 Bentonit jako přírodní materiál

Tato kapitola bakalářské práce se věnuje základním aspektům bentonitu, mezi něž patří obecná charakteristika horniny, geologie, mineralogie, základní rozdělení a v neposlední řadě fyzikálně-chemické vlastnosti, které činí bentonit tak unikátním materiálem.

2.1 Charakteristika bentonitu

Bentonit je možné popsat jako jílovou reziduální horninu, která je dominantně tvořená minerály ze skupiny smektitů (podrobněji viz kapitola 2.3), díky nimž se v posledních letech do popředí dostává výzkum bentonitu jako těsnící bariéry hlubinného úložiště. V jednotlivých státech jsou nároky na parametry bentonitu specifikovány různě, avšak základní požadavky jsou napříč všemi státy stejné. Dle studie Karnlanda et al. (2006) mezi základní požadavky patří:

- původní těsnící vlastnosti,
- náklady,
- dostupnost,
- dlouhodobá stabilita,
- odolnost vůči vlivu chemismu podzemních vod.

Z hlediska kvality se bentonit rozděluje do dvou základních skupin. První skupinu představují vysoce kvalitní bentonity, které tvoří většinu současné celosvětové produkce. Jedná se o bentonity, které obsahují sodík jako dominantní iont a jsou tak označovány jako Na-bentonity. Celosvětově nejrozsáhlejší naleziště sodného bentonitu se nachází na západě Spojených států amerických ve Wyomingu, v Montaně a Jižní Dakotě. Podle místa vzniku ho lze současně označit jako bentonit západního či wyomingského typu. Tento typ bentonitu je charakteristický vysokou bobtnací schopností. Další lokality tohoto typu jsou například na území Indie, Kanady, Číny a Argentiny (Al-Ani a Sarapää, 2008).

Druhou skupinu zauímají méně kvalitní bentonity, jejichž těžba navzdory nemalým ložiskům dosahuje podstatně menšího objemu. Díky dominantnímu iontu vápníku se nazývají Ca-bentonity (Karnland et al., 2006). Naleziště bentonitu vápenatého typu patří ve světě k hojněji se vyskytujícím. Ve Spojených státech amerických se tyto bentonity nacházejí v Georgii, Alabamě či Texasu. Ve světě se vápenaté bentonity vyskytují například v Anglii, Řecku, Německu, Španělsku a České republice (Al-Ani a Sarapää, 2008).

Bentonit také nese širokou škálu využití v různých průmyslových odvětvích. Uplatnění bentonitu lze nalézt například v oblasti odlévání kovů, kde jsou z něho vytvářeny lící formy, ve vrtné technice jako plnivo do vrtných výplachů, ve stavebnictví jako těsnicí prvek či při výrobě papíru (Eisenhour a Brown, 2009).

2.2 Geologický původ

Časový rámec tvorby bentonitu byl určen od dob druhohor z období Jury až po čtvrtohorní pleistocén. Horninu lze nalézt v mořském i vnitrozemském prostředí, jehož rozsah může být geograficky velmi rozsáhlý. Takové naleziště, jež může nabývat mocnosti od pár centimetrů až po několik desítek metrů, se obvykle vyskytuje souběžně s nadložními či podložními vrstvami. Zároveň lze bentonity v přírodě nalézt v podobě drobných usazenin ve tvaru čočky (Kogel et al., 2006).

Nejtypičtějším způsobem tvorby bentonitu je přeměna sopečného popelu nebo tufu in situ (zjílovatění). Takovou přeměnou se rozumí dlouhodobý proces cyklického zvětrávání, kterému byl v minulosti sopečný materiál vystaven. V menší míře bentonit vzniká na hydrotermální bázi, kde dochází k přeměně stávajících vyvěřelých hornin na bentonit (Kogel et al., 2006).

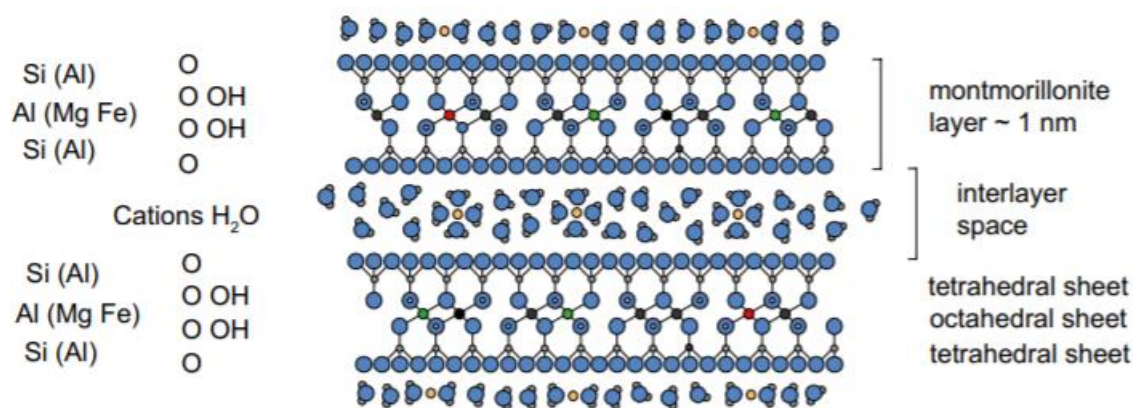
Obecně lze konstatovat, že pro většinu ložisek bentonitu má matečná hornina křemičitý charakter a pochází z období třetihor. Přeměna sopečného popelu na bentonit se řadí k hydratační reakci, která za přítomnosti hořčíku vytváří nadbytečné množství oxidu křemičitého a alkalických iontů. Pro kvalitnější bentonity platí, že jejich nejběžnějším způsobem vzniku je přeměna popelu v kontaktu s mořskou vodou. Mezi další způsoby patří kontakt s jezerními nebo podzemními vodami alkalického charakteru. V přírodě se hornina může nacházet v široké škále barev, nejčastěji v šedé, žluté, hnědé, bílé a olivově zelené (Kogel et al., 2006).

K obecnému určení geneze jílových surovin, kam se řadí mj. i bentonit, je zapotřebí komplexní laboratorní rozbor. Jednou ze spolehlivých metod ke stanovení původu materiálu je využití stabilních izotopů O, H nebo C. Pouze při spojení izotopových dat s důkladným geologickým výzkumem zájmové oblasti a detailním určením mineralogie materiálu lze správně určit genezi zkoumané horniny (Hanus et al., 2005).

2.3 Mineralogické složení

Bentonit je přirozeně se vyskytující materiál, který je složen převážně z jílových minerálů ze skupiny smektitů. Z této skupiny zaujímá u bentonitu největší podíl minerál montmorillonit. Tento podíl představuje u většiny vysoce kvalitních komerčních bentonitů okolo 80 %, což by mělo při uvažování hlubinného úložiště zajistit nejstudovanějším bentonitům obdobné těsnící vlastnosti (Karnland et al., 2006).

Montmorillonit z řady smektitů je složen ze dvou křemičitých tetraedrických sítí, mezi nimiž se nachází jedna centrální – oktaedrická síť. Na základě poměru vrstevních sítí je minerál označován jako 2:1. Vrstevní komplex jílového minerálu je uveden na obrázku 1 (Al-Ani a Sarapää, 2008).



Obrázek 1 Znárodnění dvou montmorillonitových vrstev s mezivrstvou kationtů a molekul vody (Karnland et al. 2006)

Na obrázku jsou znázorněny jednotlivé sítě a mezivrstevní prostor montmorillonitu, které dohromady tvoří jeho finální podobu. Pro minerál montmorillonitu platí, že tetraedrická síť je tvořena centrálním iontem křemíku, který může být částečně nahrazen hliníkem. Pokud se hliník v tetraedrické síti stane dominantním, nazývá se minerál beidellit (Al-montmorillonit). V minerálu však dochází k výraznější substituci v oblasti oktaedrické sítě, kde je centrální iont hliník často nahrazován iontem hořčíku a železa. Jsou-li oktaedrické pozice dominantně zaplněny hořčíkem, jedná se o jílový minerál saponit (Mg-montmorillonit), zatímco pokud jsou zaplněny iontem železa, označuje se minerál jako nontronit (Fe-montmorillonit). Všechny tyto i jiné substituce iontů nepodmíněně vedou k vytvoření záporného náboje, který vzniká v místech, kde k dané substituci právě dochází, přičemž se může jednat o oblast tetraedrické či oktaedrické sítě. Náboj v uvažované tetraedrické či oktaedrické síti je následně vyvážen mezerou mezi zmiňovanými sítěmi. Výplň tohoto mezivrstevního prostoru je zpravidla tvořena molekulami vody a dílčími kationty, které mohou být v důsledku vyrovnání náboje navázány.

Schopnost poutat různé kationty do své struktury je označována jako sorpce a její význam je v případě montmorillonitu klíčový, neboť dokáže způsobit výrazné změny ve výsledném chování jílového minerálu. K vůbec nejčastějším kationtům, jež mohou být do prostoru mezivrstev navázány, patří vápník a sodík. Jinými slovy, v mezivrstev je negativní náboj vyvážen kationty vápníku a sodíku a studovaný bentonit tak lze v přírodě nacházet převážně ve formě Ca-montmorillonitu a Na-montmorillonitu (Al-Ani a Sarapää, 2008). Jelikož se oba zmíněné typy intenzivně studují v rámci výzkumu budoucích hlubinných úložišť, budou v následující kapitole podrobně rozebrány.

U nejkvalitnějších komerčních bentonitů se může lišit především variabilita doplňkových minerálů, která pramení z typu a způsobu vzniku jílového materiálu. Takovými minerály mohou být například živec, křemen, cristobalit, sádrovec, kalcit nebo pyrit (SKB, 2010a). Jak již bylo zmíněno, je pro všechny bentonity společné, že obsahují značné množství bobtnavého minerálu zvaný montmorillonit. I přes to však materiál může vykazovat odlišné charakteristiky, mezi které se dle Karnlanda et al. (2006) řadí:

- věk formace,
- celková mineralogie,
- molekulární struktura bobtnavých minerálů,
- typ a množství iontů,
- technická kvalita,
- těsnící vlastnosti.

2.4 Rozdělení bentonitu

Obecně lze konstatovat, že minerální a chemické složení bentonitu se odvíjí od způsobu vzniku ložiska, druhu matečné horniny a intenzity zvětrání. V důsledku těchto faktorů lze bentonity rozdělit na základě mezivrstevního kationtu, a to na sodný a vápenatý typ (Kogel et al., 2006).

Bentonity, jejichž převažujícím výměnným kationtem je Na^+ , jsou typické vysokým bobtnacím potenciálem, zatímco bentonity s dominantním kationtem Ca^{2+} v mezivrstev mají tuto schopnost podstatně nižší (Kogel et al., 2006).

Vedle dominantního sodíku a vápníku se do struktury mohou navázat i jiné typy kationtů, které dokážou výrazně ovlivnit výsledné vlastnosti bentonitu. Platí, že kationt vápníku Ca^{2+} je v mezivrstev montmorillonitu snadno vázán například s kationtem hořčíku Mg^{2+} a následně je

tak bentonit označován jako vápenato-hořečnatý typ. Ve všech případech se jedná o výměnné kationty, které mohou být například v souvislosti se změnou chemismu vody nahrazeny jinými kationty. Schopnost vázat a vyměňovat si různé typy kationtů je označována jako kationtová výměnná kapacita (CEC) a je detailně rozebrána v kapitole 2.5.3.

2.5 Základní fyzikálně-chemické a mechanické vlastnosti

Vybrané vlastnosti bentonitu, které charakterizují jeho chování a jsou níže v této kapitole popsány, se řadí mezi rozhodující faktory, jež dokážou minimalizovat potenciální šíření radionuklidů z hlubinného úložiště. Pro dokonalé zajištění radioaktivního odpadu je žádoucí, aby měl zvolený bentonit vhodné mineralogické složení. Základním předpokladem vhodné mineralogie je vysoké zastoupení montmorillonitové složky, která umožní bentonitu dostatečně nabobtnat a vytvořit tak nepropustnou bariéru. Dalším významným rysem je dominantní typ kationtu v mezivrství. Kationty výrazně ovlivňují bobtnací schopnost bentonitu a díky tomu i další studované těsnící charakteristiky. Význam montmorillonitové složky a výměnného kationtu je popsán v kapitole 2.3.

Z výše uvedených vlastností vyplývají klíčové mechanické charakteristiky bentonitu, mezi něž patří bobtnací potenciál, hydraulická vodivost, CEC, plasticita a objemová hmotnost, které jsou v následujících podkapitolách detailně rozebrány.

2.5.1 Bobtnací potenciál

Bobtnání bentonitu představuje proces, při kterém hornina výrazně zvětšuje svůj objem. K samotnému ději dochází typicky v interakci s vodou, kterou si hornina v důsledku sání odebírá ze svého okolí. Voda postupně zaplňuje póry bentonitu a vstupuje do mezivrství jílových minerálů, kde hydratuje výměnné kationty. Tato hydratace vedoucí rovněž ke zvětšení celkového objemu bentonitu trvá do doby jeho plné saturace.

Pokud je bentonitu umožněno samovolné zvětšování objemu, je tento efekt označován jako volné bobtnání. Uvažovaný bentonit je však v hlubinném úložišti obklopen okolní horninou a možnost volného bobtnání je tak omezena na vyplňování technologických mezer na kontaktu bentonitu a okolních bariér. To vede k nahromadění tzv. bobtnacího tlaku uvnitř bentonitové vrstvy. Při uvažování hlubinného úložiště se částečně uplatňují oba zmíněné procesy (volné bobtnání a mobilizace bobtnacího tlaku), jejichž význam je popsán v kapitole 3.3.3.

Čím větší podíl bobtnavých minerálů bentonit obsahuje, tím vyšší hodnoty bobtnacího potenciálu bude hornina vykazovat. Současně se tyto hodnoty budou zvyšovat s rostoucí

objemovou hmotností bentonitu. Tato přímá závislost byla dokázána prostřednictvím laboratorních zkoušek volného bobtnání a bobtnacího tlaku, jejichž průběh a způsob měření lze nalézt v kapitole 5.1.

2.5.2 Hydraulická vodivost

Dalším klíčovým parametrem bentonitové bariéry je hydraulická vodivost k . Ta na rozdíl od propustnosti K , která představuje vlastnost prostředí vycházející pouze z geometrie uspořádání zrn a pórového prostoru, uvažuje nejen vlastnost prostředí, ale současně vlastnosti tekutiny v něm protékající. K hlavním vlastnostem tekutiny patří především hustota a viskozita média.

Hydraulická vodivost bentonitu se odvíjí zejména od mineralogického složení, počáteční objemové hmotnosti a stupně nasycení. Základní předpoklad pro zajištění dostatečně nízké hydraulické vodivosti bentonitové bariéry je, že bobtnající bentonit musí v hlubinném úložišti dokonale utěsnit všechny konstrukční mezery uvnitř bariéry, aby nedocházelo k vytváření preferenčních cest, prostřednictvím kterých by radionuklidy mohly uniknout (Sällfors a Öberg-Högsta, 2002).

Stanovení hydraulické vodivosti vychází z Darcyho zákona, který byl odvozen francouzským autorem Henrym Darcym. Zákon říká, že objemový průtok Q přes pórové prostředí přímo závisí na hydraulickém gradientu, hydraulické vodivosti a průřezu plochy, nepřímo pak na délce dráhy filtrace. Zákon, jenž zahrnuje všechny zmíněné parametry, lze vyjádřit obecným vztahem pro proudící kapalinu v nasyceném porézním tělese (1), popřípadě s detailnějším popisem hydraulického gradientu (2):

$$Q = k \cdot A \cdot i \quad [m^3 \cdot s^{-1}] \quad (1)$$

nebo také

$$Q = k \cdot A \cdot \frac{\Delta h}{\Delta l} \quad [m^3 \cdot s^{-1}] \quad (2)$$

kde hydraulický gradient $\frac{\Delta h}{\Delta l} [m \cdot m^{-1}]$ představuje rozdíl hydraulických výšek $\Delta h [m]$ mezi dvěma body, které jsou definovány jejich vzájemnou vzdáleností $\Delta l [m]$ a plochou vzorku $A [m^2]$, kterou uvažované médium protéká.

Pro správné stanovení hydraulické vodivosti je žádoucí, aby laboratorní měření bentonitu co nejvíce odpovídalo skutečným podmínkám, kterým bude bentonitová bariéra v hlubinném úložišti vystavena. Dále platí, že hydraulická vodivost přímo závisí na objemové hmotnosti, a

proto je nutné, aby při zkoušce vzorek nebobtnal a po celou dobu sycení byla objemová hmotnost konstantní. Zkouška je tedy prováděna ve speciálních komorách, které zabraňují nabobtnání a umožňují zachování konstantního objemu. Z toho důvodu nejsou pro tento účel tradiční propustoměry vhodné. Konkrétní příklad měření hydraulické vodivosti uvádí například Wang et al. (2013).

2.5.3 Kationtová výměnná kapacita (CEC)

Parametr označující se jako CEC představuje množství iontů a nabitých anorganických a organických molekul, které mohou být navázány do struktury bentonitu. Tato sorpční schopnost, která napomáhá smektitovým minerálům adsorbovat a vyměňovat si jednotlivé ionty, vzniká záporný náboj v mřížce montmorillonitových minerálů. Převládající typ kationtu ovlivňuje mechanické vlastnosti studovaného bentonitu. S ohledem na všechny výměnné kationty platí, že za daných podmínek je nelze stejným způsobem nahradit. V zásadě lze uplatnit zákon náhrady kationtů (3), který zní:



Ze zákona vyplývá, že například kationt vápníku Ca^{2+} je snadněji nahrazen kationtem sodíku Na^+ než opačně. Z hlediska bobtnacího potenciálu platí, že lithium zajišťuje bentonitu nejvýraznější objemové změny, zatímco u ostatních kationtů v návaznosti na výše uvedený zákon tento efekt postupně klesá (Pusch, 2001).

2.5.4 Plasticita

Jedna z dalších důležitých charakteristik pro výslednou funkci bentonitové bariéry je plasticita bentonitu. Jedná se totiž o mechanickou vlastnost, díky které bentonit po nasycení bariéry dokáže zacelit všechny stávající mezery, jež se nachází na rozhraní dvou odlišných materiálů. Tím je myšlen především kontakt bentonitu s kontejnerem a kontakt bentonitu s horninovým masivem. Současně vysoká plasticita umožňuje vnitřní vyrovnání objemové hmotnosti uvnitř bentonitové bariéry a zatěsnění spár mezi bentonitovými segmenty. Jinými slovy se jedná o parametr, který zaručuje úplnou homogenizaci bentonitové bariéry. Navíc v případě nově vzniklé trhliny jakéhokoliv původu dokáže bentonit díky plasticitě tuto mezeru znovu utěsnit a lze tak hovořit o samohojící funkci.

Plasticita, která se značí indexem plasticity I_p , je definována rovnicí 4 jako rozdíl meze tekutosti w_L a meze plasticity w_P :

$$I_p = w_L - w_P \quad (4)$$

Index plasticity popisuje schopnost zeminy vázat vodu do své struktury. Zároveň představuje rozsah vlhkosti, ve kterém je zemina stále plastická. Pro bentonit platí, že tyto hodnoty jsou extrémně vysoké v důsledku schopnosti montmorillonitu vázat vodu do mezivrstev.

2.5.5 Objemová hmotnost

Pro bentonit v hlubinném úložišti je charakteristické, že se bobtnací potenciál zvyšuje s jeho počáteční objemovou hmotností a stejně tak klesá jeho hydraulická vodivost. Tyto závislosti jsou na konkrétních bentonitech detailně studovány v kapitole 4. Při konstrukci bentonitové bariéry je tak nutné instalovat bentonit v co nejvyšší míře zhutnění. Té je možné nejefektivněji dosáhnout buď prostřednictvím bloků nebo pelet, které jsou z práškového bentonitu lisovány před jeho umístěním do bariéry. Výsledná hodnota objemové hmotnosti po nasycení a zhomogenizování bariéry je tak zásadní pro její těsnicí funkci.

Obecně je objemová hmotnost definována jako poměr hmotnosti uvažovaného tělesa ku jeho objemu zahrnující všechny pórový prostor. Uvažované póry mohou být zpravidla vyplněny vodou, pokud však objem vody není roven objemu volného prostoru, zbývající části připadá vzduch. Obecný vztah pro objemovou hmotnost je charakterizován rovnicí 5:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad [kg \cdot m^{-3}] \quad (5)$$

kde m [kg] představuje hmotnost uvažovaného materiálu v aktuálním stavu a V [m³] jeho objem.

Dále je možné rozlišit dva specifické typy objemových hmotností. Jedná se o objemovou hmotnost suché zeminy (rovnice 6) a objemovou hmotnost nasycené zeminy (rovnice 7).

$$\rho_d = \frac{m_d}{V_t} \quad [kg \cdot m^{-3}] \quad (6)$$

$$\rho_{sat} = \frac{m_t}{V_t} \quad [kg \cdot m^{-3}] \quad (7)$$

kde m_d představuje hmotnost suchého vzorku, m_t součet hmotností vody a suchého vzorku a V_t značí původní objem vlhké zeminy.

Při výzkumu těsnících vlastností bentonitu se nejběžněji míra jeho zhutnění vyjadřuje prostřednictvím hodnoty ρ_d .

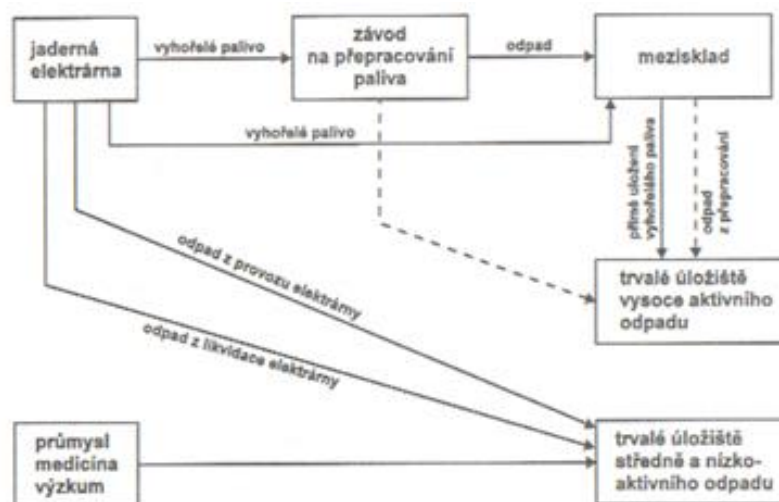
3 Úložiště radioaktivního odpadu

Při objevení radioaktivity se lidstvu otevřely nové možnosti, které vedly k celkové změně vnímání světa. Tato změna se projevila ve zdravotnictví, jaderném výzkumu, při výrobě jaderných zbraní, ale také při výrobě jaderné elektřiny. Právě výroba jaderné energie představuje proces, který je z hlediska činností a objemu radioaktivního odpadu ve světě nejvýznamnější (Berkhout, 1991).

V rámci této kapitoly je přiblíženo rozřídění radioaktivního odpadu, popsán způsob jeho ukládání a detailně rozebrán koncept hlubinného úložiště se zaměřením na požadavky a procesy týkající se bentonitové bariéry.

3.1 Rozřídění radioaktivního odpadu

Z praktických důvodů se radioaktivní odpady dělí na nízko, středně a vysoce aktivní. Tyto typy odpadů se dále dělí na krátkodobé a dlouhodobé, a to v závislosti na obsahu radioaktivních nuklidů s krátkými nebo dlouhými poločasy rozpadu. Hlavním kritériem pro zařídění odpadů je měrná aktivita či teplo uvolňované ve hmotě odpadu při absorpci emitovaného záření. Vysoce aktivní odpad je definován jako materiál, který produkuje více než 2 kW/m^3 . Pro nízko a středně aktivní odpad platí, že produkuje méně tepla a zároveň jeho měrná aktivita nepřesahuje hodnotu, při níž se látka z hlediska příslušných legislativních norem považuje za vysoce radioaktivní. Tvorba a následný proces zpracování radioaktivního odpadu jsou detailně znázorněny na obrázku 2 (Hála, 1998).



Obrázek 2 Zdroje a pohyb radioaktivního odpadu. Upraveno podle (Hála, 1998)

Na obrázku je popsán transport radioaktivního materiálu, pro který není nalezeno další hodnotné využití. Z tohoto hlediska se jedná o radioaktivní odpad, který je zapotřebí bezpečně uskladnit. K odvětvím, která radioaktivní odpad produkují, patří především průmysl, farmacie, výzkum a odpad z jaderných elektráren. V případě průmyslu, farmacie a výzkumu putuje odpad zpravidla do trvalých středně a nízkoaktivních úložišť, zatímco jaderný odpad může být uskladněn do všech typů úložišť, a to v závislosti na míře jeho aktivity.

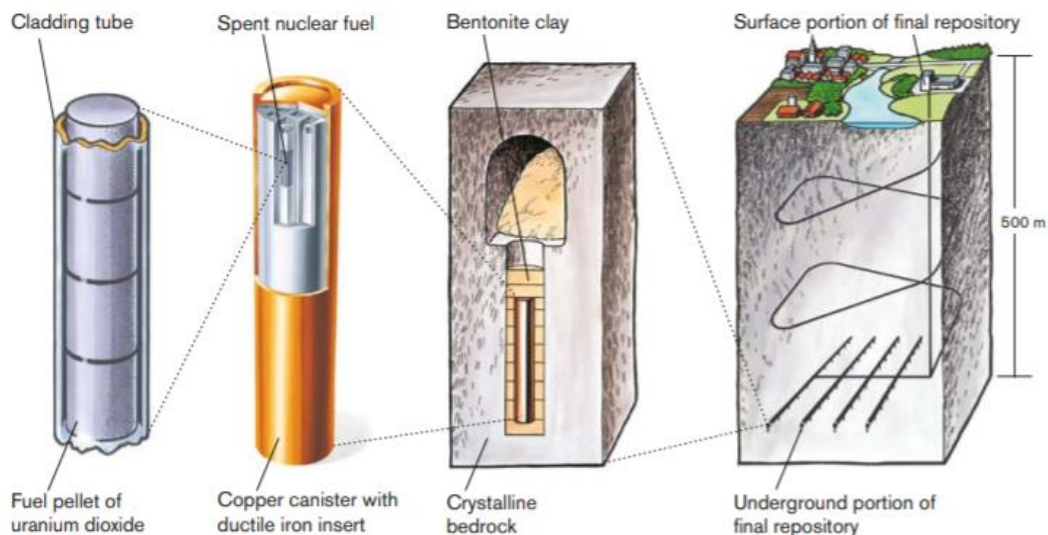
3.2 Způsob ukládání radioaktivního odpadu

Zpracování radioaktivního odpadu podrobně popisuje Hála (1998). Odpad se v kontejnerech přepravuje do úložiště, kde je bezpečně oddělen od okolního prostředí. Samotná koncepce specializovaného úložiště závisí na aktivitě a charakteru odpadu. Úložiště nízko a středně aktivního odpadu lze rozdělit na jednoduchá podpovrchová úložiště, úložiště s betonovými jámkami a důlní prostory. Pro vysoce aktivní odpad je určeno hlubinné úložiště, které by se mělo nacházet zhruba 500 – 1000 m pod povrchem.

3.3 Hlubinné úložiště

Základní princip hlubinného úložiště je založen na geologicky stabilním horninovém prostředí, jinak označovaném jako přírodní bariéra, a bariéře inženýrské. Inženýrská bariéra spočívá v kombinaci ukládacích kontejnerů obsahujících radioaktivní odpad a vrstvy ztuhlého bentonitu, která vyplní zbylý prostor mezi kontejnerem a horninou. Při vzájemné součinnosti přírodní a inženýrské bariéry lze hovořit o systému, který se nazývá multibariérový a jehož primární funkcí je zajistit dlouhodobou bezpečnost před únikem radioaktivních látek do životního prostředí (Vojtěchová, 2019).

Na obrázku 3 je představeno schéma hlubinného úložiště, jehož jednotlivé komponenty musí ve vzájemné kooperaci uchovat radioaktivní odpad po mnoho let. Podle Gibba (1999) se tento časový rámec izolace pohybuje mezi 10^5 a 10^6 lety, během něhož dojde ke snížení radioaktivity na přijatelnou úroveň.



Obrázek 3 Koncept hlubinného úložiště pro uložení radioaktivního odpadu (SKB, 2011)

Na obrázku je zobrazena jedna z variant hlubinného úložiště plánovaná na území Švédska. Jednotlivé prvky hlubinného úložiště jsou popsány v následujících kapitolách.

3.3.1 Přírodní bariéra

Přírodní bariérou se rozumí jakékoliv horninové prostředí, ve kterém je plánováno hlubinné úložiště. Zvolená přírodní bariéra by měla zajistit vhodné geologické, hydrogeologické a geochemické podmínky, které by měly zabránit volnému úniku radionuklidů do životního prostředí.

Klíčové vlastnosti příznivého prostředí pro ukládání radioaktivního materiálu lze shrnout podle Chapmana (2006) takto:

- dlouhodobá tektonická stabilita, kde prostředí není významně ovlivněno okolními tektonickými procesy a událostmi (např. sopečná činnost, zemětřesení),
- nízká propustnost horninového prostředí,
- odolnost vůči dopadům změny klimatu,
- tepelná stabilita horninového systému,
- horninový masiv s vyhovujícími vlastnostmi pro výstavbu úložiště,
- upřednostnění pohybu radionuklidů prostřednictvím difuze před advekcí v pomalu se pohybujících podzemních vodách,
- schopnost rozptýlit jakýkoliv plyn vytvořený v úložišti.

Z dlouhodobého hlediska je bezpečnost hlubinných úložišť založena na předpokladu, že potenciální únik radionuklidů do biosféry by byl v tak malém množství a nízké koncentraci, že by měl minimální negativní vliv na okolí (Chapman, 2006).

3.3.2 Inženýrská bariéra

V hlubinném úložišti se vedle přírodní bariéry objevuje i bariéra inženýrská. Ta má za úkol zamezit všem negativním vlivům souvisejících s působením radioaktivního odpadu, které mohou jakkoliv kontaminovat přírodu v zájmové oblasti.

Komponenty inženýrské bariéry lze rozdělit na úložný kontejner a izolační systém tvořený tlumícími, výplňovými a těsnícími materiály. Za primární bariéru bránící úniku radionuklidů z úložiště se považuje úložný kontejner. Posouzení životnosti kontejneru závisí na geologických podmínkách vybrané lokality, avšak řádově se odhaduje na několik set až tisíce let (Vokál, 1997). Podle technické zprávy Vokála et al. (2015) tlumící, výplňové a těsnící systémy, které jsou tvořeny zpravidla zhutněným bentonitem, zajišťují to, že:

- do oblasti kontejneru s radioaktivním odpadem se voda ani další korozi urychlující látky přes nasycený buffer nedostanou (např. mikroorganismy) jinak než difuzí,
- výkyvy napětí v důsledku pohybu horniny budou ztlumeny plasticitou bentonitu,
- migrace radionuklidů z kontejneru bude zpomalena difuzí přes bentonitovou bariéru,
- všechny volné prostory mezi horninovým masivem a kontejnerem budou utěsněny v důsledku bobtnacích schopností bentonitu.

Inženýrskou bariéru lze dále rozdělit na buffer a backfill. Zmíněný buffer tvoří nepropustný obal okolo samotného kontejneru s radioaktivním odpadem a zastává primárně funkci těsnící. Z toho důvodu jsou na něj kladeny přísnější požadavky, které jsou v kapitole 3.3.4 detailně popsány. Ze stejného materiálu, avšak s nižší mírou zhutnění, je složen backfill, kterým jsou tvořeny ukládací chodby v celém komplexu hlubinného úložiště. Funkce backfillu je tedy vedle těsnící i výplňová. Jelikož je vzdálenost backfillu od kontejneru větší než v případě bufferu, jsou na něj kladeny podstatně nižší nároky (Vokál, 1997).

3.3.3 Procesy v bentonitové bariéře

Jelikož buffer slouží jako bezprostřední překážka před potenciálním únikem radionuklidů z kontejneru, bude pozornost v této kapitole primárně věnována procesům probíhajícím v této bariéře.

Prakticky ihned po uložení radioaktivního odpadu započnou v hlubinném úložišti procesy spojené s radioaktivním zářením. Nejvýznamnější část záření se však do oblasti bufferu nedostane, neboť bude stěnou kontejneru oslabena či dokonce pohlcena (SKB, 2010a). Rozkládající se produkty odpadu jsou doprovázeny uvolňovanou energií, jejíž hlavní formou je přeměna na teplo (SKB, 2010b).

Zpočátku se po uložení odpadu budou mezi bariérami nacházet technologické mezery, prostřednictvím kterých bude teplo transportováno do blízkého okolí. Další způsob transportu tepla je předpokládán skrze nesaturovaný bentonit. Až dojde k žádoucímu nasycení a nabobtnání bentonitu, vyplní se všechny volné mezery a přenos tepla bude probíhat skrze nasycený vodivý bentonit do horninového prostředí. Působením na okolní ochranné vrstvy bude teplo vytvářet teplotní pole s proměnným gradientem, které bude během let postupně klesat (SKB, 2010a).

Při nedostatečném odvodu se na rozhraní kontejneru a bufferu naakumuluje přebytečné teplo, které může vést k překročení maximální plánované teploty bufferu (SKB, 2010a). Z důvodu možného ovlivnění bentonitové bariéry se v současné době jako maximální teplota na vnější straně kontejneru obvykle uvažuje hodnota $T = 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Vzhledem k tomu, že se však generované teplo s časem poměrně rychle snižuje a montmorillonitová přeměna představuje dlouhodobý proces, teplotní kritérium není jednoznačně definováno (Sellin a Leupin, 2013). Z dlouhodobého hlediska je v rámci teplotních procesů v hlubinném úložišti nejdůležitějším parametrem tepelná vodivost, která závisí zejména na objemové hmotnosti, míře nasycení a minerálním složení bentonitové složky (SKB, 2010a).

Včetně zahřívání vnitřní strany bufferu bude bariéra zároveň podléhat procesu sycení, které na rozdíl od působícího tepla bude na buffer působit z opačné strany. Jelikož sycení bufferu představuje dlouhodobý proces, bude teplo zpočátku dominantním dějem, který může částečně způsobovat dokonce vysoušení vnitřní části bentonitové bariéry. S časem bude generované teplo slábnout a míra saturace se naopak bude v důsledku působícího sání zvětšovat. Rychlost sycení se bude odvíjet zejména od propustnosti bufferu, podílu montmorillonitové složky a množství vody, které bude bufferu horninové prostředí dodávat.

Na saturaci bufferu bude bentonit reagovat částečným nabobtnáním, které postupně povede k utěsnění technologických mezer. Po uzamknutí volných prostor dojde k homogenizaci celé bentonitové bariéry a mobilizaci bobtnacího tlaku, jehož účinky mají za následek vytvoření nepropustné bariéry. Teplota nasyceného bufferu bude v průběhu času klesat, ustálí se dosavadní proudění (advekce) a dominantním transportním mechanismem se stane difuze.

Difuze je charakteristická tím, že rozpuštěné látky se v bariéře budou pohybovat z oblasti s vyšší koncentrací do oblasti s nižší koncentrací. To má za následek redistribuci rozpuštěných látek ve vodě včetně potenciálních radionuklidů v ní obsažených (SKB, 2010a).

V případě backfillu jsou předpokládány obdobné vlastnosti a probíhající procesy jako v bufferu. V obou případech se sice jedná o stejný druh materiálu, ale jak již bylo zmíněno v úvodu této kapitoly, na vrstvu backfillu nejsou požadovány tak striktní nároky. Konkrétně je na tuto vrstvu požadována nižší objemová hmotnost ρ_a , která má po nasycení bentonitu za následek nižší hodnotu bobtnacího tlaku a také částečně vyšší hodnotu hydraulické vodivosti. Z hlediska teplotního kritéria se předpokládá, že se teplota backfillu nebude příliš lišit od průměrné teploty horninového masivu, z toho důvodu by účinky tepla neměly mít žádný vliv na mechanické vlastnosti. Dále se očekává vyšší propustnost a difuzivita bariéry.

3.3.4 Požadavky na buffer

Pro dlouhodobé a spolehlivé fungování bentonitového bufferu je zapotřebí stanovit pro navrhovanou bariéru konkrétní materiálové požadavky, díky nimž lze předejít potenciálnímu úniku radionuklidů do biosféry. Ke klíčovým požadavkům na těsnicí materiál, jenž je nezávislý na hostitelské hornině, patří vysoký obsah montmorillonitové složky, nízká hydraulická vodivost, vysoká bobtnací schopnost, dostatečná tepelná vodivost a reologická stálost materiálu (Sellin a Leupin, 2013).

Dalším důležitým požadavkem na bentonitovou bariéru je omezení transportu rozpuštěných látek způsobujících korozi kontejneru, která může vést k úniku radionuklidů do okolí. To lze zajistit dostatečně nízkou hydraulickou vodivostí bentonitu, která nepodmíněně povede k difuzi jako převládajícímu transportnímu mechanismu (Sellin a Leupin, 2013).

Švédská technická zpráva SKB (2010a) uvádí příklady konkrétních limitních hodnot vybraných vlastností, které by měl buffer pro zajištění bezpečnosti hlubinného úložiště obsahovat. Uvedené hodnoty jsou však orientační, neboť si každý stát plánující úložiště specifikuje konkrétní kritéria individuálně. Souhrn vybraných kritérií lze charakterizovat následovně:

- hydraulická vodivost k je menší než 10^{-12} m/s,
- bobtnací tlak σ_s je větší než 1 MPa,
- maximální teplota T bufferu je z dlouhodobého hlediska menší než 100 °C.

Sellin a Leupin (2013) ve shrnutí své práce uvádějí, že objemová hmotnost suché složky bentonitu by se měla pro plně nasycený a homogenizovaný buffer pohybovat v rozmezí 1,450 – 1,650 g/cm³.

4 Stěžejní charakteristiky vybraných bentonitů

Rozdíly bentonitů, jejichž ložiska se vyskytují prakticky po celé planetě, spočívají zejména v místě a způsobu jejich geneze a dále v mineralogickém a chemickém složení, které ovlivňuje jejich charakteristické chování při interakci s vodou. Ke vzájemnému porovnání klíčových vlastností pro stavbu hlubinných úložišť jsou v této kapitole vybrány a popsány nejznámější a ve světě nejstudovanější typy. Na závěr této kapitoly je popsán český bentonit BCV, který je v současné době studován jako potenciální materiál pro hlubinné úložiště plánované na našem území.

4.1 Bentonit FEBEX

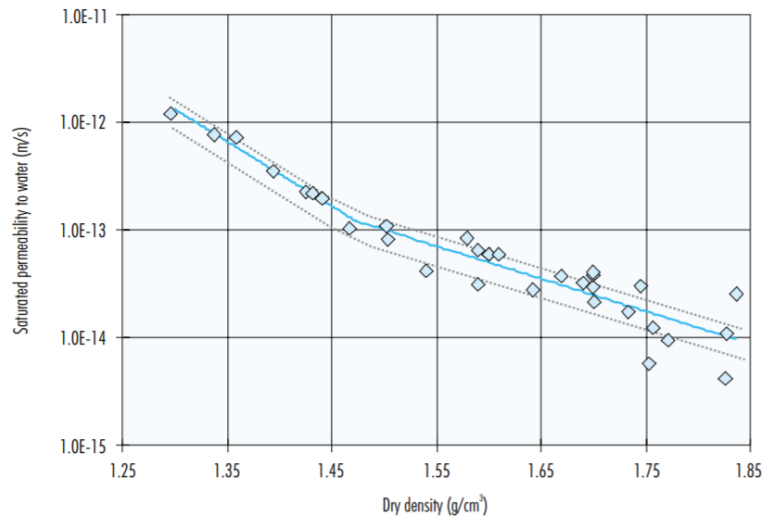
Charakteristiky bentonitu FEBEX prezentované v této kapitole byly převzaty z dizertační práce Villar (2002).

Z mineralogického hlediska je bentonit tvořen z 92 % smektitem, jehož převládajícím minerálem je montmorillonit. Dále jsou v menší míře po zhruba 2 % zastoupeny minerály jako křemen, jeho krystalická forma cristobalit a plagioklas.

Analýza kationtové výměnné kapacity ukázala, že hlavními vyměnitelnými kationty jsou vápník, hořčík, sodík a v menší míře draslík. Největším podílem byl v bentonitu zastoupen vápník Ca^{2+} , který obsahoval 47 meq/100g, dále pak hořčík Mg^{2+} s obsahem 36 meq/100g, sodík Na^{2+} s 25 meq/100g a draslík K^{+} s obsahem 2,2 meq/100g. Z těchto naměřených výsledků lze bentonit FEBEX zařadit mezi vápenato-hořečnaté typy. Na základě sečtení jednotlivých kationtů lze vypočítat celkovou hodnotu kationtové výměnné kapacity (CEC), která činí zaokrouhleně 111 meq/100g.

Průměrné hodnoty Atterbergových mezí byly stanoveny následovně: mez tekutosti $w_L = 102$ %, mez plasticity $w_P = 53$ % a index plasticity $I_P = 49$, přičemž 67 % materiálu náleželo částicím, jejichž velikost nepřesahovala 2 μm . Právě tato mezní hodnota určuje, zda se jedná o jílovou frakci (<2 μm) či o frakci prachovitou (60 – 2 μm), která je v případě FEBEXu zhruba 22 %.

V rámci měření hydraulické vodivosti byly zkoumány průtoky při objemových hmotnostech ρ_d v rozmezí 1,30 a 1,84 g/cm^3 . Pro měření byla použita destilovaná voda, jejíž teplota se pohybovala mezi 20 – 25 °C. Obrázek 4 představuje souhrn všech získaných hodnot hydraulické vodivosti v závislosti na jednotlivých ρ_d bentonitu FEBEX.

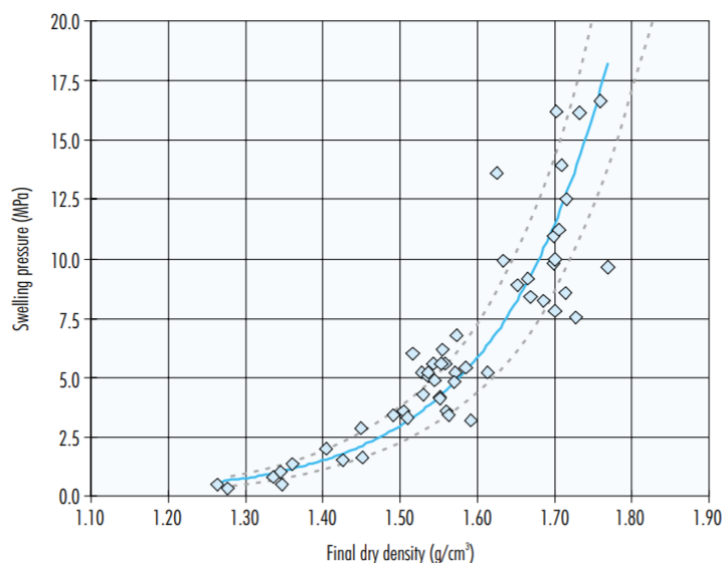


Obrázek 4 Závislost hydraulické vodivosti na ρ_d bentonitu FEBEX (Villar, 2002)

Z grafu lze vypočítat rozdíly v rozmezí více než dvou řádů, přičemž platí trend poklesu hydraulické vodivosti se zvyšující se ρ_d . Při nejvyšších objemových hmotnostech se hodnota hydraulické vodivosti pohybovala až v řádu 10^{-15} m/s.

Zároveň byla vypočítána mezní hodnota $\rho_d = 1,47$ g/cm³, která odděluje dva intervaly charakteristické různým hydraulickým chováním. Hlavní rozdíl mezi intervaly tkví v tom, že pod touto prahovou hodnotou je zaznamenán zřetelnější nárůst hydraulické vodivosti se snižující se objemovou hmotností vzorku.

Villar (2002) ve své práci také uvádí, že pro předpokládané suché objemové hmotnosti v bentonitové bariéře hlubinného úložiště (1,60 – 1,65 g/cm³) lze na základě naměřených závislostí odhadnout, že se hydraulická vodivost bude pohybovat v řádu 10^{-14} m/s a bobtnací tlak v intervalu 4 až 10 MPa. Na obrázku 5 je uvedena závislost bobtnacího tlaku na ρ_d bentonitu FEBEX.



Obrázek 5 Závislost bobtnacího tlaku na ρ_d bentonitu FEBEX (Villar, 2002)

Počáteční hodnoty ρ_d testovaných vzorků se pohybovaly v rozmezí $1,29 \text{ g/cm}^3$ až $1,88 \text{ g/cm}^3$, bobtnací tlak byl zaznamenán na intervalu 0,5 až 16,7 MPa. Z obrázku je zároveň patrný přibližně exponenciální trend nárůstu bobtnacího tlaku s rostoucí ρ_d vzorku. Při zkoušce byl bentonit syčen destilovanou vodou skrz spodní podstavu zkušební komory, která byla do přístroje vháněna po celou dobu testování. Za zmínku stojí fakt, že zejména u objemových hmotností přesahujících $1,60 \text{ g/cm}^3$ neumožňuje zařízení zcela zabránit deformaci vzorku, v důsledku čehož se konečná hodnota objemové hmotnosti liší od té počáteční. Pro přesnější interpretaci jsou tak na obrázku uvedeny hodnoty, které se stanovily až po ukončení zkoušky.

4.2 Bentonit MX-80

Další světově významný bentonit je označován pod komerčním názvem MX-80. Ten se díky dominantnímu kationtu sodíku v jeho struktuře řadí co do bobtnavosti mezi vůbec ty nejkvalitnější. Naleziště bentonitu MX-80 se nachází ve Wyomingu v severní části USA. Wyomingský bentonit byl v minulosti podroben mnoha studiím, jež zahrnují jeho ucelenou charakteristiku s ohledem na nejvýznamnější vlastnosti týkající se izolace radioaktivního odpadu.

Dále uvedené charakteristiky jsou převzaty z výzkumné práce Villar (2005). Po mineralogické stránce je v bentonitu v největší míře zastoupena smektitová složka s dominantním minerálem montmorillonitem (až 82 %), dále minerály jako křemen (4 – 12 %), živec (5 – 8 %) a z menší části cristobalit, kalcit a pyrit. Frakce menší než $2 \mu\text{m}$ je v bentonitu zastoupena zhruba v rozmezí 80 – 90 %.

Z hlediska kationtové výměnné kapacity bylo vyzorováno, že bentonit MX-80 obsahuje kationty sodíku, vápníku a hořčíku. Největší podíl zastává sodík, který nabývá hodnot 61 meq/100g, dále z menší části vápník s 10 meq/100g a hořčík s hodnotou 3 meq/100g. Na základě zmíněných hodnot je možné určit i kationtovou výměnnou kapacitu (CEC), která odpovídá hodnotě 74 meq/100g. V rámci Atterbergových mezí byla stanovena mez tekutosti na $w_L = 460 \%$, mez plasticity na $w_P = 70 \%$ a index plasticity $I_P = 390$ (Villar, 2005).

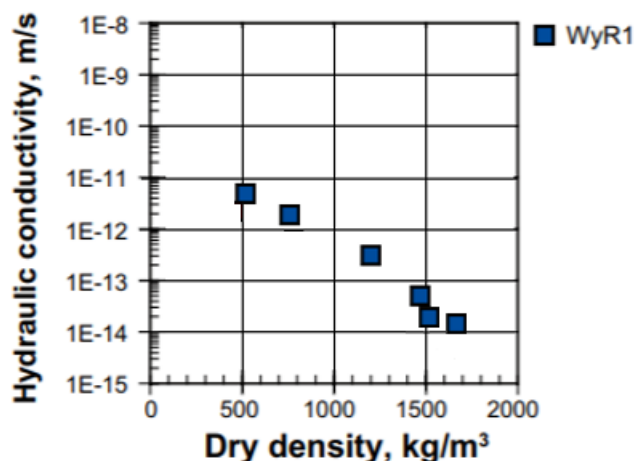
Dále jsou v této kapitole představeny parametry hydraulické vodivosti a bobtnacího tlaku, jejichž naměřené hodnoty byly převzaty v technické zprávě Karnlanda et al. (2006).

V tabulce 1 jsou znázorněny hodnoty hydraulické vodivosti v závislosti na jednotlivých objemových hmotnostech ρ_d , které byly u vzorku MX-80 stanoveny.

Tabulka 1 Hodnoty hydraulické vodivosti v závislosti na ρ_d bentonitu MX-80. Upraveno podle (Karnland et al. 2006)

Vzorek WyR1	ρ [kg/m³]	K [m/s]
	517	5E-12
	761	2E-12
	1202	3E-13
	1461	5E-14
	1538	4E-14
	1641	2E-14

Bentonit se značením WyR1 představuje materiál, který nebyl nijak obohacován a u sytícího média nedošlo k žádné úpravě. Sloupec ρ reprezentuje objemovou hmotnost suchého vzorku a sloupec K hodnoty hydraulické vodivosti, které se pohybují v rozmezí $5 \cdot 10^{-12}$ a $2 \cdot 10^{-14}$ m/s. Uvedené hodnoty byly přeneseny do grafu, jenž je znázorněn na obrázku 6. Z grafického znázornění vyplývá, že závislost hydraulické vodivosti na ρ_d je v níže uvedeném semilogaritmickém zobrazení přibližně lineární.



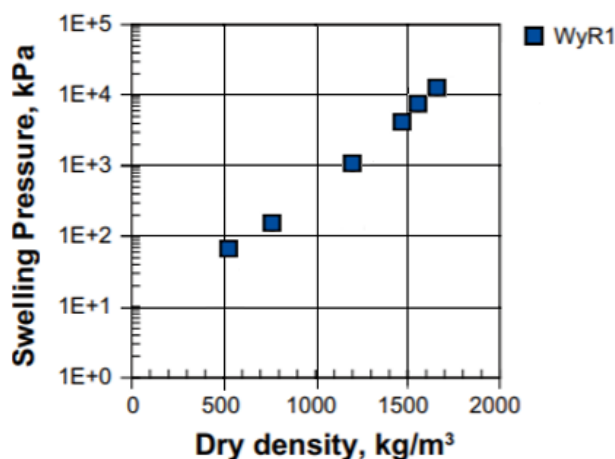
Obrázek 6 Graf závislosti hydraulické vodivosti na ρ_d bentonitu MX-80. Upraveno podle (Karnland et al. 2006)

Paralelně s hydraulickou vodivostí byl zkoumán i bobtnací tlak, a to se stejnými hodnotami objemových hmotností ρ_d . Hodnoty bobtnacího tlaku v závislosti na ρ_d jsou uvedeny v tabulce 2.

Tabulka 2 Hodnoty bobtnacího tlaku v závislosti na ρ_d bentonitu MX-80. Upraveno podle (Karnland et al. 2006)

Vzorek WyR1	ρ [kg/m³]	σ [kPa]
	517	61
	761	156
	1202	1020
	1461	4190
	1539	7590
	1641	12470

Z tabulky je patrné, že naměřené hodnoty bobtnacího tlaku se při daných objemových hmotnostech pohybovaly v rozmezí prvních desítek až téměř 12500 kPa. Sloupec ρ_d značí objemovou hmotnost suchého vzorku a σ naměřený bobtnací tlak. Na základě naměřených hodnot bylo vytvořeno grafické znázornění, které lze vidět na obrázku 7. Zde byl potvrzen trend, kde se zvyšující se objemovou hmotností roste bobtnací tlak. Zároveň se jako v případě hydraulické vodivosti potvrdilo, že závislost bobtnacího tlaku je v semilogaritmickém zobrazení přibližně lineární.



Obrázek 7 Graf závislosti bobtnacího tlaku na ρ_d bentonitu MX-80. Upraveno podle (Karnland et al. 2006)

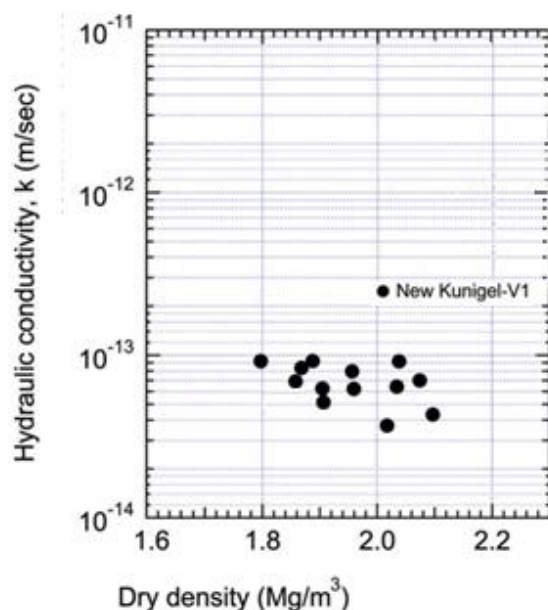
4.3 Bentonit Kunigel

Dále byl do bakalářské práce vybrán bentonit s komerčním názvem Kunigel V-1 (KV-1), jehož genezi lze hledat v Japonsku. Po mineralogické stránce obsahuje KV-1 zhruba 50 % dominantní smektitové složky (převážně montmorillonit), vedle které jsou v bentonitu obsaženy minerály jako křemen, živec, klinoptiolit, analcimit a kalcit (Tajima et al., 2006).

Komine a Ogata (1999) stanovili hodnotu meze tekutosti na $w_L = 473,9$ %, mez plasticity na $w_P = 26,61$ % a index plasticity na $I_P = 447,3$. Jílová složka < 2 μm činila z celkového množství 64,5 %.

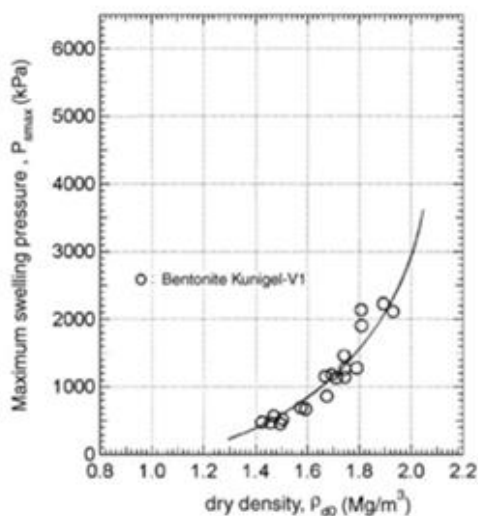
Kationtová výměnná kapacita (CEC) byla určena podle Komineho (2004) na 73,2 meq/100g. Dílčí kationty lze rozdělit na Na^+ nabývající hodnoty 40,5 meq/100g, Ca^{2+} s hodnotou 28,7 meq/100g, Mg^{2+} s 3 meq/100g a K^+ s 0,9 meq/100g. Bentonit tak lze s dominantním sodíkem v mezivrstvě zařadit mezi bentonity sodného typu.

Dále byla zkoumána hydraulická vodivost bentonitu KV-1, jejíž zkouška probíhala za stálé teploty, která dosahovala 22 °C. Na obrázku 8, který představuje závislost hydraulické vodivosti na různé objemové hmotnosti vzorku ρ_d , jsou uvedeny naměřené hodnoty. Pro stanovené objemové hmotnosti vzorku na intervalu od 1,8 do 2,1 Mg/m^3 byla naměřena hydraulická vodivost v rozmezí 10^{-13} a 10^{-14} m/s (Komine, 2008).



Obrázek 8 Graf závislosti hydraulické vodivosti na ρ_d bentonitu KV-1. Upraveno podle (Komine, 2008)

Zkouška bobtnacího tlaku byla stanovena sérií zkoušek při různých objemových hmotnostích ρ_d v intervalu 1,42 – 1,92 Mg/m^3 . Výsledky zkoušky jsou patrné na obrázku 9.



Obrázek 9 Graf závislosti bobtnacího tlaku na ρ_d bentonitu Kunigel V-1. Upraveno podle (Komine, 2004)

Na obrázku lze vidět graf hodnot bobtnacího tlaku v závislosti na ρ_d , která se pohybovala v rozmezí 1,4 – 2,0 Mg/m^3 , maximální bobtnací tlak se ustálil na intervalu 500 – 2300 kPa. Závislost bobtnacího tlaku je u bentonitu KV-1 přibližně exponenciální.

4.4 Bentonit FoCa7

Bentonit Fourges-Cahaignes, zkráceně FoCa7, je těsnicí materiál plánovaný zejména v rámci výstavby hlubinných uložišť na území Francie. Tento francouzský bentonit z oblasti pařížské

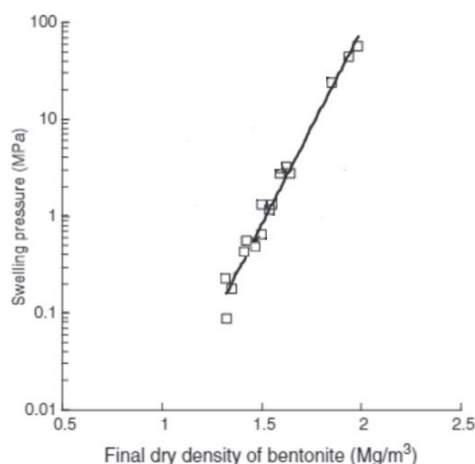
kotliny se řadí z hlediska jeho mineralogického uspořádání k vzácněji se vyskytujícím, neboť nese prvky interstratifikace. To v zásadě znamená, že struktura jílových minerálů je vícevrstevná. Saiyouri et al. (2000) vytvořili studii se zaměřením na bentonit FoCa7, jenž vykazuje známky dvouvrstevné struktury, a to konkrétně smektit-kaolinové. K detailnímu popisu mineralogického složení byl bentonit podroben rentgenové analýze, která ukázala, že vedle dominantních složek smektitu a kaolinitu se ve vzorku nachází i stopové množství křemene, gibbsitu a goethitu. Smektitová frakce představovala 80 % z celkového složení a množství kaolinitu, které bylo zjištěno na základě termální metody, bylo stanoveno na 7 %. Výsledky testů rovněž ukázaly, že vzorek obsahuje podstatnou část železa (5,44 g/100g), které patří k faktorům zapříčiňujícím snížení bobtnacího potenciálu. Dále byla provedena analýza vyměnitelných kationtů a změřena kationtová výměnná kapacita (CEC). Výsledky CEC jsou uvedeny v tabulce 3. Z uvedených hodnot vyplývá, že vzorek FoCa7 lze zařadit mezi bentonity vápenatého typu s hodnotou CEC 69 meq/100g.

Tabulka 3 Vyměnitelné kationty a kationtová výměnná kapacita bentonitu FoCa7 (Saiyouri et al., 2000)

CEC (meq/100 g of clay)	Na (meq/100 g of clay)	Ca (meq/100 g of clay)
69.1	2.64	62.90

V rámci studie Marciala et al. (2011) byly stanoveny Atterbergovy meze bentonitu FoCa7. Mez tekutosti byla vypočítána na hodnotu $w_L = 112$ %, mez plasticity na $w_P = 50$ % a index plasticity na $I_P = 62$.

Bobtnací tlak byl vyhodnocen ve studii Imberta a Villar et al. (2006) a je vyjádřen na obrázku 10 prostřednictvím grafu závislosti na ρ_d .



Obrázek 10 Graf závislosti bobtnacího tlaku na ρ_d bentonitu FoCa7. Upraveno podle (Imbert a Villar, 2006)

Při ρ_d v rozmezí 1,29 a 2,0 Mg/m³ nabyt vzorek bentonitu FoCa7 hodnot bobtnacího tlaku od 0,1 do 56 MPa a v semilogaritmickeém zobrazení byl zaznamenan lineární trend.

4.5 Bentonit GMZ

Nejstudovanějším bentonitem na území Číny je bentonit Gaomiaozí (GMZ) vyskytující se na hranici Číny s Mongolskem.

Wen (2006) uvádí, že bentonit GMZ-1 je charakteristický dominantním obsahem montmorillonitové složky, která činí 75,4 %. Vedle jílového minerálu montmorillonitu je bentonit dále složen z křemene (11,7 %), cristobalitu (7,3 %), živce (4,3 %), kaolinu (0,8 %) a kalcitu (0,5 %). Zároveň byl v rámci studie vytvořen souhrn jednotlivých kationtů a celkové kationtové výměnné kapacity (CEC), který je znázorněn v tabulce 4.

Tabulka 4 Přehled kationtové výměnné kapacity a dílčích kationtů bentonitu GMZ-1 (Wen, 2006)

Methylene blue exchange capacity / (mmol • (100 g) ⁻¹)	Cation exchange capacity / (mmol • (100 g) ⁻¹)	Real density / (g • cm ⁻³)	Alkali index
102	77.30	2.66	1.14
Exchangeable cation / (mmol • (100 g) ⁻¹)			
$E(k^+)$	$E(Na^+)$	$E(1/2Ca^{2+})$	$E(1/2Mg^{2+})$
2.51	43.36	29.14	12.33

Z tabulky je patrné, že výsledná hodnota CEC byla stanovena na 77,3 mmol/100g a na základě množství zastoupených kationtů lze bentonit GMZ-1 zařadit mezi bentonity sodného typu.

Ye et al. (2009) uvádí hodnoty Atterbergových mezí, které byly stanoveny následovně: mez tekutosti $w_L = 313 \%$, mez plasticity $w_P = 38 \%$ a index plasticity $I_P = 275$.

Bylo provedeno i měření hydraulické vodivosti a bobtnacího tlaku bentonitu GMZ-1, které je popsáno ve studii Wena (2006). Výsledky měření hydraulické vodivosti jsou zobrazeny v tabulce 5.

Tabulka 5 Závislost hydraulické vodivosti na ρ_d bentonitu GMZ-1 (Wen, 2006)

Dry density /(g · cm ⁻³)	Temperature /°C	Hydraulic conductivity /(m · s ⁻¹)
1.4	25	1.12×10^{-12}
1.6	25	1.94×10^{-13}
1.8	25	9.99×10^{-14}

Nejnižší hydraulická vodivost vzorku GMZ-1 při $\rho_d = 1,8 \text{ g/cm}^3$ byla stanovena na $9,99 \cdot 10^{-14} \text{ m/s}$.

Hodnoty bobtnacího tlaku byly stanoveny v rozmezí 0,09 – 10,10 MPa v závislosti na ρ_d bentonitu (viz tabulka 6).

Tabulka 6 Závislost bobtnacího tlaku na ρ_d bentonitu GMZ-1 (Wen, 2006)

Dry density/(g · cm ⁻³)	Swelling stress/MPa
1.2	0.09
1.4	0.58
1.6	3.17
1.8	10.10

4.6 Bentonit BCV

Na území České republiky se v souvislosti s plánovaným hlubinným úložištěm nejintenzivněji studuje bentonit z oblasti Černého vrchu (dále jen BCV), jehož výzkum těsnících vlastností započal až v posledních letech.

Ložiskové území BCV se rozprostírá na západním okraji Českého Středohoří, kde bentonit vznikl působením sopečné činnosti v období třetihor. V současné době se ložisko bentonitu vyskytuje o mocnosti 3 – 20 m a je překryto nadložím zhruba o 5 metrech. Bentonit lze nalézt buď těsně pod jeho nadložím v žlutookrové barvě (tento bentonit je méně kvalitní a je

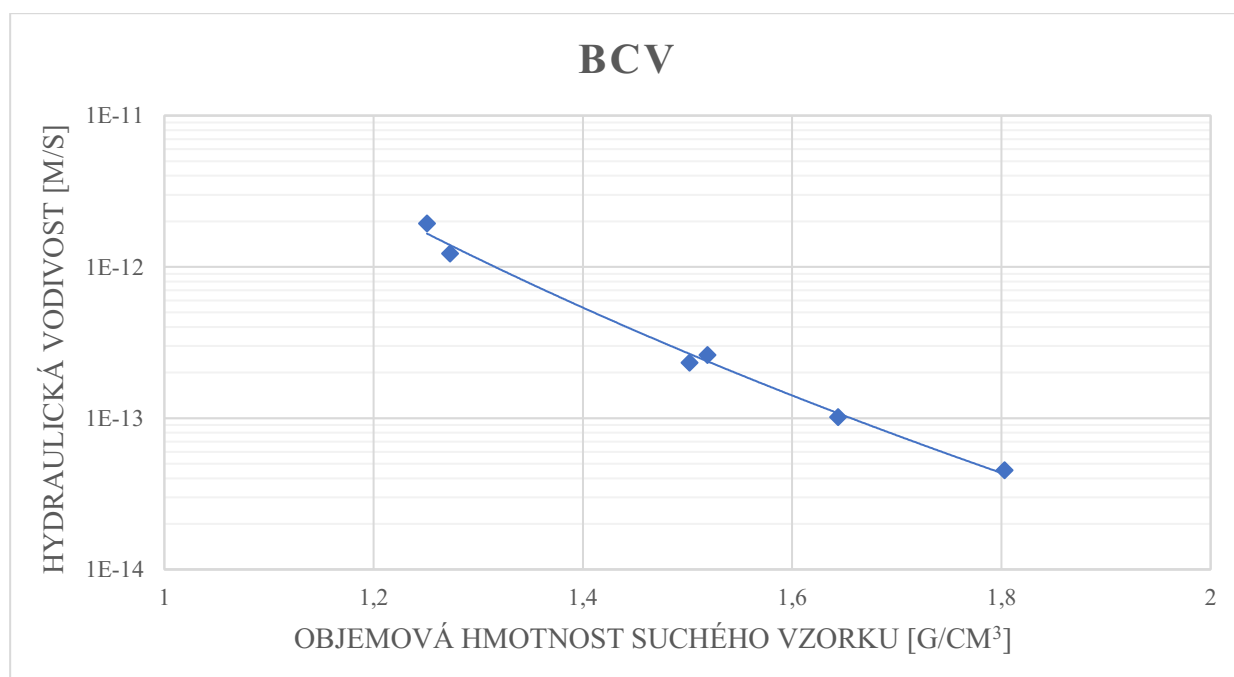
využívaný především ve stavebnictví a slévárenském průmyslu) či v modrém zabarvení pod čedičovou polohou, která může nabývat až mocnosti 15 metrů. Tento bentonit se svým složením řadí k těm kvalitnějším (Aron et al., 2013)

Prostřednictvím fázové XRD analýzy bylo zjištěno, že dominantním minerálem bentonitu BCV je smektit. Ten byl blíže určen jako montmorillonit s částečnou Fe substitucí v oktaedrických sítích. Podíl montmorillonitové složky byl stanoven na 71 %. K vedlejším minerálům obsažených v bentonitu patří křemen s 11 %, kaolinit s 4,5 %, kalcit se 4 % a illit s 3,1 % (Laufek et al., 2021).

Z hlediska zrnitostního poměru bentonit BCV obsahuje 60 % jílové frakce, 35 % prachové frakce a 5 % písčité frakce. Dále byly určeny hodnoty konzistenčních mezí, které byly stanoveny kuželovou zkouškou následovně: $w_L = 136 \%$, $w_P = 45 \%$ a $I_P = 91$ (Najser, 2020).

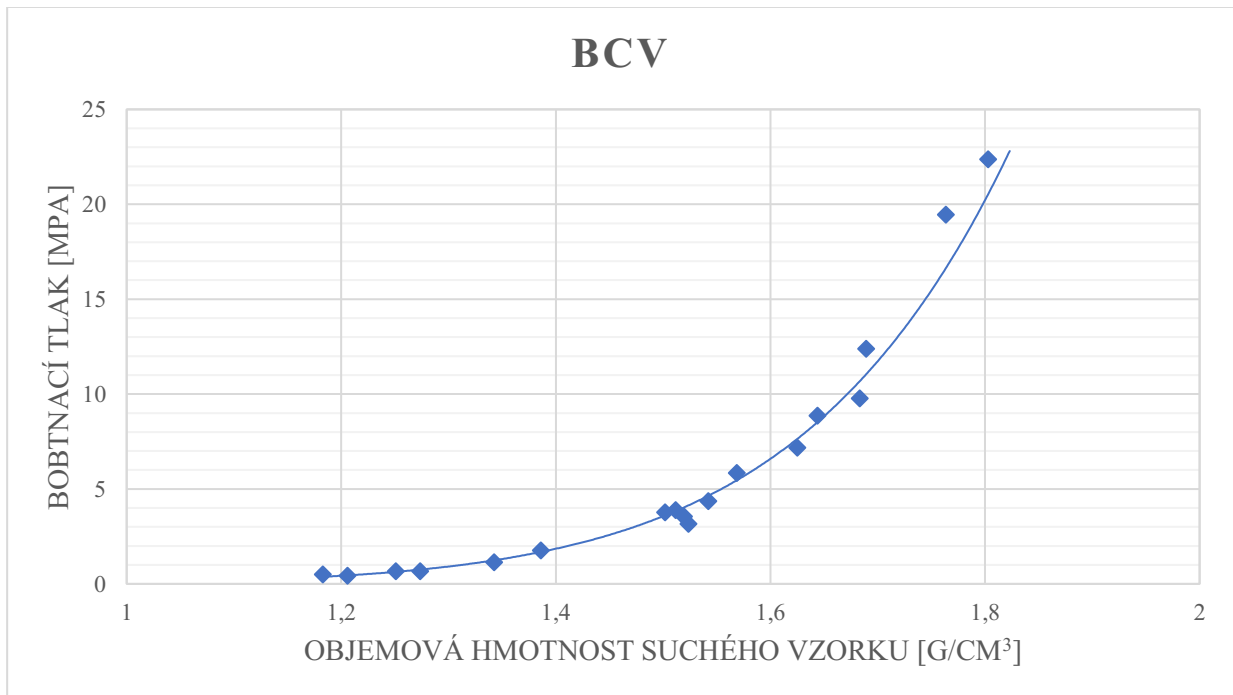
V rámci kationtové výměnné kapacity převažovaly ve struktuře bentonitu BCV kationty vápníku a hořčíku, díky čemuž lze bentonit označit jako vápenato-hořečnatý typ. Kationtová výměnná kapacita bentonitu byla stanovena na 63,7 meq/100g, kationt vápníku hodnoty 15,1 meq/100g a kationt hořčíku hodnoty 42 meq/100g (Villar et al., 2020).

Vyhodnocení zkoušky hydraulické vodivosti ukázalo, že v testovaném intervalu objemových hmotností ρ_d (1,25 – 1,8 g/cm³) se hodnoty hydraulické vodivosti pohybovaly v rozmezí $1,9 \cdot 10^{-12}$ až $4,5 \cdot 10^{-14}$ m/s. Tato závislost je představena semilogaritmickým grafem na obrázku 11 (Najser, 2020).



Obrázek 11 Závislost hydraulické vodivosti na ρ_d bentonitu BCV (Najser, 2020)

V návaznosti na mechanické parametry bentonitu BCV byla Laufkem et al. (2021) vytvořena závislost bobtnacího tlaku na ρ_d . Ta je znázorněna na obrázku 12. Hodnoty bobtnacího tlaku, které se se zvyšující objemovou hmotností chovali přibližně exponenciálně, dosáhly při ρ_d na intervalu od 1,18 – 1,8 g/cm³ velikosti 0,5 až 22,4 MPa.



Obrázek 12 Závislost bobtnacího tlaku na ρ_d bentonitu BCV. Upraveno podle (Laufek et al. 2021)

Převzaté výsledky mechanických zkoušek uvedené v této kapitole byly dále doplněny o vlastní měření, jehož výsledky jsou shrnuty v následující kapitole.

5 Laboratorní zkoušky bentonitu BCV

Laboratorní měření bylo uskutečněno na českém bentonitu BCV. Sada zkoušek, zaměřená na volné bobtnání a bobtnací tlak, byla provedena v laboratoři zemin Přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy. Původní záměr laboratorních zkoušek spočíval ve stanovení parametrů bobtnacího tlaku a hydraulické vodivosti, na které je bakalářská práce primárně zaměřena. Vlivem pandemie Covid-19 byl však přístup do laboratoře omezen, a proto došlo k náhradě hydraulické vodivosti za zkoušku volného bobtnání, která nevyžaduje pravidelnou přítomnost v laboratoři.

Vybrané laboratorní zkoušky charakterizují bobtnací potenciál, který se v hlubinném úložišti částečně uplatňuje jak z pohledu volného bobtnání, tak i bobtnacího tlaku. Na počátku uložení odpadu bentonit volně bobtná do stávajících mezer mezi jednotlivými bariérami a následně je po jejich vyplnění mobilizován bobtnací tlak, který vytvoří nepropustnou obálku zamezující případnému úniku radionuklidů.

Cílem zkoušky volného bobtnání bylo stanovení míry vertikální deformace vzorku v důsledku nasycení, v případě bobtnacího tlaku byla určena hodnota naměřeného tlaku, kterou dokáže bentonit v důsledku sycení vyvinout. Zkouška bobtnacího tlaku je zároveň charakteristická tím, že je vzorku po celou dobu zkoušky zamezeno volně bobtnat (objem vzorku je konstantní). Oba parametry byly zkoumány při různých p_d , kdy se hodnota měřené veličiny v okamžiku plného nasycení typicky ustálí a měřené hodnoty se stanou neměnnými.

V rámci této kapitoly je popsán proces laboratorního měření pro oba typy zkoušek zahrnující přípravu vzorků bentonitu, realizaci laboratorních zkoušek a jejich vyhodnocení.

5.1 Postup laboratorních zkoušek

V této kapitole jsou detailně představeny dílčí kroky, které vedly k realizaci vybraných laboratorních zkoušek. Dále je popsána charakteristika jednotlivých měření, jejichž vyhodnocení je rozebráno v kapitole 5.2.

5.1.1 Příprava zkoušek

Pro měření byly využity tři komory pro zkoušky volného bobtnání a tři komory pro zkoušky bobtnacího tlaku. Metodika přípravy vzorku BCV byla shodná u obou typů laboratorních zkoušek. Na začátku přípravy bylo odebráno určité množství bentonitového prášku, které se promícháním zhomogenizovalo. Počáteční vlhkost prášku, která představuje přirozenou

vlhkost rovnající se vzdušné vlhkosti laboratoře, byla stanovena na 10,9 - 11,1 %. Poté se pro každou zkoušku odebrala navážka 36 g prášku. Současně bylo odebráno po 60 g bentonitu pro přesné stanovení počáteční vlhkosti. Toto množství se umístilo do pece, kde proběhlo jeho vysušení při 105 °C. Na základě poměru hmotnosti odpařené vody a hmotnosti vysušeného bentonitu lze vypočítat počáteční vlhkost vzorku.

Vlhkost je vyjádřena následující rovnicí:

$$w = \frac{m_w}{m_d} \cdot 100 [\%] \quad (6)$$

kde m_w představuje hmotnost vody obsažené ve vzorku bentonitu a m_d hmotnost sušiny. Pro stanovení procentuální vlhkosti lze vynásobením 100 výsledek vyjádřit v procentech.

5.1.2 Příprava vzorků

Pro stanovení objemové hmotnosti vzorku bylo použito lisovací zařízení, které umožní zhutnění vzorku na požadovanou hodnotu ρ_d předem stanovenou silou. Na obrázku 13 lze vidět zmíněné lisovací zařízení, které obsahuje lisovací píst, pumpu pro vytvoření tlaku a podstavu propojenou s digitálním manometrem zaznamenávajícím působící sílu. Vzorky bentonitu o průměru 5 cm byly vždy lisovány do zkušebních komor v axiálním směru. Jejich výška, která klesala s rostoucí objemovou hmotností, byla stanovena na 1,14 cm, 10,51 cm a 0,94 cm.



Obrázek 13 Lisovací zařízení pro stanovení objemové hmotnosti

Po vyjmutí z lisu byla zkušební komora se zhutněným vzorkem uzpůsobena tak, aby umožňovala provedení daného typu zkoušky (stanovení volného bobtnání nebo bobtnacího tlaku).

5.1.3 Zkouška volného bobtnání

Hodnoty objemových hmotností ρ_d byly pro měření volného bobtnání stanoveny na 1,3, 1,45 a 1,9 g/cm³. Testování volného bobtnání proběhlo v aparatuře, která je znázorněna na obrázku 14. Na zhutněný vzorek byl umístěn odlehčený plastový píst, který vyplnil zbylý prostor komory. Na plastový píst byl nainstalován snímač deformace, který registroval změnu výšky bobtnajícího bentonitu. Vzorek byl sycený destilovanou vodou skrz spodní podstavu. Během saturace vzorek vykazoval průběžnou vertikální deformaci. Po ustálení výšky byl vzorek považován za nasycený a zkouška byla ukončena.



Obrázek 14 Měřicí aparatura pro zkoušku volného bobtnání

5.1.4 Zkouška bobtnacího tlaku

Při měření bobtnacího tlaku byly objemové hmotnosti ρ_d stanoveny na 1,45, 1,6 a 1,75 g/cm³. Měřicí aparatura pro zkoušku bobtnacího tlaku je znázorněna na obrázku 15. Namísto odlehčeného pístu, který se využívá při měření volného bobtnání, byl do komory umístěn ocelový píst, který byl fixován v konstantní pozici ocelovou deskou tak, aby nedošlo k nežádoucí deformaci vzorku. Mezi ocelový píst a desku byl umístěn odporový snímač, který zaznamenával sílu, kterou vzorek bentonitu generoval během zkoušky v důsledku jeho sycení. Ze známé plochy pístu a naměřených hodnot působící síly se následně vypočítal bobtnací tlak. Přes spodní podstavu byl vzorek bentonitu sycen pod konstantním gradientem destilovanou

vodou, která zajišťovala proces bobtnání. Po dosažení konstantních hodnot registrovaného tlaku bylo možné vzorek považovat za nasycený a zkouška byla ukončena.



Obrázek 15 Měřicí aparatura pro zkoušku bobtnacího tlaku

5.2 Vyhodnocení zkoušek

V této kapitole jsou rozebrány výsledky laboratorních zkoušek zaměřené na volné bobtnání a bobtnací tlak. Nejprve je pozornost věnována zkoušce volného bobtnání, poté je vyhodnocena zkouška bobtnacího tlaku.

5.2.1 Volné bobtnání

Tabulka 7 uvádí přehled základních parametrů při zkoušce volného bobtnání.

Tabulka 7 Vybrané charakteristiky stanovené při zkoušce volného bobtnání bentonitu BCV

Bentonit BCV	Vzorek 1	Vzorek 2	Vzorek 3
Plánovaná počáteční ρ_d [g/cm³]	1,3	1,45	1,9
Skutečná počáteční ρ_d [g/cm³]	1,26	1,41	1,87
Finální ρ_d [g/cm³]	0,87	0,89	0,83
Bobtnání [%]	50	64	134
Konečné číslo pórovitosti [-]	2,17	2,10	2,32

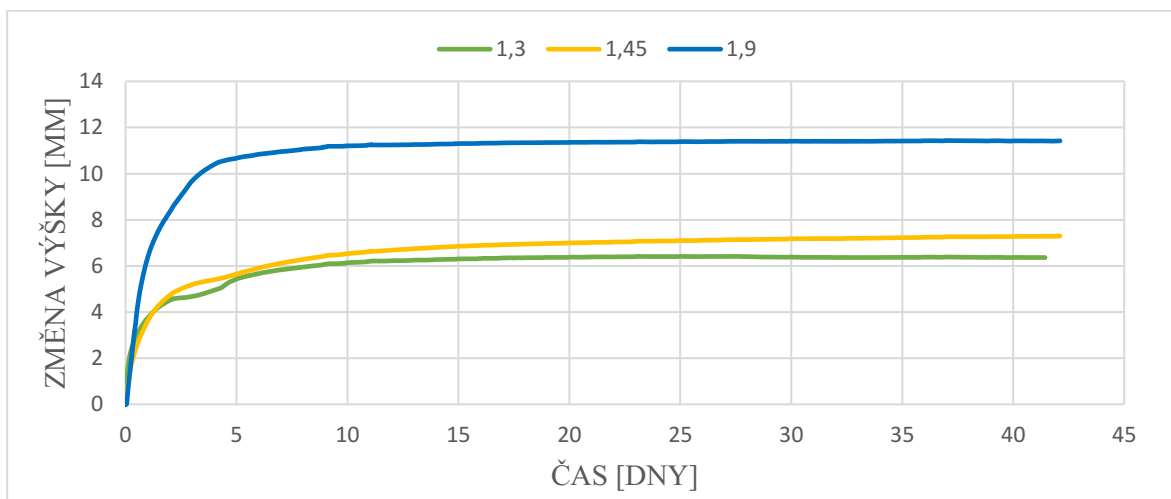
Z tabulky je patrné, že skutečná počáteční ρ_d nabyla v porovnání s plánovanou počáteční ρ_d nižších hodnot. Pro přesnější interpretaci byly výsledky vyhodnoceny s hodnotami skutečné počáteční ρ_d . Dále jsou v tabulce vyhodnoceny parametry jako finální ρ_d , procentuální změna výšky vzorku a konečné číslo pórovitosti.

Vzorec pro vypočítání výsledného bobtnání uvádí rovnice 7:

$$F_s = \frac{\Delta h}{h_0} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (7)$$

kde Δh značí rozdíl konečné a počáteční výšky a h_0 počáteční výšku vzorku. Výsledek lze vyjádřit i v procentech.

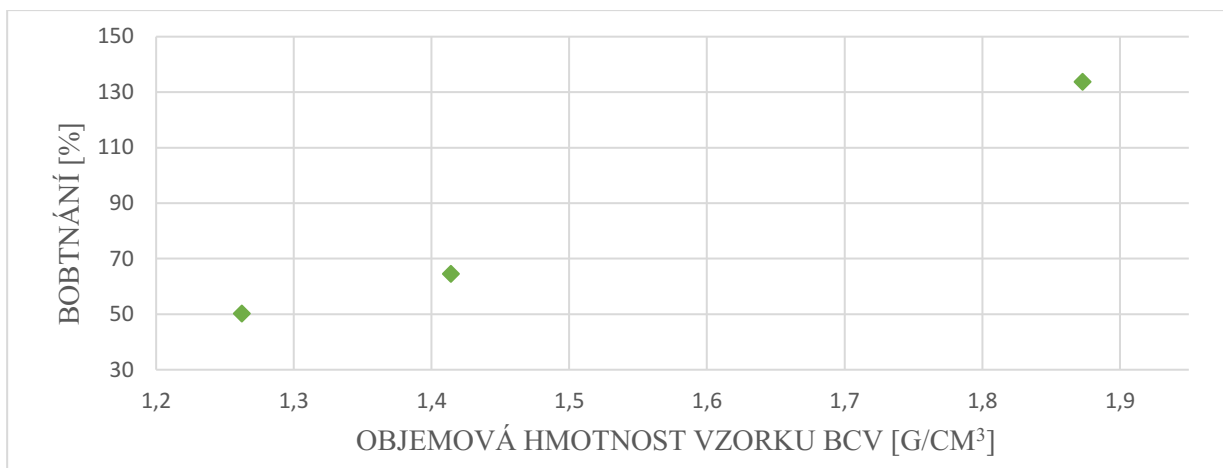
Vyhodnocení zkoušky volného bobtnání je znázorněno na obrázku 16, kde je představena závislost změny výšky vzorků BCV v čase na její skutečné počáteční ρ_d .



Obrázek 16 Průběh volného bobtnání v čase v závislosti na ρ_d bentonitu BCV

Z obrázku lze vypořadovat, že zkouška trvala v rozmezí 40 až 43 dní. V tomto intervalu došlo k nejvýraznější části nabobtnání v prvních pěti dnech a následně postupem času došlo k úplnému ustálení. Nejvýraznější změna výšky byla zaznamenána u vzorku s nejvyšší hodnotou ρ_d , naopak nejmenší změna výšky připadá vzorku s hodnotou $\rho_d = 1,3 \text{ g/cm}^3$.

Klíčové vyhodnocení zkoušky volného bobtnání se nachází v podobě závislosti bobtnání (%) na skutečné počáteční ρ_d , které je uvedeno na obrázku 17.



Obrázek 17 Graf závislosti bobtnání na ρ_d bentonitu BCV

5.2.2 Bobtnací tlak

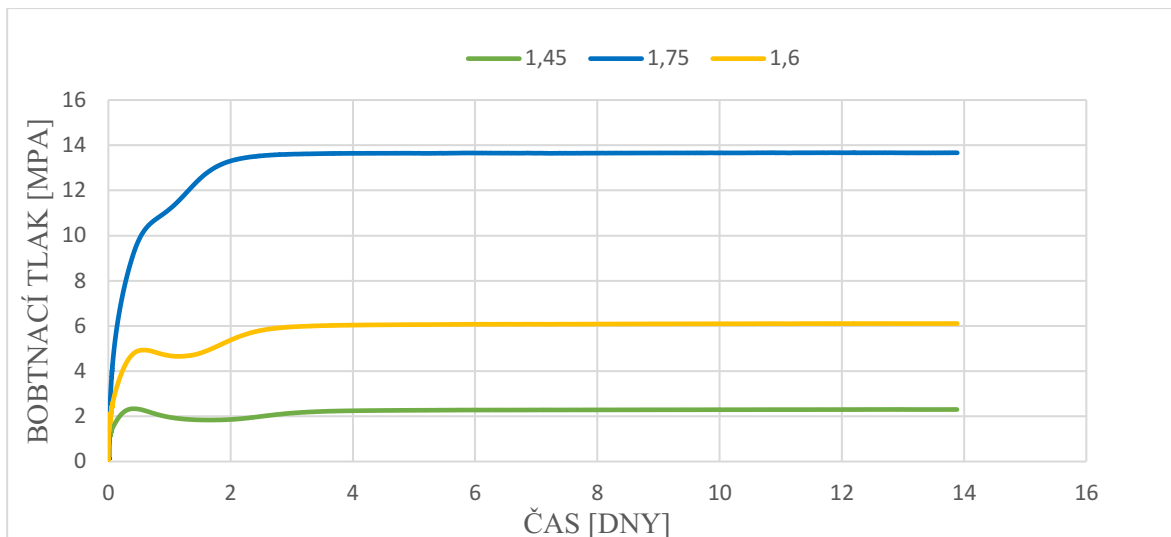
Výsledky zkoušek měření bobtnacího tlaku jsou přehledně shrnuty v tabulce 8.

Tabulka 8 Zobrazení vybraných hodnot v rámci bobtnacího tlaku bentonitu BCV

Bentonit BCV	Vzorek 1	Vzorek 2	Vzorek 3
Počáteční plánovaná ρ_d [g/cm³]	1,45	1,6	1,75
Skutečná finální ρ_d [g/cm³]	1,45	1,57	1,70
Bobtnací tlak [MPa]	2,3	6,1	13,7

V důsledku vysokých bobtnacích tlaků došlo během zkoušky k drobným změnám výšky vzorku, které zmiňuje například i Villar (2002) ve své studii o bentonitu FEBEX. Z toho důvodu vychází výsledné hodnoty ρ_d menší než v případě stanovené ρ_d na počátku měření. Zároveň platí, že tento efekt se výrazněji projevuje u vzorků s vyšší počáteční objemovou hmotností. Pro správnost měření bylo počítáno s finální objemovou hmotností, kdy například vzorek při hodnotě $\rho_d = 1,70 \text{ g/cm}^3$ dokázal vyvinout tlak o velikosti 13,7 MPa.

Vývoj bobtnacího tlaku v čase v závislosti na různých objemových hmotnostech ρ_d je znázorněn na obrázku 18.



Obrázek 18 Průběh vývoje bobtnacího tlaku v čase v závislosti na ρ_d bentonitu BCV

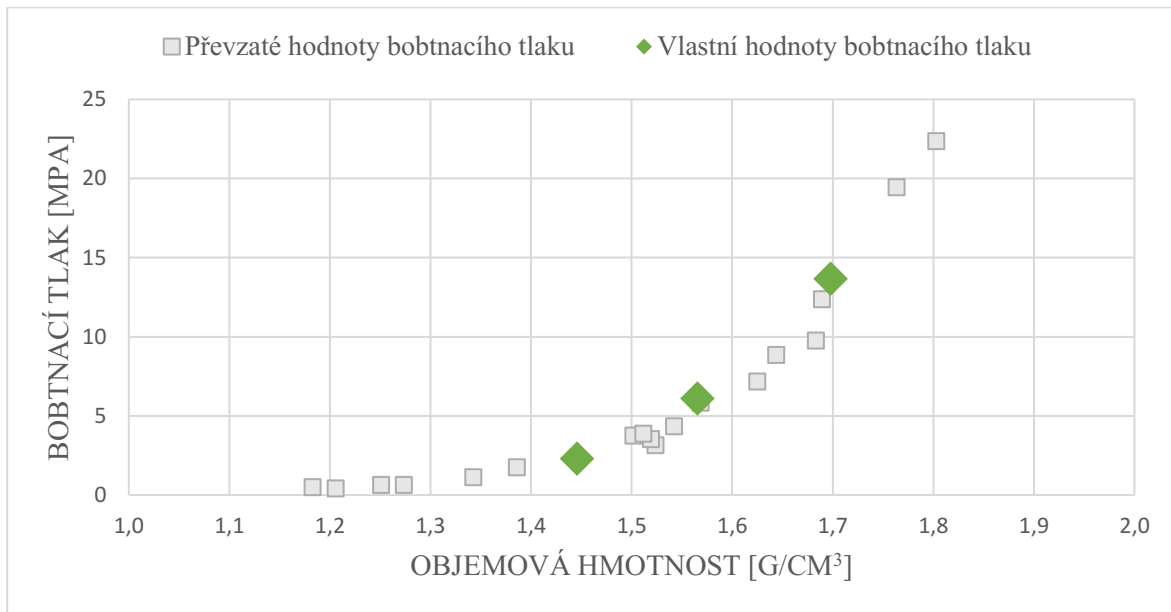
Jak je z obrázku patrné, měření bobtnacího tlaku trvalo zhruba 14 dní. V tomto časovém intervalu došlo k relativnímu ustálení zhruba po třech dnech. Opět byl potvrzen trend, že s rostoucí objemovou hmotností roste i naměřený bobtnací tlak. Zároveň lze z průběhu zkoušky vypočítat, že po 24 hodinách došlo k ustálení až k mírnému poklesu hodnot vyvíjejícího se bobtnacího tlaku. To lze vysvětlit tím, že v průběhu sycení dochází ke kolapsu agregátů jílových zrn a tedy změně vnitřní struktury vzorku. To má za následek mírné snížení bobtnacího tlaku, které se projevuje zejména u vzorků s nižší objemovou hmotností. Po čase se začnou hodnoty bobtnacího tlaku opět mírně zvyšovat, až dojde k úplnému ustálení.

Na obrázku 19 lze vidět vzorek testovaného bentonitu o ploše 20 cm², jenž byl vyňat z komory po ukončení zkoušky bobtnacího tlaku.



Obrázek 19 Vzorek bentonitu BCV po ukončení zkoušky bobtnacího tlaku

Na obrázku 20 je zobrazena závislost bobtnacího tlaku na jeho finální objemové hmotnosti ρ_d .



Obrázek 20 Graf závislosti bobtnacího tlaku na ρ_d bentonitu BCV

Z obrázku je patrné, že hodnoty bobtnacího tlaku získané prostřednictvím vlastního laboratorního měření se shodují s hodnotami bobtnacího tlaku převzatých z výsledků měření Laufka et al. (2021), čímž se podařilo potvrdit trend závislosti bobtnacího tlaku na ρ_d .

6 Srovnání vybraných charakteristik bentonitů

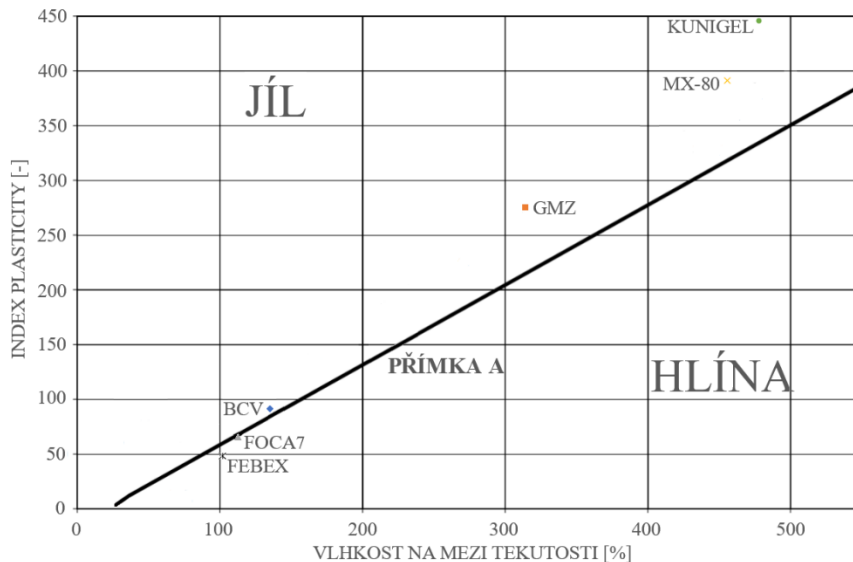
Dle získaných informací a dat v rámci rešerše jsou v této kapitole shrnuty základní charakteristiky pěti světových bentonitů a českého bentonitu BCV. Ze zahraničních bentonitů byly vybrány bentonity FEBEX, MX-80, Kunigel, FoCa7 a GMZ. Na základě zjištěných dat je nejprve prezentováno grafické srovnání plasticity vybraných bentonitů, dále jsou rozebrány bobtnací tlak a hydraulická vodivost, jejichž výsledné hodnoty se odvíjí zejména od obsahu montmorillonitu, převažujícího typu kationtu v mezivrstvě a v neposlední řadě od stanovené objemové hmotnosti ρ_d .

Přehled porovnávaných bentonitů a jejich základních charakteristik je uveden v tabulce 9.

Tabulka 9 Profil základních charakteristik vybraných bentonitů

	FEBEX	MX-80	Kunigel	FoCa7	GMZ	BCV
Obsah montmorillonitu [%]	92	82	50	80	75	71
Typ bentonitu	Ca-Mg	Na	Na	Ca	Na	Ca-Mg
Kationtová výměnná kapacita [meq/100g]	111	74	73,2	69,1	77,3	63,7
Výměnná kapacita sodíku Na⁺ [meq/100g]	25	61	40,5	2,64	43,36	-
Výměnná kapacita vápníku Ca²⁺ [meq/100g]	47	10	28,7	62,9	29,14	15,1
Výměnná kapacita hořčíku Mg²⁺ [meq/100g]	36	3	3,0	-	12,33	42
Výměnná kapacita draslíku K⁺ [meq/g]	2,2	-	0,9	-	2,51	-
Mez tekutosti [%]	102	460	473,9	112	313	136
Mez plasticity [%]	53	70	26,61	50	38	45
Index plasticity [-]	49	390	447,3	62	275	91
Obsah jílových částic (<2 μm) [%]	67	80-90	64,5	-	-	60

Plasticita srovnaných bentonitů je graficky znázorněna v Casagrandeho plasticitním diagramu (obrázek 21).



Obrázek 21 Casagrandeho plasticitní diagram vybraných bentonitů

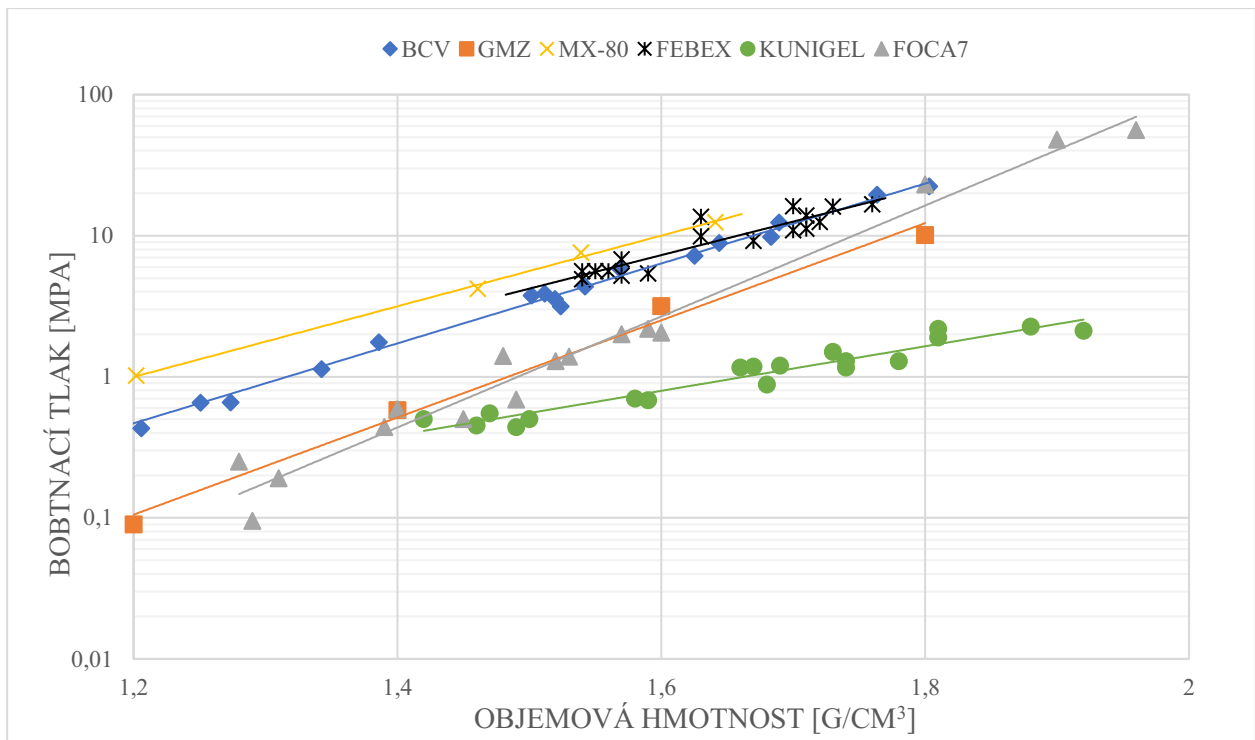
Obrázek znázorňuje vztah mezi vlhkostí na mezi tekutosti w_L a indexem plasticity I_p . Z obrázku je zároveň patrná přímka A, která představuje hranici mezi jílovitými a hlinitými zeminami. Zatímco jílovité zeminy spadají do oblasti nad přímkou, hlinité zeminy jsou charakteristické oblastí pod touto hranicí.

Kromě bentonitů FEBEX a FOCA7 lze ostatní bentonity zařadit mezi anorganické jíly. Jelikož všechny bentonity mají hodnotu $w_L > 90$, jsou řazeny mezi zeminy s extrémní plasticitou.

Dále je zřejmé, že se plasticita bentonitu výrazně odvíjí od přítomnosti dominantního kationtu. Zatímco vápenaté a vápenato-hořečnaté typy spadají do intervalu $w_L = 100 - 150$, sodné bentonity se svými hodnotami pohybují v rozmezí $300 - 500$ a jsou tak charakteristické výrazně vyšší plasticitou.

6.1 Komparace bobtnacího tlaku bentonitů

Jednou z nejvýznamnějších mechanických vlastností bentonitu z pohledu jeho využití v hlubinných úložištích je bobtnací tlak. Na obrázku 22 je tento parametr vyhodnocen prostřednictvím semilogaritmického grafu, který představuje závislost bobtnacího tlaku bentonitů na ρ_d na intervalu $1,2 - 2 \text{ g/cm}^3$.



Obrázek 22 Závislost bobtnacího tlaku na ρ_d srovnávaných bentonitů

Z obrázku je patrné, že každý bentonit vykazuje specifickou závislost bobtnacího tlaku na ρ_d . Ze srovnání vyplývá, že při objemové hmotnosti do $1,5 \text{ g/cm}^3$ dosahuje nejvyššího bobtnacího tlaku sodný bentonit MX-80. Jak je patrné z tabulky 10, americký bentonit obsahuje 82 % montmorillonitu a řadí se tak k nejbohatším ze všech zkoumaných bentonitů. Zároveň je z rešerše této práce patrné, že predispozice k výraznějšímu bobtnání je vyšší právě u sodných bentonitů, což uvádí např. Kogel et al. (2006).

Přestože se jedná o vápenato-hořečnatý typ, nabývá dále nejvyšších hodnot bobtnacího tlaku bentonit FEBEX, který vykazuje při $\rho_d > 1,5 \text{ g/cm}^3$ velmi podobné hodnoty tlaku jako bentonit MX-80. Bentonit FEBEX obsahuje 92 % montmorillonitu a řadí se tak mezi bentonity s nejvyšším podílem bobtnavého minerálu. Další prvenství zaujímá FEBEX i z hlediska výměnné kationtové kapacity, jež nabývá hodnot 111 meq/100g .

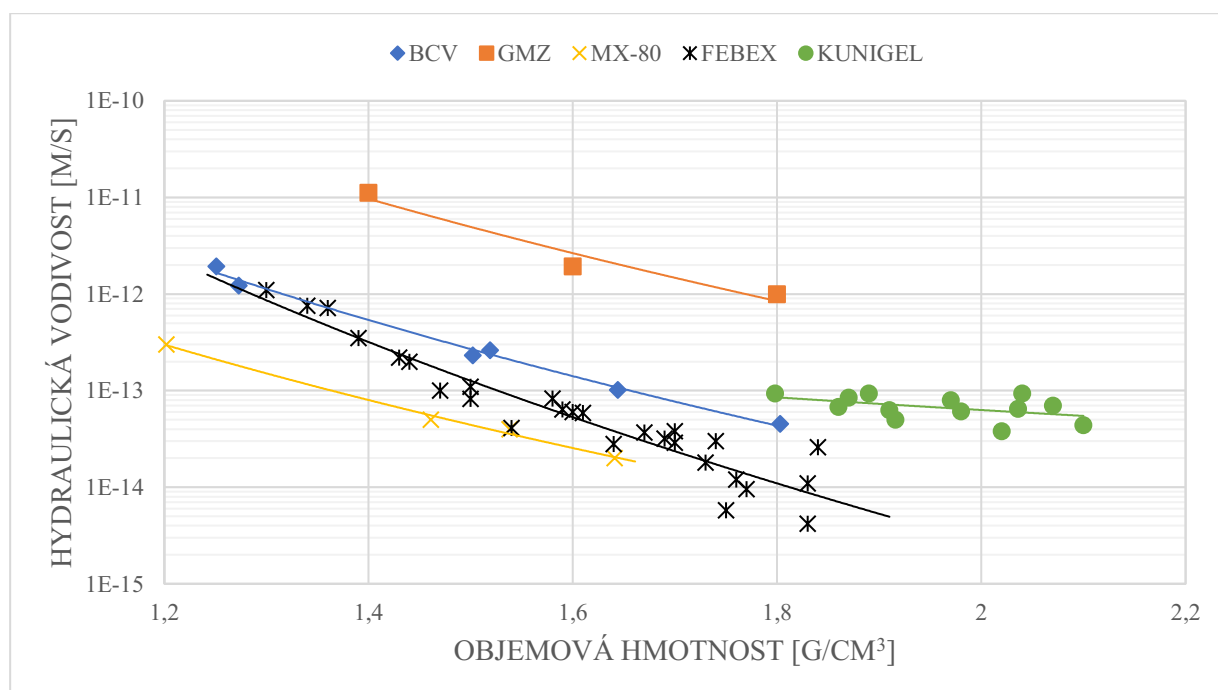
Jelikož nabyly sodné bentonity Kunigel a GMZ, jejichž obsah montmorillonitu je pouze 50 % a 75 %, nižších hodnot bobtnacího tlaku než vápenato-hořečnatý FEBEX a vápenatý bentonit FoCa7, lze konstatovat, že zásadnější vliv na bobtnací tlak má obsah montmorillonitu. Toto tvrzení uvádí i Komine (2004).

Zajímavé zjištění je, že český bentonit BCV dosáhl ve srovnání s ostatními bentonity relativně vysokých hodnot bobtnacího tlaku, přestože se jedná o vápenato-hořečnatý typ se spíše nižším obsahem montmorillonitu. Ve srovnání s bentonitem FEBEX jsou výsledky

bobtnacího tlaku bentonitu BCV obdobné navzdory tomu, že bentonit FEBEX obsahuje o více než 20 % montmorillonitu a podstatně vyšší hodnotu CEC.

6.2 Komparace hydraulické vodivosti bentonitů

V návaznosti na rozhodující požadavky, jež vymezují kvalitu těsnící funkce bentonitu, je představena komparace hydraulické vodivosti vybraných bentonitů, která je znázorněna na obrázku 23. Komparace je zobrazena prostřednictvím semilogaritmického grafu, který znázorňuje závislost hydraulické vodivosti na ρ_d vybraných bentonitů v rozmezí 1,2 – 2,2 g/cm³.



Obrázek 23 Závislost hydraulické vodivosti na ρ_d srovnávaných bentonitů

Komparací hydraulické vodivosti byla opět potvrzena odlišnost v mechanickém chování srovnávaných bentonitů. Z obrázku je patrné, že nejlepší výsledky v celém měřeném rozsahu ρ_d byly naměřeny u amerického bentonitu MX-80. To je pravděpodobně způsobeno nejen vysokým obsahem montmorillonitu a dominantním zastoupením sodíku v jeho struktuře, ale také vysokým podílem jílové frakce, který je podle výzkumné práce Villar (2005) odhadován až na 80 – 90 %.

Při vyšších objemových hmotnostech se hodnotám bentonitu MX-80 blíží také bentonit FEBEX, u kterého je s rostoucí hodnotou ρ_d zaznamenán rychlejší pokles hydraulické vodivosti než v případě MX-80. To potvrzuje předpoklad, že s relativně vyšší objemovou

hmotností ($\rho_d > 1,5 \text{ g/cm}^3$) zaujímá u bentonitů významnější roli podíl montmorillonitu a vliv dominantního kationtu slábne.

V porovnání s vybranými světovými bentonity se český bentonit BCV umístil se svými výsledky uprostřed žebříčku. Oproti bentonitům MX-80 a FEBEX nabývá český bentonit v analyzovaném intervalu ρ_d mírně vyšších hodnot hydraulické vodivosti, na druhou stranu vykazuje až o řád nižší hydraulickou vodivost v porovnání s ostatními sodnými typy (Kunigel a GMZ).

Závěr

Bentonit se řadí mezi reziduální horninu, která byla díky svým ojedinělým vlastnostem vybrána jako jedna z těsnících bariér pro výstavbu hlubinných úložišť radioaktivního odpadu. V této souvislosti je současný výzkum v České republice zaměřen na český bentonit BCV z lokality Černý vrch.

Hlavním cílem bakalářské práce byla vzájemná komparace stěžejních charakteristik nejstudovanějších světových bentonitů s ohledem na využití v těsnící bariéře hlubinných úložišť a následné porovnání s charakteristikami českého bentonitu BCV. K těmto parametrům, jež byly v analytické části práce primárně zkoumány, patří bobtnací tlak a hydraulická vodivost.

Srovnání mechanických vlastností jednotlivých bentonitů ukazuje, že jak u bobtnacího tlaku, tak i v případě hydraulické vodivosti má na bentonit zhuštěný pod hodnotou $\rho_d = 1,5 \text{ g/cm}^3$ nejvýznamnější vliv dominantní kationt v mezivrstvi a přítomné množství montmorillonitu. Po překročení této hodnoty vliv převažujícího kationtu slábne a míra bobtnacího potenciálu se tak výrazněji odvíjí od obsahu montmorillonitové složky. Nejlepších výsledků u obou mechanických parametrů při $\rho_d < 1,5 \text{ g/cm}^3$ dosáhl americký bentonit MX-80, zatímco při překročení této hodnoty ρ_d dosahuje obdobných hodnot rovněž španělský bentonit FEBEX.

Vzájemné srovnání bentonitů současně umožnilo posouzení těsnící kvality českého bentonitu BCV. Z analýzy vyplývá, že tuzemský bentonit dokáže svými vlastnostmi konkurovat světové špičce sestávající z uvedených bentonitů, jež jsou uvažovány pro využití do hlubinných úložišť. Z hlediska bobtnacího tlaku vykázal bentonit BCV nejvyšších hodnot spolu s bentonity FEBEX a MX-80. Porovnání hydraulické vodivosti ukázalo, že ve srovnání s bentonity FEBEX a MX-80 dosahuje bentonit BCV mírně vyšších hodnot, ale zároveň až o řád nižších hodnot oproti bentonitům Kunigel a GMZ. Na základě provedeného srovnání lze tedy konstatovat, že hodnoty obou mechanických parametrů jsou u bentonitu BCV z hlediska těsnící funkce dostačující a lze proto uvažovat o jeho využití při ukládání radioaktivního odpadu na našem území.

Citovaná literatura

- Al-Ani, T. a Sarapää, O., 2008. Clay and clay mineralogy, Geological Survey of Finland (M19/3232/2008/41).
- Aron, L., Bajer, T., Liberko, M., Morvicová L. a Růžičková, J., 2013. Stanovení nového dobývacího prostoru Braňany VI na výhradním ložisku bentonitu Braňany 1. Č. ložiska 3 266 900.
- Berkhout, F., 1991. Radioactive waste, politics and technology. 1st Edition, London, Routledge, s. 2-7. ISBN: 9780203411759.
- Eisenhour, D. D. a Brown, R. K., 2009. Bentonite and its impact on modern life. Elements, 5(2), 83-88. DOI: <https://doi.org/10.2113/gselements.5.2.83>
- Gibb, F. G. F., 1999. High-temperature, very deep, geological disposal: a safer alternative for high-level radioactive waste? Waste Management, 19, 207-211. Department of Earth Science, England.
- Hála, J., 1998. Radioaktivita, ionizující záření, jaderná energie. 1.vyd., Konvoj, spol. s.r.o, Brno, s. 286-295. ISBN: 80-85615-56-8.
- Hanus, R., Kolaříková, I., Brabec, L., Kočířík, M., Přikryl, R., Jelínek, E. a Zikánová, A., 2005. Přírodní materiály bohaté montmorillonitem: simultánní měření dilatace a sorpce. Chemické Listy, 99, 246-249.
- Chapman, N. A., 2006. Geological disposal of radioactive wastes – Concept, status and trends. Journal of Iberian Geology, 32(1), 7-14. ISSN 1698-6180.
- Imbert, Ch. a Villar, M. V., 2006. Hydro-mechanical response of a bentonite pellets/powder mixture upon infiltration. Applied Clay Science, 32, 197-209.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2006.01.005>
- Karnland, O., Olsson, S. a Nilsson, U., 2006. Mineralogy and sealing properties of various bentonites and smectite-rich clay materials. SKB TR-06-30, Clay Technology AB.
- Kogel, J. E., Trivedi, N. C., Barker, J. M. a Krukowski, S. T., 2006. Industrial minerals & rocks: Commodities, markets, and uses. 7th edition, Colorado: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, s. 357-367. ISBN: 9780873352338.

- Komine, H. a Ogata, N., 1999. Experimental study on swelling characteristics of sand-bentonite mixture for nuclear waste disposal. *Soils and Foundations*, 39(2), 83-97. Japanese Geotechnical Society.
- Komine, H., 2004. Simplified evaluation for swelling characteristics of bentonites. *Engineering Geology*, 71, 265-279. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(03\)00140-6](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(03)00140-6)
- Komine, H., 2008. Theoretical equations on hydraulic conductivities of bentonite-based buffer and backfill for underground disposal of radioactive wastes. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 134(4), 497-508.
DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2008\)134:4\(497\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2008)134:4(497))
- Laufek, F., Hanusová, I., Svoboda, J., Vašíček, R., Najser, J., Koubová, M., Čurda, M., Ptíčen, F., Vaculíková, L., Sun, H. a Mašín, D., 2021. Mineralogical, geochemical and geotechnical study of BCV 2017 bentonite – The initial state and the state following thermal treatment at 200 °C. *Časopis Minerals*, 11(8), 871.
DOI: <https://doi.org/10.3390/min11080871>
- Marcial, D., Delage, P. a Cui, Y. J., 2011. On the high stress compression of bentonites. *Canadian Geotechnical Journal*, 39(4), 812-820. DOI: <https://doi.org/10.1139/t02-019>
- Ministerstvo průmyslu a obchodu, 2019. Koncepce nakládání s radioaktivními odpady a vyhořelým jaderným palivem v České republice [online]. [cit. 2021-05-17].
Dostupné z: https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/RAO/2019/12/Koncepce-nakladani-s-RaO-a-VJP-v-CR_2019.pdf
- Najser, J., 2020. Výsledky laboratorních zkoušek bentonitu „BCV“ za laboratorní teploty. Projekt TAČR TK01010063.
- Pusch, R., 2001. The buffer and backfill handbook, Part 2: Materials and techniques. SKB TR-02-12. Geodevelopment AB. Stockholm, Sweden. ISSN 1404-0344.
- Saiyouri, N., Hicher, P. Y. a Tessier, D., 2000. Microstructural approach and transfer water modelling in highly compacted unsaturated swelling clays. *Mechanics of Cohesive-Frictional Materials*, 5, 41-60.
DOI: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1484\(200001\)5:1<41::AID-CFM75>3.0.CO;2-N](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1484(200001)5:1<41::AID-CFM75>3.0.CO;2-N)
- Sällfors, G. a Öberg-Högsta, A., 2002. Determination of hydraulic conductivity of sand-bentonite mixtures for engineering purposes. *Geotechnical and Geological Engineering*, 20, 65-80.

Sellin, P. a Leupin, O. X., 2013. The use of clay as an engineered barrier in radioactive-waste management - a Review. *Clays and Clay Minerals*, 61(6), 477-498.

DOI: <https://doi.org/10.1346/CCMN.2013.0610601>

SKB, 2010a. Buffer, backfill and closure process report for the safety assessment SR-Site. TR-10-47 [online]. Svensk Kärnbränslehantering AB. Stockholm, Sweden.

[cit. 2021-06-19]. ISSN 1404-0344.

Dostupné z: <https://skb.se/upload/publications/pdf/TR-10-47.pdf>

SKB, 2010b. Fuel and canister process report for the safety assessment SR-Site. TR-10-46 [online]. Svensk Kärnbränslehantering AB. Stockholm, Sweden. [cit. 2021-03-19].

ISSN 1404-0344.

Dostupné z: <https://www.skb.se/publikation/2162834/TR-10-46.pdf>

SKB, 2011. Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark. Main report of the SR-Site project, Volume I. TR-11-01 [online]. Svensk Kärnbränslehantering AB. Stockholm, Sweden. [cit. 2021-08-23]. ISSN 1404-0344.

Dostupné z: https://www.skb.se/publikation/2345580/TR-11-01_vol1.pdf

Tajima, T., Ogata, H., Kubo, H. a Mihara, M., 2006. Influence of cement leachate on bentonite impermeability. *Clay Science*, 12, Supplement 2, 137-142. ISSN 2186-3555.

Villar, M. V., 2002. Thermo-hydro-mechanical characterisation of a bentonite from Cabo de Gata. A study applied to the use of bentonite as sealing material in high-level radioactive waste repositories. CIEMAT. ISSN 1134-380X.

Villar, M. V., 2005. MX-80 Bentonite. Thermo-hydro-mechanical characterisation performed at CIEMAT in the context of the prototype project. *Informes Técnicos CIEMAT 1053*, INIS Vol. 36.

Villar, M. V., Armand, G., Conil, N., de Lesquen, Ch., Herold, P., Simo, E., Mayor, J. C., Dizier, A., Li, X., Chen, G., Leupin, O., Niskanen, M., Bailey, M., Thompson, S., Svensson, D., Sellin, P. a Hausmannova, L., 2020. D7.1 HITEC. Initial state-of-the-art on THM behaviour of i) buffer clay materials and of ii) host clay materials. Deliverable D7.1 HITEC. EURAD Project, Horizon 2020 No. 847593. 214 pp. [cit. 2021-08-05].

Vojtěchová, H., 2019. Porovnání projektů HÚ ve vybraných vyspělých zemích. *Technická zpráva č. 410/2019*. Číslo SÚRAO: TZ 410/2019.

Vokál, A., 1997. Úloha inženýrských bariér při ukládání vyhořelého paliva. Ústav jaderného výzkumu Řez a.s. [online]. CZ9827376. [cit. 2021-06-05].

Dostupné z: <https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/607545>

Vokál, A., Pospíšková I., Vondrovic, L., Kováčik, M., Steinerová, L., Dusílek, P. a Woller, F., 2015. Požadavky, indikátory vhodnosti a kritéria výběru lokalit pro umístění hlubinného úložiště. Technická zpráva č. 2/2015 [online]. Číslo SÚRAO: TZ 2/2015. [cit. 2021-07-19].

Dostupné z: <https://www.pacejov.cz/oupacejov/user/deska/2015/7->

[2015_kriteria_vyberu_lokality.pdf?fbclid=IwAR1hV92-n40qLhbl7AR5jvYnQeRzfbkwb-pUXn8og3Rq-UjIMnmcmGubNBY](https://www.pacejov.cz/oupacejov/user/deska/2015/7-2015_kriteria_vyberu_lokality.pdf?fbclid=IwAR1hV92-n40qLhbl7AR5jvYnQeRzfbkwb-pUXn8og3Rq-UjIMnmcmGubNBY)

Wang, Q., Cui, Y. J., Tang, A. M., Barnichon, J. D., Saba, S. a Ye, W. M., 2013. Hydraulic conductivity and microstructure changes of compacted bentonite/sand mixture during hydration. *Engineering Geology*, 164, 67-76.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.06.013>

Wen, Z., 2006. Physical property of China's buffer material for high-level radioactive waste repositories. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 25(4), 794-800.

Ye, W. M., Cui, Y. J., Qian, L. X. a Chen, B., 2009. An experimental study of the water transfer through confined compacted GMZ bentonite. *Engineering Geology*, 108, 169-176.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.08.003>

Seznam obrázků

Obrázek 1 Znázornění dvou montmorillonitových vrstev s mezivrstvou kationtů a molekul vody (Karnland et al. 2006).....	4
Obrázek 2 Zdroje a pohyb radioaktivního odpadu. Upraveno podle (Hála, 1998).....	10
Obrázek 3 Koncept hlubinného úložiště pro uložení radioaktivního odpadu (SKB, 2011).....	12
Obrázek 4 Závislost hydraulické vodivosti na ρ_d bentonitu FEBEX (Villar, 2002).....	18
Obrázek 5 Závislost bobtnacího tlaku na ρ_d bentonitu FEBEX (Villar, 2002).....	19
Obrázek 6 Graf závislosti hydraulické vodivosti na ρ_d bentonitu MX-80. Upraveno podle (Karnland et al. 2006).....	21
Obrázek 7 Graf závislosti bobtnacího tlaku na ρ_d bentonitu MX-80. Upraveno podle (Karnland et al. 2006).....	22
Obrázek 8 Graf závislosti hydraulické vodivosti na ρ_d bentonitu KV-1. Upraveno podle (Komine, 2008).....	23
Obrázek 9 Graf závislosti bobtnacího tlaku na ρ_d bentonitu Kunigel V-1. Upraveno podle (Komine, 2004).....	23
Obrázek 10 Graf závislosti bobtnacího tlaku na ρ_d bentonitu FoCa7. Upraveno podle (Imbert a Villar, 2006).....	25
Obrázek 11 Závislost hydraulické vodivosti na ρ_d bentonitu BCV (Najser, 2020).....	27
Obrázek 12 Závislost bobtnacího tlaku na ρ_d bentonitu BCV. Upraveno podle (Laufek et al. 2021).....	28
Obrázek 13 Lisovací zařízení pro stanovení objemové hmotnosti.....	30
Obrázek 14 Měřicí aparatura pro zkoušku volného bobtnání.....	31
Obrázek 15 Měřicí aparatura pro zkoušku bobtnacího tlaku.....	32
Obrázek 16 Průběh volného bobtnání v čase v závislosti na ρ_d bentonitu BCV.....	33
Obrázek 17 Graf závislosti bobtnání na ρ_d bentonitu BCV.....	34
Obrázek 18 Průběh vývoje bobtnacího tlaku v čase v závislosti na ρ_d bentonitu BCV.....	35
Obrázek 19 Vzorek bentonitu BCV po ukončení zkoušky bobtnacího tlaku.....	35
Obrázek 20 Graf závislosti bobtnacího tlaku na ρ_d bentonitu BCV.....	36
Obrázek 21 Casagrandeho plasticitní diagram vybraných bentonitů.....	38
Obrázek 22 Závislost bobtnacího tlaku na ρ_d srovnávaných bentonitů.....	39
Obrázek 23 Závislost hydraulické vodivosti na ρ_d srovnávaných bentonitů.....	40

Seznam tabulek

Tabulka 1 Hodnoty hydraulické vodivosti v závislosti na ρ_d bentonitu MX-80. Upraveno podle (Karnland et al. 2006).....	20
Tabulka 2 Hodnoty bobtnacího tlaku v závislosti na ρ_d bentonitu MX-80. Upraveno podle (Karnland et al. 2006).....	21
Tabulka 3 Vyměnitelné kationty a kationtová výměnná kapacita bentonitu FoCa7 (Saiyouri et al., 2000).....	24
Tabulka 4 Přehled kationtové výměnné kapacity a dílčích kationtů bentonitu GMZ-1 (Wen, 2006).....	25
Tabulka 5 Závislost hydraulické vodivosti na ρ_d bentonitu GMZ-1 (Wen, 2006).....	26
Tabulka 6 Závislost bobtnacího tlaku na ρ_d bentonitu GMZ-1 (Wen, 2006).....	26
Tabulka 7 Vybrané charakteristiky stanovené při zkoušce volného bobtnání bentonitu BCV	32
Tabulka 8 Zobrazení vybraných hodnot v rámci bobtnacího tlaku bentonitu BCV.....	34
Tabulka 9 Profil základních charakteristik vybraných bentonitů.....	37