

**Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta
Ústav geochemie, mineralogie
a nerostných zdrojů**

**Charles University in Prague, Faculty of Science
Institute of Geochemistry, Mineralogy
and Mineral Resources**

Doktorský studijní program: Aplikovaná geologie
Ph.D. study program: Applied geology

Autoreferát disertační práce
Summary of the Ph.D. Thesis



**Teplotní a hydratační vlivy na stabilitu bentonitových
bariér hlubinných úložišť radioaktivního odpadu**

**The influence of temperature and hydration on the long
term stability of the buffer material**

Jana Švandová

Školitel/Supervisor: prof. Mgr. Richard Přikryl, Dr.
RNDr. Irena Hanusová, Ph.D.

Praha, 2014

Abstrakt

Teplotní a hydratační vlivy na stabilitu bentonitových bariér hlubinných úložišť radioaktivního odpadu byly studovány v rámci dvou multidisciplinárních projektů – „Mineralogický, chemický a geochemický výzkum stability dlouhodobě tepelně zatíženého materiálu bentonitové bariéry na vzorcích získaných z experimentu Mock-Up-CZ“ a „Sledování dlouhodobé stability inženýrských bariér na bázi bentonitu s využitím zatěžovacích procedur a experimentů in situ a hodnocení jejich retardační funkce“. Mineralogické změny byly studovány pomocí RTG difrakce.

Cílem projektů bylo zhodnocení stability základních mineralogických, chemických a geochemických parametrů bentonitové směsi a popis změn chování daného materiálu s ohledem na jeho využití jako inženýrské bariéry v hlubinném úložišti radioaktivních odpadů. Zdrojem bentonitu bylo i české ložisko Rokle a jedním z důležitých cílů projektu bylo zjistit použitelnost tohoto místního zdroje při realizaci tuzemského hlubinného úložiště.

Bentonitová bariéra v experimentální nádobě Mock-Up-CZ byla tvořena směsí bentonitu z ložiska Rokle (85 %), křemenného písku z ložiska Provoďín (10 %) a grafitu ze závodu Netolice (5 %). Hydrotermální zátěž bentonitu (sycení syntetickou granitickou vodou při teplotě max. 90 °C) probíhala 45 měsíců. V žádném ze 70 analyzovaných vzorků odebraných z různých vzdáleností od zdroje tepla a vody nebyly zaznamenány novotvořené fáze ani mineralogické přeměny. Ve vzorcích pocházejících ze zásypu experimentální nádoby (od zdroje syntetické granitické vody) se vytvořila okem viditelná zrna sádrovce s illitovou aureolou.

V rámci druhého projektu byly použity tři druhy bentonitových materiálů (Mock-Up-CZ, Rokle, FEBEX) a pět typů saturačních médií, jak přírodních (Josef), tak syntetických, namíchaných v laboratořích VŠCHT a obohacených draselnými (SGW-K, SGW-K-10), resp. hořečnatými (SGW-Mg, SGW-Mg-10) ionty. Experiment probíhal v tlakových nádobách a ve fyzikálních modelech (za teplot dosahujících 95 °C), v perforovaných patronách (v jádrových vrtech v přírodních podmínkách štoly Josef) a

v laboratorních podmínkách na VŠCHT (za teplot 20 °C a 80–90 °C). Ve stanovených intervalech (3, 6, 12, 18 měsíců) byly prováděny odběry materiálu tlakových nádob, fyzikálních modelů a patron k provedení laboratorních zkoušek. Odběr vzorků v laboratořích VŠCHT probíhal v intervalech 1 týden, 2 týdny, 1 měsíc, 2, 3 a 4 měsíce, 5, 7, 8, 10 a 12 měsíců. Většina vzorků z projektu sledování dlouhodobé stability inženýrských bariér (suspenze v tlakových nádobách, fyzikální modely, vzorky z procedury in situ, experimenty s cementy a cementovou vodou, materiál z Mock-Up-CZ, bentonity Rokle i FEBEX zatížené médii SGW-Mg, SGW-Mg-10, SGW-K, Josef či destilovanou vodou) byla mineralogicky stabilní. Vzorky bentonitu FEBEX podrobené zátěži saturačním médiem SGW-K-10 (koncentrace K^+ 1083 mg/l) vykazovaly přítomnost illitizace a to nezávisle na teplotě. Po zátěži tímto médiem se v materiálech FEBEX a Rokle vytvořila zrna sádrovce, případně bassanitu.

Abstract

The influence of temperature and hydration on the long term stability of the buffer material was studied during two experimental studies – “Mock-Up-CZ” experiment and “Long-term stability of engineering barriers” project. The objectives of these studies is to identify mineralogical, chemical and geochemical changes and describe transformation processes in the bentonite materials due to heating and interaction with various saturation media (with different chemical composition) under controlled laboratory and in situ conditions. The Rokle bentonite suitability for its use in the Czech deep repository of high-level radioactive waste was investigated. Mineralogical changes in the bentonites were evaluated by X-ray diffraction.

The material of the barrier of the Mock-Up-CZ experiment is a mixture of non-activated Rokle bentonite (85 vol.%), quartz sand (10 vol.%) and graphite (5 vol.%). The barrier has been subjected to thermal stress (up to 90 °C) and synthetic granitic water for 45 months. No sample from 70 analysed samples taken at different depth levels and distances from the source of the heat and/or water showed measurable transformation of original smectites. Newly formed gypsum bordered by illite aureole was detected in the upper part of the experimental set-up (backfill samples), i.e. in the zone in direct contact to the source of the water.

During the second study, three bentonite buffer materials (Rokle bentonite, FEBEX bentonite, and Mock-Up-CZ mixture) interacted with natural water collected from Josef Underground Educational Facility, and four different types of artificial groundwater enriched in K^+ and/or Mg^{2+} . The experimental material was prepared in the form of (1) highly compacted samples, (2) dispersion of bentonites (both at temperature of 95 °C), (3) drill hole filling during in situ tests at the Josef UEF (at ordinary temperature), and (4) common batch laboratory experiments (at 20 °C and at 80–90 °C). Partial samples were extracted after 3, 6, 12, and/or 18 months of interaction in the first three set-ups, and after 1 week, 2 weeks, 1month, 2months, 3months, 4months, 5months, 7months, 10months, and 12months in the batch experiment. In the first three experimental set-ups, no changes were identified. For the batch experiment, formation of illite was detected in FEBEX bentonite saturated with artificial

groundwater with K^+ concentration of 1083 mg/L. By using the same saturation medium, gypsum and/or bassanite formed in the Rokle and FEBEX bentonite.

Teplotní a hydratační vlivy na stabilitu bentonitových bariér hlubinných úložišť radioaktivního odpadu

1. Úvod

Hlubinné ukládání radioaktivního odpadu je dnes celosvětově přijímáno jako environmentálně i eticky vhodné a spolehlivé řešení naložení s vysokoaktivním radioaktivním odpadem. V České republice by hlubinné úložiště mělo být uvedeno do provozu v roce 2065.

Základním pilířem bezpečnosti hlubinného úložiště je její mnohonásobné zajištění na sobě nezávislými prvky a to proti veškerým myslitelným událostem, které by tuto bezpečnost mohly v průběhu času ohrozit. Maximálního možného zabezpečení úložiště tak, aby nebylo závislé pouze na výkonnosti jedné bariéry, je dosaženo použitím takzvaného multibariérového systému. Jedná se o systém založený na kombinaci inženýrských a přírodních bariér izolujících odpad v hlubinném úložišti od okolní biosféry.

Přírodní bariérou je horninový masiv, ve kterém je úložiště vybudováno a který musí dlouhodobě splňovat požadavky, jakými je stabilita (mechanická/geologická i geochemická), minimální porušenost a minimální proudění podzemních vod. Mezi inženýrské bariéry patří samotná forma odpadu, kontejner, těsnicí materiál v okolí kontejneru a zásypový materiál pro utěsnění velkých manipulačních prostor, tunelů a šachet.

Těsnicí bariéra má obecně za úkol chránit kontejner před mechanickým poškozením (například při tektonické aktivitě), zabránit podzemní vodě v přístupu k němu a zadržet radionuklidy, které by v případě poškození kontejneru mohly uniknout do okolí (Arcos, Bruno & Karnland 2003). Za nejvhodnější materiál pro těsnicí bariéru je považován vysoce kvalitní bentonit.

2. Cíle práce

Disertační práce shrnuje výsledky studia mineralogických změn, resp. fázové stability klíčového materiálu těsnící a zásypové zóny – bentonitu, jenž byl použit ve dvou multidisciplinárních projektech – „Mineralogický, chemický a geochemický výzkum stability dlouhodobě tepelně zatíženého materiálu bentonitové bariéry na vzorcích získaných z experimentu Mock-Up-CZ“ a „Sledování dlouhodobé stability inženýrských bariér na bázi bentonitu s využitím zatěžovacích procedur a experimentů in situ a hodnocení jejich retardační funkce“ zaměřených na simulaci teplotních a hydratačních vlivů v hlubinném úložišti vysokoaktivního odpadu.

Cílem prvního projektu bylo zhodnocení stability základních mineralogických, chemických a geochemických parametrů bentonitové směsi a popis změn chování daného materiálu s ohledem na jeho využití jako inženýrské bariéry v hlubinném úložišti radioaktivních odpadů. Zdrojem bentonitu bylo české ložisko Rokle a jedním z důležitých cílů projektu bylo zjistit použitelnost tohoto místního zdroje při realizaci tuzemského hlubinného úložiště. Bentonit byl během experimentu Mock-Up-CZ zatížen podmínkami, které se předpokládají v reálném hlubinném úložišti a následně byly vyhodnoceny dopady této zátěže na jeho mineralogickou stabilitu.

Cílem druhého projektu byl experimentální výzkum dlouhodobé stability inženýrských bariér na bázi bentonitu s využitím zatěžovacích procedur realizovaných za laboratorních podmínek a v prostředí in situ v podzemní laboratoři Josef. Hodnotily se chemické, geochemické a mineralogické změny bentonitových materiálů, opět s ohledem na jejich využití v hlubinných úložištích radioaktivního odpadu.

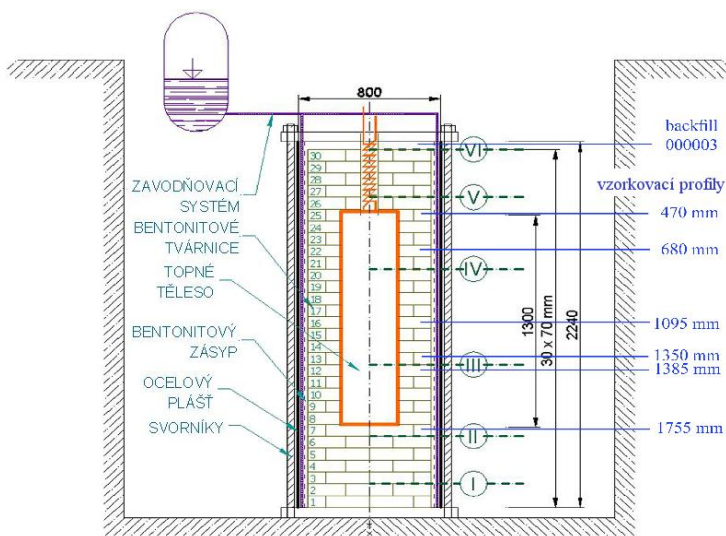
Předložená disertační práce je zaměřena na studium mineralogických změn v bentonitech po dané experimentální

zátěži a jejich vliv na stabilitu chování materiálu inženýrské bariéry.

3. Materiál a metodika

3.1 Mock-Up-CZ

Fyzikální model Mock-Up-CZ (obr. 1) simuloval vertikální ukládání kontejneru s radioaktivním odpadem podle švédského systému KBS-3V. Jeho budování začalo v roce 2000 v Centru experimentální geotechniky na Stavební fakultě ČVUT (Pacovský 2003a, b, 2004, 2006; Svoboda & Vašíček 2006; Pusch et al. 2007). Do válcové ocelové nádoby bylo instalováno olejové topné těleso, simulující kontejner s radioaktivním odpadem, které bylo obloženo bentonitovými tvárniciemi.



Obr. 1. Schéma experimentu Mock-Up-CZ.

Vnitřní strana ocelového pláště byla opatřena zavodňovacím systémem, který umožňoval sycení bentonitové bariéry syntetickou granitickou vodou. Podél vertikální osy experimentální nádoby bylo instalováno šest měřicích profilů pro kontinuální měření probíhajících dějů (obr. 1). V každém profilu byla osazena řada čidel, která sledovala teplotu, tlak, vlhkost a korozi (Pacovský, Svoboda & Zapletal 2007; Pusch et al. 2007; Pusch, Kasbohm & Thao 2010; Svoboda & Vašíček 2010). Celý model byl umístěn v podzemním zkušebním silu o velikosti 3×3×3 m. Vlastní experiment byl spuštěn v květnu 2002 a ukončen v květnu 2006.

Bentonitová bariéra byla tvořena směsí bentonitu z ložiska Rokle (85 %), křemenného písku z ložiska Provodín (10 %) a grafitu ze závodu Netolice (5 %). Z tohoto kompozitního materiálu bylo vylisováno přes tři sta tvárnic, kterými se obložilo topné těleso, a v sypkém stavu sloužil jako zásyp montážních prostor.

Pro mineralogickou analýzu bylo celkem poskytnuto 71 vzorků z hloubkových úrovní 470 mm, 680 mm, 1095 mm, 1350 mm, 1385 mm, 1755 mm a zásypu (obr. 1). Kompozitní vzorky odebrané z těsnící bariéry byly studovány pomocí rentgenové práškové difrakce a infračervené spektroskopie s Fourierovou transformací (metoda KBr).

Fázová analýza byla prováděna na difraktometru X'Pert Pro (PANalytical) na ÚGMNZ PŘF UK. Difraktometr je vybaven sekundárním grafitovým monochromátorem a detektorem X'Cellerator. Preparáty byly měřeny za následujících podmínek: $\text{CuK}\alpha$ krok 0.05° , 200 s/krok, 3–60 2θ , rotace $f = 25, 40 \text{ KV}$, 30 mA, nosič – bezdifrakční Si (100).

Orientovaně sedimentované preparáty byly připraveny vždy ve 2 sadách. Jedna sada byla měřena za standardních podmínek, druhá byla po dobu 24 hodin napařována v parách ethylenglykolu a poté nasnímána v omezenějším rozsahu 2θ .

Výsledné difrakční záznamy byly vyhodnoceny a zpracovány v programu Bede ZDS 4.17 (Ondruš 1997).

Jako doplňková metoda k RTG difrakci na rozlišení zejména amorfních fází byla využita infračervená spektroskopie. 1 mg studovaného vzorku byl semlet v ocelovém kulovém mlýnku s 300 mg práškového KBr. Jílový materiál byl nejprve předsušen za teplot do 30 °C, aby se co nejvíce eliminovaly píky vzdušné vlhkosti. Slisovaná tableta byla nasnímána na spektrometru Nicolet 740 (VŠCHT, operátor Ing. Novotná) s rozlišením 2 cm⁻¹ a počtem akumulací 32 skenů. Pro vyhodnocení spekter byl použit software Omnic 6.1.

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

Experimentální výzkum dlouhodobé stability inženýrských bariér na bázi bentonitu probíhal v letech 2008–2010. Realizován byl za laboratorních podmínek (VŠCHT, ČVUT) a v prostředí in situ v podzemní laboratoři Josef (štola Josef se nachází asi 50 km jižně od Prahy mezi obcemi Čelina a Mokrsko). V rámci tohoto projektu byly použity tři druhy bentonitových materiálů (Mock-Up-CZ, Rokle, FEBEX) a pět typů saturačních médií. Saturační média byla použita jak přírodní (Josef), tak syntetická, namíchána v laboratořích VŠCHT a obohacena draselnými (SGW-K, SGW-K-10), resp. hořečnatými (SGW-Mg, SGW-Mg-10) ionty.

Vlastní experimenty probíhaly v Centru experimentální geotechniky na Stavební fakultě ČVUT (tlakové nádoby, fyzikální modely), v prostorách štoly Josef (patrony) a na Vysoké škole chemicko-technologické (laboratorní vzorky).

Do tlakových nádob byly umístěny vzorky všech tří typů bentonitů a zality saturačními médii Josef a SGW-K v takovém množství, které dovolilo bentonitovým materiálům

volně nabobtnat. Poté byly nádoby po dobu 13 dnů vystaveny teplotě 95 °C a následně na jeden den běžné laboratorní teplotě (kontrola úbytku saturačního média vážením a jeho případné doplnění). Celý cyklus se takto opakoval 18 měsíců. Ve stanovených intervalech (3, 6, 12, 18 měsíců) byly prováděny odběry materiálu k provedení laboratorních zkoušek.

Fyzikální modely byly umístěny v obdobných nádobách jako suspenze bentonitu a podrobovány stejnému zatěžovacímu cyklu. Vzhledem k náročnosti fyzikálního modelování byl ovšem ke zkouškám vybrán pouze jeden materiál a to bentonit Rokle, který byl do nádob umístěn ve slisovaném stavu. Jako saturační médium sloužila voda Josef a SGW-K. Vzorkování probíhalo v intervalech 6, 12 a 18 měsíců.

Pět perforovaných patron z korozivzdorné oceli s bentonitovou náplní ve formě lisovaných válečků (Rokle 2×, FEBEX 1×, Mock-Up-CZ 2×) bylo zasunuto do jádrových vrtů ve štolě Josef. Tato procedura využívala komplexní působení podzemního prostředí (teplota, voda, mikroorganismy) bez jakýchkoliv vnějších zásahů. Každá patrona měla délku 2,8 m a skládala se ze čtyř dílů. V časových intervalech 3, 6, 12 a 18 měsíců byl vždy jeden díl patrony vytažen a materiál podroben analýzám.

V laboratorních podmínkách (VŠCHT) byly zátěži (pět typů saturačních médií: SGW-K, SGW-K-10, SGW-Mg, SGW-Mg-10 a Josef) vystaveny všechny tři druhy bentonitových materiálů (Rokle, FEBEX, Mock-Up-CZ). Bentonity Rokle a FEBEX byly navíc saturovány i destilovanou vodou, u materiálu Mock-Up-CZ bylo použito pouze médium SGW-K-10 a SGW-Mg-10. Vzorky byly smíchány s médii v poměru 1:3, část z nich byla ponechána za laboratorní teploty, část byla po dobu deset hodin denně zahřívána v sušičce za teploty 80–90 °C. Během tohoto experimentu nebyla saturační média doplňována. Odběr vzorků probíhal v intervalech 1 týden, 2 týdny, 1 měsíc, 2, 3 a 4 měsíce, 5, 7, 8, 10 a 12 měsíců.

V laboratořích VŠCHT dále probíhalo studium interakce cementové matrice a betonu s vodnou fází a následně s bentonitem Rokle.

Celkem bylo analyzováno 310 vzorků. Fázová analýza byla opět prováděna na difraktometru X'Pert Pro (PANanalytical) na ÚGMNZ PŘF UK. Preparáty byly měřeny a vyhodnocovány za stejných podmínek jako ty z experimentu Mock-Up-CZ.

4. Výsledky a diskuse

V žádném vzorku z bentonitových tvárníc tvořících těsnící bariéru v experimentální nádobě Mock-Up-CZ nebyla zaznamenána přeměna původních minerálních fází. U vzorků odebraných ze zásyvu ovšem nebylo o mineralogických změnách pochyb, neboť novotvořené fáze byly zřetelně viditelné i pouhým okem (obr. 2). Z výsledků je zřejmé, že bílá jádra jsou tvořena sádrovcem a šedé aureoly směsí illitu, sádrovce a smektitu. Množství novotvořeného sádrovce rapidně klesalo s narůstající vzdáleností od zdroje syntetické granitické vody, čímž je jasně demonstrován zásadní vliv fluida na tuto přeměnu.

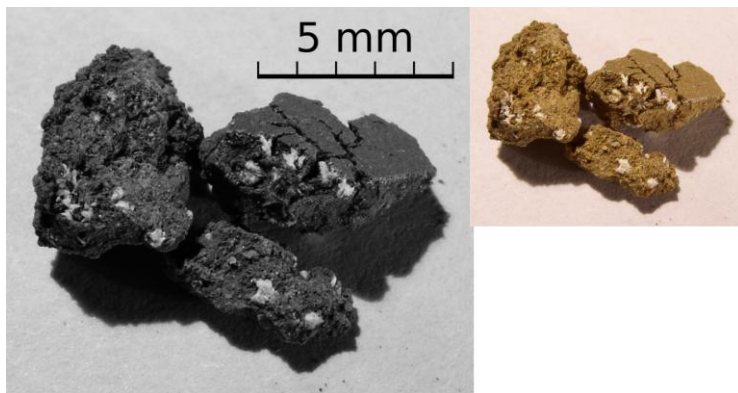


Obr. 2 Novotvořená zrna sádrovce s illitovou aureolou.

Mineralogicky stabilní byla i většina vzorků z projektu sledování dlouhodobé stability inženýrských bariér (suspenze v tlakových nádobách, fyzikální modely, vzorky z procedury

in situ, experimenty s cementy a cementovou vodou, materiál z Mock-Up-CZ, bentonity Rokle i FEBEX zatížené médií SGW-Mg, SGW-Mg-10, SGW-K, Josef či destilovanou vodou). Při experimentu se saturačním médiem SGW-K-10 však byly zjištěny výrazné změny jak pro bentonit Rokle, tak i FEBEX.

Ve vzorcích bentonitu Rokle zatížených médiem SGW-K-10 byly novotvořené fáze identifikovány po deseti měsících zátěže (sádrovec) a to jak za laboratorních, tak za zvýšených teplot. Za zvýšených teplot po dvanácti měsících zátěže byl kromě sádrovce identifikován i novotvořený bassanit (obr. 3).



Obr. 3 Bílé vyrostlice bassanitu a sádrovce ve vzorku číslo R30V (Rokle, 80–90 °C, 12 měsíců). Gama parametr obrázku vlevo byl z důvodu zvýraznění zrn upraven na hodnotu 0,6. Obrázek vpravo je v reálných barvách.

Ve vzorcích bentonitu FEBEX zatížených médiem SGW-K-10 se první novotvořené fáze začaly projevovat již po sedmi měsících zátěže (sádrovec) a to jak za laboratorních, tak za zvýšených teplot. Za laboratorních teplot byl po dvanácti měsících zaznamenán i bassanit, za zvýšených teplot už pouze bassanit (obr. 4).



Obr. 4 Bílé vyrostlice bassanitu ve vzorku číslo F30V (FEBEX, 80–90 °C, 12 měsíců). Gama parametr obrázku vlevo byl z důvodu zvýraznění zrn upraven na hodnotu 0,45. Obrázek vpravo je v reálných barvách.

Novotvořený sádrovec v projektu Mock-Up-CZ vznikl vysrážením z reakce Ca^{2+} (z karbonátů) s SO_4^{2-} (ze syntetické granitické vody). Stejným mechanismem vznikl i sádrovec v projektu stability bariér, kde bylo silným zdrojem SO_4^{2-} médium SGW-K-10 a Ca^{2+} pocházel opět z karbonátů.

Novotvoření sádrovice bylo zaznamenáno například i v projektu FEBEX (Fernández & Villar 2010), který byl zaměřený na výzkum interakce jílových bariér a horninového okolí. V projektu FEBEX byl stejně jako během experimentu Mock-Up-CZ neomezený přísun syntetické granitické vody. To je podstatný rozdíl oproti českému projektu stability bariér, kde se materiály smíchaly s fluidy v poměru 1:3 pouze na začátku experimentu a ty již nebyly v průběhu experimentu doplňovány. To vedlo k transformaci sádrovice na bassanit, která byla iniciována jak teplotou, tak složením jílového materiálu – bassanit byl identifikován po dvanácti měsících v bentonitu FEBEX za laboratorní i zvýšené teploty, zatímco v bentonitu Rokle ve stejném časovém horizontu pouze za

teploty zvýšené. Ke kompletní transformaci sádrovce na bassanit došlo pouze ve vzorku zatíženém maximální teplotou po maximální čas, ostatní výskyty novotvořených fází byly smíšené.

Kromě novotvořených fází byla u bentonitu FEBEX v saturačním médiu SGW-K-10 zaznamenána i změna montmorillonitu na illit, takzvaná illitizace.

Illitizace je jedním z nejvýraznějších degradačních procesů, který by mohl výrazně ohrozit mineralogickou stabilitu těsnicí i zásypové bariéry (Pusch 2006). V důsledku illitizace se zhoršují příznivé funkční vlastnosti smektitu: schopnost bobtnání, sorpční vlastnosti a kationtová výměnná kapacita. V těsnicí bariéře obsahující takto degradovaný bentonit se zvyšuje hydraulická vodivost a klesá její sorpční kapacita (Inoue, Utada & Wakita 1992; Hatano, Hatano & Suzuki 1995; Hökmark, Karnland & Pusch 1997; Wersin, Johnson & McKinley 2007; Kaufhold & Dohrmann 2009).

Hlavními faktory ovlivňujícími proces illitizace v hlubinném úložišti jsou teplota, čas a dostupnost draslíku (Pusch 2006; Wersin, Johnson & McKinley 2007). Mezi další faktory potom patří tlak, složení a fyzikálně chemické vlastnosti pórových fluid a jílového materiálu a nutná je i určitá aktivační energie (Cuadros & Linares 1996; Pusch & Karnland 1996; Pusch 2006).

Vzhledem k teplotní zátěži během experimentu Mock-Up-CZ (maximální teplota 90 °C) se z dosud dostupných dat (Karnland & Birgersson 2006; Plötze et al. 2007; Wersin, Johnson & McKinley 2007) nepředpokládala výrazná přeměna smektitu na smíšené struktury illit-smektit či illit, neboť k tomu je obecně zapotřebí teplot vyšších než těch dosažených v experimentální nádobě. Jak uvádí (Pusch & Karnland 1996), významná illitizace nastává při neomezeném přístupu k draslíku během několika tisíců let při teplotě 150 °C, zatímco za teploty do 100 °C je illitizace naprosto

bezvýznamná po dobu desítek tisíc let. Ke stejnému závěru, tedy že za teploty pod 100 °C bude illitizace naprosto zanedbatelná, došel i tým švédských vědců (SKB 2004), vycházející ze současných modelů illitizace.

U zdroje fluida v experimentu Mock-Up-CZ se projevil jiný klíčový faktor pro illitizaci než je teplota, a to, dostupnost a celkové množství draslíku. Podle Pusche & Karnlandové (1996) je přístup k draslíku hlavní faktor, který kinetiku reakce kontroluje za teplot vyšších než 60 °C, podle Pusche (2006) je přístup k draslíku nejdůležitějším faktorem za jakékoliv teploty. Podle Whitneye (1992) je vliv přístupu ke zdroji draslíku důležitější za nízkých teplot než za vysokých. Za vyšších teplot (více než 300 °C) mělo množství draslíku v systému relativně menší vliv na rozsah illitizace, zvláště za delších časových intervalů. Pokud tedy bude zajištěno zamezení přístupu k draslíku v úložišti, bentonitová bariéra se během statisíců let významně nezmění (Pusch & Karnland 1996).

V případě experimentu dlouhodobé stability bariér byly hlavními faktory illitizace dostatečný přísun draslíku a také složení jílového materiálu. Lze tak usoudit z faktu, že procesem byl postižen pouze bentonit FEBEX v médiu SGW-K-10, nehledě na tepelnou zátěž. Od výchozích hodnot pro nezatížený materiál (11 % vrstev illitu) došlo k navýšení množství illitových vrstev o 3–12 %, tedy na hodnoty 14–20 % illitových vrstev pro vzorky za laboratorní teploty a 16–23 % pro teploty zvýšené na 80–90 °C. Vzhledem k chybě měření (směrodatná odchylka je 3 %) je možno konstatovat, že v tomto případě tedy teplota na proces illitizace neměla žádný zásadní vliv.

Podle Whitneye (1992) probíhá illitizace tak, že nejprve dojde k rapidnímu navýšení množství illitu, nicméně potom se dramaticky zpomalí s narůstajícím časem. To přesně odpovídá i výsledkům experimentu stability bariér, kdy se množství

illitových vrstev prudce zvýšilo již během prvního týdne a posléze již nijak významně nenarůstalo. V experimentu Mock-Up-CZ nebylo možné podobný proces sledovat, neboť neprobíhalo průběžné vzorkování materiálu zásypu u víka experimentální nádoby.

5. Závěry

Hlavním přínosem experimentu *Mock-Up-CZ* je zhodnocení stability základních mineralogických, chemických a geochemických parametrů bentonitu z ložiska Rokle, získání prvních poznatků v české historii z tohoto typu experimentů, ověření relevantnosti použitých metod a ověření navrhovaného přístupu při řešení takového multidisciplinárního projektu.

Výsledkem prací zahrnutých v projektu *Sledování dlouhodobé stability inženýrských bariér na bázi bentonitu s využitím zatěžovacích procedur a experimentů in situ a hodnocení jejich retardační funkce* je popis změn mineralogických, chemických a geochemických parametrů použité bentonitové směsi (Rokle, FEBEX) na stabilitu chování materiálu inženýrské bariéry. Provedený výzkum zásadním způsobem přispěl k bližšímu porozumění nástrojů pro hodnocení vhodnosti a využitelnosti českých bentonitů jako těsnících nebo výplňových materiálů v hlubinném úložišti.

Významnou součástí obou experimentálních projektů byl výzkum mineralogické stability bentonitového materiálu, resp. případných mineralogických (fázových) změn v něm proběhlých, prováděný na Přírodovědecké fakultě Univerzity Karlovy.

V žádném analyzovaném vzorku z bentonitových tvárníc tvořících těsnící bariéru v experimentální nádobě Mock-Up-CZ nebyly zaznamenány novotvořené fáze ani mineralogické přeměny. Mineralogicky stabilní byla i většina vzorků z projektu sledování dlouhodobé stability inženýrských bariér

(suspenze v tlakových nádobách, fyzikální modely, vzorky z procedury in situ, experimenty s cementy a cementovou vodou, materiál z Mock-Up-CZ, bentonity Rokle i FEBEX zatížené médií SGW-Mg, SGW-Mg-10, SGW-K, Josef či destilovanou vodou).

Ve vzorcích pocházejících ze zásypu experimentální nádoby Mock-Up-CZ se vytvořila okem viditelná zrna sádrovce s illitovou aureolou. Četnost vyrostlic rapidně klesala s narůstající vzdáleností od zdroje syntetické granitické vody, čímž byl jasně deklarován zásadní vliv přísunu draslíku na proces proběhlé illitizace. Navíc SO_4^{2-} z této granitické vody zareagoval s Ca^{2+} z karbonátů za vzniku daného sádrovce. Stejným mechanismem vznikla i sádrovcová zrna v projektu sledování dlouhodobé stability inženýrských bariér. Byla identifikována ve vzorcích bentonitů FEBEX a Rokle zatížených médii SGW-K-10. Jelikož médium v tomto experimentu nebylo průběžně doplňováno, vzniklý sádrovec se s časem postupně transformoval na bassanit.

Výrazný přísun draslíku do systému hrál významnou roli i v experimentu sledování dlouhodobé stability inženýrských bariér. Vzorky bentonitu FEBEX podrobené zátěži saturačním médii SGW-K-10 vykazovaly přítomnost illitizace a to nezávisle na teplotě. V bentonitu Rokle nebyla podobná transformace zaznamenána, lze tedy usoudit, že tento bentonit, který bude použit v českém hlubinném úložišti, byl za daných podmínek mineralogicky stabilnější.

6. Použitá literatura

Arcos, D, Bruno, J & Karnland, O 2003, 'Geochemical model of the granite–bentonite–groundwater interaction at Äspö HRL (LOT experiment)', *Applied Clay Science* 23, 2003, pp. 219-228.

Cuadros, J & Linares, J 1996, 'Experimental kinetic study of the smectite-to-illite transformation', *Geochimica et Cosmochimica Acta* 60, 1996, pp. 439-453.

Fernández, AM & Villar, MV 2010, 'Geochemical behaviour of a bentonite barrier in the laboratory after up to 8 years of heating and hydration.', *Applied Geochemistry* 25, 2010, pp. 809-824.

Hatano, Y, Hatano, N & Suzuki, A 1995, 'Dynamic analysis of nuclide diffusion with illitization of the buffer material.', *Waste management* 15, 1995, pp. 495-500.

Hökmark, H, Karnland, O & Pusch, R 1997, 'A technique for modeling transport/conversion processes applied to smectite-illite conversion in HLW buffers', *Engineering Geology* 47, 1997, pp. 367-378.

Inoue, A, Utada, M & Wakita, K 1992, 'Smectite-to-illite conversion in natural hydrothermal systems', *Applied Clay Science* 7, 1992, pp. 131-145.

Karnland, O & Birgersson, M 2006, *Montmorillonite stability. With special respect to KBS-3 conditions. TR-06-11.*, 1st edn, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm, Švédsko.

Kaufhold, S & Dohrmann, R 2009, 'Stability of bentonites in salt solutions | sodium chloride', *Applied Clay Science* 45, 2009, pp. 171-177.

Ondruš, P 1997, 'ZDS - software for X-ray powder diffraction analysis. ZDS Systems Inc., Praha.'

Pacovský, J 2003a, 'Physical model of an engineered barrier Mock-Up-CZ', *International high-level radioactive waste management conference*, Las Vegas.

Pacovský, J 2003b, *Use of the Physical Model Mock-Up-CZ for the Design of a Geotechnical Barrier for a Deep Repository.*, 1st edn, Stavební fakulta, ČVUT, Praha.

Pacovský, J 2004, 'The use of the Mock-Up-CZ physical model for the design of a geotechnical barrier for a deep repository.', *Proceedings of the Fifteenth Southeast Asian Geotechnical Conference*, Pathumthani.

Pacovský, J 2006, 'The use of the Mock-Up-CZ physical model in the design of engineered barriers', *Management of Natural Resources, Sustainable Development and Ecological Hazards* 99, 2006, pp. 827-837.

- Pacovský, J, Svoboda, J & Zapletal, L 2007, 'Saturation development in the bentonite barrier of the Mock-Up-CZ geotechnical experiment', *Physics and Chemistry of the Earth* 32, 2007, pp. 767-779.
- Plötze, M, Kahr, G, Dohrmann, R & Weber, H 2007, 'Hydro-mechanical, geochemical and mineralogical characteristics of the bentonite buffer in a heater experiment: The HE-B project at the Mont Terri Rock Laboratory.', *Physics and Chemistry of the Earth* 32., 2007, pp. 730-740.
- Pusch, R 2006, 'Clays and Nuclear Waste Management.', in F Bergaya, BKG Theng, G Lagaly (eds.), *Handbook of Clay Science. Developments in Clay Science, Vol 1.*, 1st edn, Elsevier, Oxford.
- Pusch, R & Karnland, O 1996, 'Physico/chemical stability of smectite clays', *Engineering Geology* 41, 1996, pp. 73-85.
- Pusch, R, Kasbohm, J, Pacovsky, J & Cechova, Z 2007, 'Are all smectite clays suitable as "buffers"?', *Physics and Chemistry of the Earth* 32., 2007, pp. 116-122.
- Pusch, R, Kasbohm, J & Thao, HTM 2010, 'Chemical stability of montmorillonite buffer clay under repository like conditions-A synthesis of relevant experimental data.', *Applied Clay Science* 47, 2010, pp. 113-119.
- SKB 2004, *Interim process report for the safety assessment SR-Can. SKB Rapport R-04-33.*, 1st edn, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm, Švédsko.
- Svoboda, J & Vašíček, R 2006, 'Selected results after 3 years of the Mock-Up-CZ experiment', *International high-level radioactive waste management conference*, Las Vegas.
- Svoboda, J & Vašíček, R 2010, 'Preliminary geotechnical results from the Mock-Up-CZ experiment', *Applied Clay Science* 47, 2010, pp. 139-146.
- Wersin, P, Johnson, LH & McKinley, IG 2007, 'Performance of the bentonite barrier at temperatures beyond 100 °C: A critical review.', *Physics and Chemistry of the Earth* 32., 2007, pp. 780-788.

Whitney, G 1992, 'Diocahedral smectite reactions at elevated temperatures: Effects of K-availability, Na/K ratio and ionic strength', *Applied Clay Science* 7, 1992, pp. 97-112.

The influence of temperature and hydration on the long term stability of the buffer material

1. Introduction

Deep disposal is considered a safe solution to the management of high-level radioactive waste worldwide. The objective of the permanent disposal of radioactive waste is to isolate this waste from the biosphere in such a way that even the release of radionuclides, as a result of not completely excludable migration processes, will not lead at any time in the future to the breaking of any dose thresholds. The cornerstone of all proposed schemes for the underground disposal of radioactive wastes is the multiple-barrier concept – a geological repository uses multiple barriers that include the waste form, container, sealing materials, and the host rock. The system is designed such that the failure of one component would not jeopardize the safety of the containment system as a whole.

Bentonites compressed to a given density are considered as the main buffer material used in high-level radioactive waste disposal concepts in many countries (Pusch et al., 2007). The buffer material is expected to fill the spaces between the canisters with the spent fuel and the surrounding geoenvironment (Gens et al., 2002; Komine, 2004). As a part of the engineering barriers, the buffer materials are expected to have the function of both isolation and retardation, i.e. prevention of the flow of groundwater from the surrounding rock to the canisters, as well as adsorbing any potentially released radionuclides from the corroded/corroding canisters. These functions are acquired by the unique properties of smectite-rich materials, which include low hydraulic conductivity, high adsorption capacity, swelling, and/or self-healing potential (Hatano et al., 1995; Kamei et al., 2005; Komine, 2004; Montes-H et al., 2005; Savage et al., 1999). A thorough understanding of the behaviour of the buffer

materials in conditions simulating the repository is a necessary prerequisite for ensuring that the bentonite buffer will sustain its properties over the required repository life-time (100,000 years) (e.g., Gibb, 1999).

2. Aims of the study

The objective of this study is to identify mineralogical changes and describe transformation processes in the bentonite materials due to heating and interaction with various saturation media (with different chemical composition) under controlled laboratory and in situ conditions (“Mock-Up-CZ” and “Long-term stability of engineering barriers” experiments).

3. Material and methods

The Mock-Up-CZ experiment performed by the Centre of Experimental Geotechnics (Czech Technical University) simulates vertical placement of a container with radioactive waste according to the Swedish KBS-3 system (Fig. 1). The experiment lasted for a period of 3 years and 9 months. The model consists of a heating canister (substitutes a container with radioactive waste, 90 °C max) surrounded by an engineered barrier of bentonite blocks (200 mm wide), which are enclosed in a cylindrical steel cover. The system was saturated with synthetic granitic water. All empty spaces (except for a 10 mm assembly space between the heater and the barrier) were filled with a loose bentonite mixture (Pacovský et al., 2007). Six measurement profiles (Fig. 1) along the height of the experimental tank served as continuous measurement of on-going processes (Pacovský et al., 2007). A number of sensors (40 thermometers, 50 hydraulic pressure cells and 37 humidity sensors) monitored temperature, pressure, and moisture changes in those profiles.

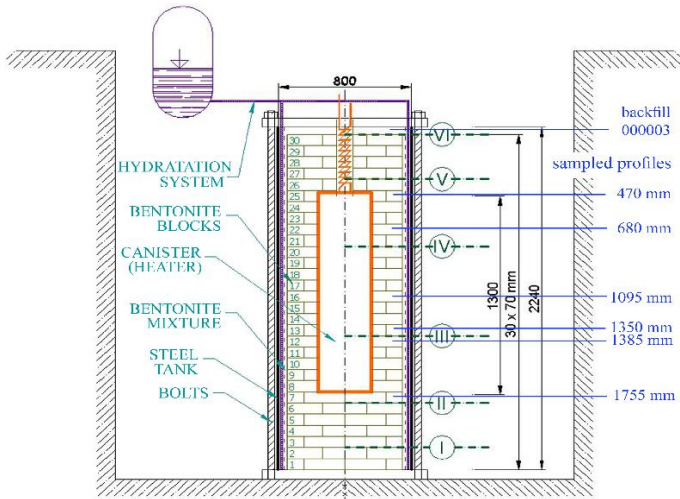


Fig. 1. Mock-Up-CZ experiment.

The material for both the buffer and the backfill zone consists of a mixture of Role bentonite (85 vol.%), quartz sand (10 vol.%), and graphite (5 vol.%). In this specific study, focused on the mineralogical changes in both backfill and buffer zones, the samples were obtained in six specific depth levels of the buffer and in one level of the backfill (Fig. 1).

The “Long-term stability of engineering barriers” experimental study was performed by using three materials — Rokle bentonite, FEBEX bentonite, and a Mock-Up-CZ buffer-like mixture. The experimental materials were subjected to interactions with five types of saturation media which either represent natural groundwater (from the drill holes in the Josef Underground Educational Facility – the Josef UEF) or simulate artificial groundwater with an increase primarily in K^+ and Mg^{2+} content. The experiments were performed using the study material in (1) highly compacted blocks, (2) in dispersions and (3) as a hole filling during an in situ experiment.

In the case of the highly compacted blocks, only the Rokle bentonite was used. The blocks were placed in small physical models, and were saturated with SGW-K and Josef saturation media at 95 °C. In experiments with dispersions, 4 kg of wet experimental material was mixed with 3 L of the saturation media (SGW-K and Josef type) into the intended dispersion. To avoid drying during the thermal loading which included a period of 13 days at 95 °C and 1 day at 25 °C, with a break for water level monitoring/water refilling, the samples were placed in pressure vessels. Individual samples were extracted after 3, 6, 12, and 18 months of interaction.

During the in situ procedure, highly compacted cylinders of bentonite were inserted into 70 cm long perforated tubes. Subsequently they were pushed into the five drilled holes (the Rokle and Mock-Up-CZ materials were represented twice, with the FEBEX bentonite in one of the drill holes) at the Josef UEF site. The perforated tubes provided inflow of water from the surrounding rock mass and minimized the erosion of the bentonite and its transport out of the test site. During this experiment, the specimens were only subjected to ambient temperatures within the rock mass. Samples were extracted after 4, 6, 11, and 17 months.

A fourth set of specimens was subjected to hydrothermal treatment, at 25 °C and 80–90 °C, in the laboratories of the Institute of Chemical Technology in Prague (ICT). Non-compacted experimental materials from all sample types were mixed with the saturation media at a 1:3 ratio and were continuously clamped to a laboratory shaker. The saturation media were not refilled during the experiment. The samples were extracted after 1 and/or 2 weeks, and after 1, 2, 3, 4, 5, 7, 10, and/or 12 months. Those samples saturated with the Josef saturation medium were extracted only during the first 4 months.

The mineralogical composition of the experimental material was studied by means of standard X-ray diffraction technique (XRD) and in the case of Mock-Up-CZ experiment by FTIR spectroscopy. XRD analysis aimed to identify present crystalline phases and to evaluate transformation processes that affected bentonite during the experimental heating and/or hydration. XRD measurement was conducted by using X'Pert Pro (PANalytical) diffractograph with the X'Cellerator detector with the following measurement conditions: irradiation $\text{CuK}\alpha$, secondary graphite monochromator, degree range $3\text{--}60^\circ$ 2θ , step 0.05° per 200 s, voltage 40 kV and current 30 mA (Laboratory of XRD, Institute of Geochemistry, Mineralogy and Mineral Resources, Charles University). Solvation with ethylene glycol at 40°C for 24 h was used to distinguish smectites from other clay minerals on diffractograms. The raw XRD spectra were processed through the Bede ZDS 4.17 software (Ondruš, 1997).

4. Results and discussion

To ensure the long-term safety of the engineering barriers of a high-level radioactive waste repository, it is very important to understand the processes of potential transformation of the smectites into non-swelling phases. The transformation of smectites to illite/smectite mixed layer minerals or to non-expandable layer silicates (illite and/or chlorite) reduces the swelling potential of the buffer, and thereby its low hydraulic conductivity and self-sealing potential (Pusch et al., 2007). The composition of the saturation media can play a very important role in such processes, but it has not been experimentally verified (Missana et al., 2004; Kónya et al., 2005; Jakob et al., 2009).

The mineralogical changes in the barrier involve two major processes: transformation of smectite, and formation of gypsum and/or bassanite.

No mineralogical changes were found in the buffer zone of Mock-Up-CZ experiment. According to a low temperature in the experimental tank, no changes were, in fact, expected. The changes in the backfill (placed on the top of the experimental set-up) were clearly detectable by naked-eye as several mm large whitish spots surrounded by light brown margin, also several mm in diameter (Fig. 2).



Fig. 2 Newly formed gypsum with illitic aureole in the backfill of the Mock-Up-CZ experiment.

The XRD analysis confirmed that the whitish spots are composed only of gypsum whilst the light-coloured brown rim is composed mainly of illite. These “spots”, very common at the top of the backfill rapidly disappear with depth. The transformation of smectite to illite is thus probably due to the hydration of the backfill because the synthetic granitic water was enriched in potassium that is essential for the transformation of smectite to illite (Whitney, 1992; Pusch & Karnland, 1996; Pusch, 2006).

No transformation processes were identified in the second experiment in the bentonite samples which reacted with solutions in the form of highly-compacted blocks, dispersion, and/or with the in situ drill-hole fillings. In the samples

subjected to common batch laboratory experiments (ICT laboratories), phase changes or formation of new phases was not observed in the Rokle and FEBEX bentonites interacted with the SGW-K, SGW-Mg, SGW-Mg-10, and Josef saturation media. In contrast, some significant phase changes were achieved in the Rokle and FEBEX bentonite samples, which interacted with the SGW-K-10 saturation medium.

The first change concerns the partial transformation of the montmorillonite layers to illite in the FEBEX bentonite, based on the $\Delta 2\theta$ values (14–21%±3% of illite layers), compared to the original material. For the Rokle bentonite, this parameter remained unchanged. The second change observed is related to the formation of new phases – gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) and bassanite ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$) – in both bentonites studied from the 7th month (FEBEX bentonite), or from the 10th month of experiments (Rokle bentonite). Gypsum formation was controlled by calcite dissolution and the presence of fluids rich in the sulphate anion (SGW-K-10 saturation medium).

In the ICT laboratory experiments, the bentonites were initially mixed with the saturation media at a ratio of 1:3, and the fluids were not further refilled during the experiment. The insufficient amount of the saturation media after 12 months transformed the newly formed gypsum to bassanite.

The gypsum to bassanite transformation was also controlled by temperature and the bulk chemistry of the bentonite. Bassanite was identified in specimens of the FEBEX bentonite subjected to treatments in the ambient and elevated temperatures for at least 12 months; similar results were achieved for the Rokle bentonite subjected to only at 80–90°C. In one specimen (FEBEX, 80–90°C, 12 months), the gypsum was completely transformed into bassanite. However in other specimens (Rokle, 80–90°C, 12 months; FEBEX, 25 °C, 12 months) the mixture of gypsum and bassanite indicated only a partial transformation.

Except for the FEBEX and Røkle bentonite samples subjected to interaction with the SGW-K-10 saturation medium, other transformation processes were not observed. The other saturation media did not affect mineralogical changes under the experimental conditions used in this study.

Transformation of smectite to mixed layer clay minerals and/or illite is one of the major reactions affecting the long-term performance of the buffer material, and a key factor in safety scenarios of nuclear waste repositories (Arcos et al., 2008). Despite numerous previous experimental studies and collected knowledge on the illitization process in bentonite barriers that is driven by temperature, pressure, pore fluid composition, bulk chemistry of the clay, specific composition of the smectite, and time (see review by Wersin et al., 2007 and references therein, Hatano et al., 1995; Pusch and Karnland, 1996; Hökmark et al., 1997, among others), the details of the smectite to illite transformation are still being debated. The presence of potassium is a prerequisite for illite formation, and it is generally accepted that the rate of smectite-to-illite conversion is controlled by some specific activation energy (Huang et al., 1993).

In our experiment, abundant K-availability and the bulk chemistry of the clay were the key factors for illitization, since only the FEBEX bentonite in the SGW-K-10 medium was affected, regardless of the temperature.

The effect of potassium availability is more important at lower temperatures (our case) than at higher temperatures (Whitney, 1992). Initially, the illite proportion increased rapidly decreasing dramatically with time (Whitney, 1992). This is in agreement with our experiment, where the amounts of illite layers increased during the first week, becoming stable later.

5. Conclusions

No mineralogical changes were found in the buffer zone of Mock-Up-CZ experiment. According to a low temperature in the experimental tank, no changes were, in fact, expected. In the backfill part of the experiment (i.e. above the top of the canister), clear evidence of the formation of gypsum clusters and illitization in the contact zone between gypsum and surrounding bentonite was observed. The gypsum disappears very quickly with distance from the source of artificial hydration.

In the “Long-term stability of engineering barriers” experimental study phase changes in Rokle and FEBEX bentonites and one buffer-like mixture (Mock-Up-CZ) prepared under various conditions, and exposed to saturation by liquids with an increased content of potassium and/or magnesium were studied. The availability of potassium and the bulk chemistry of the original materials control the partial transformation of the smectite to illite, which was accompanied by formation of abundant gypsum and/or bassanite, the latter formed from insufficient supply of a liquid phase to the experiment. The transformation of smectites and the formation of new phases were enhanced by an increase of temperature (80–90 °C in this case) and a type of bentonite material.

6. References

Arcos, D., Grandia, F., Domènech, C., Fernández, A.M., Villar, M.V., Muurinen, A., Carlsson, T., Sellin, P., Hernán, P., 2008, 'Long-term geochemical evolution of the near field repository. Insights from reactive transport modelling and experimental evidence.', *J. Contam. Hydrol.* 102, 2008, pp. 196–209.

Gens, A., Guimaraes, L., do, N., Garcia-Molina, A., Alonso, E.E., 2002, 'Factors controlling rock-clay buffer interaction in a radioactive waste repository.', *Eng. Geol.* 64, 2002, pp. 297–308.

- Gibb, FGF 1999, 'High-temperature, very deep, geological disposal: a safer alternative for high-level radioactive waste?', *Waste Management* 19, 1999, pp. 207-211.
- Hatano, Y, Hatano, N & Suzuki, A 1995, 'Dynamic analysis of nuclide diffusion with illitization of the buffer material.', *Waste management* 15, 1995, pp. 495-500.
- Hökmark, H, Karnland, O & Pusch, R 1997, 'A technique for modeling transport/conversion processes applied to smectite-illite conversion in HLW buffers', *Engineering Geology* 47, 1997, pp. 367-378.
- Huang, W.-L., Longo, J.M., Pevear, D.R., 1993, 'An experimentally derived kinetic model for smectite-to-illite conversion and its use as a geothermometer. ', *Clays Clay Miner.* 41, 1993, pp. 162–177.
- Jakob, A., Pflingsten, W., Van Loon, L., 2009, 'Effects of sorption competition on caesium diffusion through compacted argillaceous rock. Geochim.', *Cosmochim. Acta* 73, 2009, pp. 2441–2456.
- Kamei, G, Mitsui, MS, Futakuchi, K, Hashimoto, S & Sakuramoto, Y 2005, 'Kinetics of long-term illitization of montmorillonite - a natural analogue of thermal alteration of bentonite in the radioactive waste disposal system.', *Journal of Physics and Chemistry of Solids* 66., 2005, pp. 612-614.
- Komine, H 2004, 'Simplified evaluation for swelling characteristics of bentonites', *Engineering Geology* 71, 2004, pp. 265-279.
- Kónya, J., Nagy, N.M., Nemes, Z., 2005, 'The effect of mineral composition on the sorption of cesium ions on geological formations. ', *J. Colloid Interface Sci.* 290, 2005, pp. 350–356.
- Missana, T., García-Gutiérrez, M., Alfonso, Ú., 2004, 'Kinetics and irreversibility of cesium and uranium sorption onto bentonite colloids in a deep granitic environment. ', *Appl. Clay Sci.* 26, 2004, pp. 137–150.
- Montes-H, G, Marty, N, Fritz, B, Clement, A & Michau, N 2005, 'Modelling of long-term diffusion-reaction in a bentonite barrier for radioactive waste confinement', *Applied Clay Science* 30, 2005, pp. 181-198.

- Ondruš, P 1997, 'ZDS - software for X-ray powder diffraction analysis. ZDS Systems Inc., Praha.'
- Pacovský, J, Svoboda, J & Zapletal, L 2007, 'Saturation development in the bentonite barrier of the Mock-Up-CZ geotechnical experiment', *Physics and Chemistry of the Earth* 32, 2007, pp. 767-779.
- Pusch, R 2006, 'Clays and Nuclear Waste Management.', in F Bergaya, BKG Theng, G Lagaly (eds.), *Handbook of Clay Science. Developments in Clay Science, Vol 1.*, 1st edn, Elsevier, Oxford.
- Pusch, R & Karnland, O 1996, 'Physico/chemical stability of smectite clays', *Engineering Geology* 41, 1996, pp. 73-85.
- Pusch, R, Kasbohm, J, Pacovsky, J & Cechova, Z 2007, 'Are all smectite clays suitable as "buffers"?', *Physics and Chemistry of the Earth* 32., 2007, pp. 116-122.
- Savage, D, Lind, A & Arthur, RC 1999, *Review of the properties and uses of bentonite as a buffer and backfill material.*, SKI Report, Sweden.
- Wersin, P, Johnson, LH & McKinley, IG 2007, 'Performance of the bentonite barrier at temperatures beyond 100 °C: A critical review.', *Physics and Chemistry of the Earth* 32., 2007, pp. 780-788.
- Whitney, G 1992, 'Diocahedral smectite reactions at elevated temperatures: Effects of K-availability, Na/K ratio and ionic strength', *Applied Clay Science* 7, 1992, pp. 97-112.

CURRICULUM VITAE – ŽIVOTOPIS

Osobní údaje

Jméno:	Švandová Jana
Adresa trvalého bydliště:	Okružní 220, Babice, 251 01
Telefon:	+420 605 704 305
E-mail:	jasv@centrum.cz, jana@astronomie.cz
Národnost:	česká
Datum narození:	8. srpna 1980

Vzdělání

1992 – 1999	
Název školy:	Víceleté gymnázium Hořice
Dosažená kvalifikace:	maturita (český jazyk, anglický jazyk, chemie, fyzika)

2001 – 2006	
Název školy:	Přírodovědecká fakulta Karlovy Univerzity
Studijní program:	magisterský
Studijní obor:	geologie
Specializace:	ložisková geologie
Státní závěrečné zkoušky:	ložisková geologie, mineralogie, geochemie

2006 – ...	
Název školy:	Přírodovědecká fakulta Karlovy Univerzity
Studijní program:	doktorské studium, aplikovaná geologie

Státní doktorské zkoušky: ložisková geologie nerud,
jílová mineralogie,
geotechnologie hlubinných
úložišť jaderného odpadu

Absolvované kurzy

2005 Kurz mineralogie se
zaměřením na gemologii – PřF
UK

2007 Kurz aplikace GIS v
geologických vědách

Pracovní zkušenosti

2001 (červenec, září) Astronomický ústav AVČR
Ondřejov, stelární oddělení,
zpracování spektroskopických
dat

2006 – 2009 Česká geologická služba,
výzkumná pracovnice

2009 – 2010 Zkušebna kamene a kameniva,
s.r.o., Specialista centra
technické normalizace

Publikace:

Švandová J., Videnská, K., Příkryl, R (2013): Experimental evaluation of the influence of saturation media on the mineralogical and physicochemical stability of bentonites. *Applied Clay Science* 86: 1–10.

Kolaříková I., **Švandová J.**, Příkryl R. (2010): Mineralogical changes in bentonite barrier within Mock-Up-CZ experiment. *Applied Clay Science* 47(1-2): 10-15.

Vinšová H., Jedináková-Křížová V., Kolaříková I., **Adamcová J.**, Příkryl R., Zeman J. (2008): The influence of temperature and hydration on the sorption properties of bentonite. *Journal of Environmental Radioactivity* 99 (2): 415-425.

Švandová J., 2008: Nerostné suroviny - bohatství kraje. Kapitola do knihy "Přírodou z Polabí k hraničním horám" (66-69), editor: RNDr. Petr Rybář, ISBN 978-80-254-2736-1, vydal Královéhradecký kraj 2008, 264 stran.

Adamcová J.: 2007, *Změny vlastností bentonitů při tepelné a salinní zátěži*. Zprávy o geologických výzkumech v roce 2006, Česká geologická služba, 198-201. (ISBN 978-80-7075-698-0, ISSN 0514-8057).

Adamcová J., 2008: Možnost využití bentonitu z ložiska Rokle jako geotechnické bariéry v hlubinném úložišti radioaktivního odpadu. *Minerální suroviny, Těžební unie*, 32-33. (ISSN 1212-7248).

R. Vašíček, V. Křížová, J. Zeman, **J. Švandová**, R. Příkryl: "Long Term Stability of the Buffer Material: Rokle, Mock-Up-CZ and FEBEX bentonite." The fourth meeting on "Clays in Natural & Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement", 29th March to 1st April 2010, "Cité Internationale des Congres" in Nantes, France. Proceedings from 4th international meeting, pp. 725-726.