



MASARYKOVA UNIVERZITA
PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA
ÚSTAV GEOLOGICKÝCH VĚD



**VLIV SLOŽENÍ PODZEMNÍ VODY NA DLOUHODOBOU
STABILITU BENTONITŮ**

Bakalářská práce

Radim Musil

Vedoucí práce: Mgr. Tomáš Kuchovský, Ph.D.

Brno 2013

Bibliografický záznam

Autor:	Radim Musil Přírodovědecká fakulta, Masarykova univerzita Ústav geologických věd
Název práce:	Vliv složení podzemní vody na dlouhodobou stabilitu bentonitů
Studijní program:	Geologie
Studijní obor:	Geologie
Vedoucí práce:	Mgr. Tomáš Kuchovský, Ph.D.
Akademický rok:	2012/2013
Počet stran:	7+25
Klíčová slova:	Bentonit, podzemní voda, radioaktivní odpad, stabilita, úložiště
MDT:	556.3, 550.4, 550.4.02

Bibliographic Entry

Author	Radim Musil Faculty of Science, Masaryk University Department of geology
Title of Thesis:	Impact of ground water composition to longterm stability of bentonites
Degree programme:	Geology
Field of Study:	Geology
Supervisor:	Mgr. Tomáš Kuchovský, Ph.D.
Academic Year:	2012/2013
Number of Pages:	7+25
Keywords:	Bentonite, groundwater, nuclear waste, stability, storage
MDT:	556.3, 550.4, 550.4.02

Abstrakt

V této bakalářské práci studujeme chování přírodního materiálu bentonitu při styku s různými typy vod. V prostředí podzemních úložišť radioaktivních odpadů se při dnešní uvažované konstrukci předpokládá použití bentonitů jako těsnících a sorpčních materiálů. K experimentu byl použit bentonit B75, jako sytící médium destilovaná voda a podzemní voda ze štoly Josef. Na základě experimentálních údajů z laboratorních analýz byly vyhodnoceny změny složení pórové vody bentonitu. Na základě vyhodnocených dat byl pomocí grafů popsán vývoj koncentrace látek.

Abstract

In this thesis we study the behavior of natural material bentonite in contact with the various types of water. According to nowadays concepts of deep nuclear waste repositories, the use of bentonite as a sealing and sorption material expected. Bentonite B75 was used for the experiment. The distilled water and underground water from the URC Josef were used for the bentonite saturation. Based on the experimental data from laboratory analyzes, changes in the composition of bentonites pore water were evaluated. The evolution of component concentrations was described on the basis of graphical interpretation.



Masarykova univerzita

Přírodovědecká fakulta



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student : Radim Musil

Studijní program : Geologie

Studijní obor : Geologie

Ředitel Ústavu geologických věd PřF MU Vám ve smyslu Studijního a zkušebního řádu MU určuje bakalářskou práci s tématem:

Vliv složení podzemní vody na dlouhodobou stabilitu bentonitů
Impact of ground water composition to longterm stability of bentonites

Zásady pro vypracování: V prostředí podzemních úložišť radioaktivních odpadů se při dnešní uvažované konstrukci předpokládá použití bentonitů jako těsnících a sorpčních materiálů. V podmínkách úložiště bude docházet ke kontaktu bentonitů s podzemní vodou z okolních hornin. Látkové složení podzemních vod tak může za určitých podmínek negativně ovlivňovat vlastnosti bentonitů vedoucí ke snížení jejich dlouhodobé stability a ke zhoršení jejich geotechnických vlastností. Cílem bakalářské práce je vyhodnotit laboratorní experimenty, při kterých budou sledovány změny ve složení bentonitu a vodných roztoků v tlakových nádobách obsahujících různé podzemní vody s odlišným složením. Hlavními cíly budou zhodnotit změny složení bentonitů a změny složení vodných roztoků a pokusit se o interpretaci těchto změn. Podrobný seznam literatury na doporučení vedoucího práce a konzultanta.

Doporučená literatura: VINSOVA, Hana a Vera JEDINAKOVA-KRIZOVA a Irena KOLARIKOVA a Jana ADAMCOVA a Richard PRIKRYL a Josef ZEMAN. The influence of temperature and hydration on the sorption properties of bentonite. *Journal of Environmental Radioactivity*, Elsevier, 99, 2, od s. 415-425, 11 s. ISSN 0265-931X. 2008.

Vedoucí bakalářské práce : Mgr. Tomáš Kuchovský, Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce : 31. října 2012

Datum odevzdání bakalářské práce : 3. května 2013

V Brně dne 9.11.2012

MASARYKOVA UNIVERZITA
Přírodovědecká fakulta
602 00
ÚSTAV GEOLOGICKÝCH VĚD
Kotlářská 2, 602 00 Brno
doc. RNDr. Josef Zeman, CSc.
ředitel Ústavu geologických věd PřF MU

Zadání bakalářské práce převzal dne: 29.11.2012

Podpis studenta *Radim Musil*

Poděkování:

Rád bych touto cestou poděkoval panu Mgr. Tomáši Kuchovskému, Ph.D. za odborné a vstřícné vedení, poskytnuté materiály a cenné rady, Mgr. Pavle Filipské za odborné konzultace, poskytnutí studijních materiálů, ochotu, čas a cenné rady a Pavlu Kadlecovi za pomoc při práci v laboratoři.

Příprava a zpracování této bakalářské práce byla podpořena v rámci projektu "Výzkumný tým pro ukládání jaderných odpadů a jadernou bezpečnost" (CZ.1.07/2.3.00/20.0052), který je spolufinancován z Evropského sociálního fondu a státního rozpočtu České republiky.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svoji bakalářskou práci vypracoval samostatně s využitím informačních zdrojů, které jsou v práci citovány.

Souhlasím s veřejným půjčováním práce.

Brno 30. dubna 2013

.....

Radim Musil

Obsah

1 Úvod a cíle práce.....	8
2 Bentonit.....	9
2.1 Charakteristika bentonitu	9
2.2 Mineralogie bentonitu	9
2.3 Rozdělení bentonitu.....	11
2.4 Těžba bentonitu v ČR.....	11
2.5 Využití bentonitu.....	12
3 Geochemické procesy v bentonitu	13
3.1 Chemické reakce	13
3.2 Reakce ovlivňující (pufrující) pH	14
3.3 Reakce ovlivňující (pufrující) Eh.....	15
3.4 Difuze.....	15
4 Charakteristika podzemních vod na uvažovaných lokalitách hlubinných úložišť ČR.....	16
4.1 Štola Josef	16
4.2 Lokalita Čihadlo.....	16
4.3 Lokalita Hrádek.....	17
4.4 Lokalita Horka	17
4.5 Lokalita Kraví Hora	17
4.6 Lokalita Magdaléna.....	18
4.7 Lokalita Březový potok.....	18
5 Metodika	19
6 Výsledky a jejich diskuze.....	20
6.1 Charakteristika podzemní vody Josef	20
6.2 Vývoj fyzikálně-chemických parametrů	21
6.3 Koncentrace rozpuštěných látek ve vodě	23
6.4 Charakteristika rozpuštěných látek	28
7 Závěr	29
8 Použitá literatura	30
Přílohy	32

1 Úvod a cíle práce

V odvětvích, kde se pracuje s radioaktivními látkami, vznikají radioaktivní odpady. Tyto odpady nemají další využití. Hlavní otázkou je, kam radioaktivní odpady umístit, aby nemohly ohrožovat a negativně ovlivňovat životní prostředí. Nejrizikovějším radioaktivním odpadem je vysoce aktivní odpad vznikající z vyhořelého jaderného paliva. Nejvhodnějším místem pro jeho ukládání jsou hlubinná úložiště. Tato úložiště jsou založena na multibariérovém systému. První bariérou je přírodní geologické prostředí, druhou potom inženýrská bariéra, kterou představuje kontejner s odpadem a vícevrstevná bariéra s využitím bentonitů jako těsnících a sorpčních materiálů. Bentonit má za úkol vázat radioaktivní izotopy v případě poškození kontejneru s odpadem. V podmínkách úložiště bude docházet ke kontaktu bentonitů s podzemní vodou z okolních hornin. Složení podzemních vod tak může za určitých podmínek negativně ovlivňovat vlastnosti bentonitů vedoucí ke snížení jejich dlouhodobé stability.

Cílem bakalářské práce bylo vyhodnotit laboratorní experimenty, při kterých byly sledovány změny ve složení bentonitu a vodných roztoků, tyto změny byly interpretovány.

2 Bentonit

2.1 Charakteristika bentonitu

Bentonit je jílovitá reziduální nebo sedimentární hornina s mohutnou sorpční schopností, vysokou hodnotou výměny kationtů, bobtnání a plastičností. Hlavním minerálem tvořící bentonit je montmorillonit (65 -80%), případně jiné minerály ze skupiny smektitů (beidellit, montronit, hektorit, saponit aj.), dále potom kaolinit, illit (CEG, 2012).

Bentonit vznikl mechanickým a chemickým zvětráváním matečné horniny (v alkalickém prostředí), především sopečných tufů a tufitů, v menší míře i andezitů, ryolitů, čedičů a jiných třetihorních hornin. Bentonit je pojmenován podle ložiska v USA u Fort Bentonu, stát Wyoming (Koch, 2002).



Obr. 1 Bentonit (CEG, 2012)

2.2 Mineralogie bentonitu

Hlavním minerálem tvořící bentonit je montmorillonit – minerál ze skupiny smektitů. Jeho obsah u vysoce kvalitních bentonitů dosahuje až k 80%. Akcesorickými minerály bentonitu jsou živce, křemen, cristobalit, sádrovec, kalcit a pyrit. Akcesorické minerály mohou významně ovlivnit transport radionuklidů v případě, že dojde k poškození kanistru s radioaktivním odpadem (Karlund & Birgersson, 2006).

Smektity

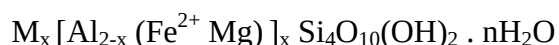
Skupina smektitů patří k fylosilikátům. Struktura smektitů se skládá ze dvou tetraedrických sítí uzavírajících jednu dioktaedrickou nebo trioktaedrickou síť. Vznik smektitu je spojen se zvětráváním bazických hornin. Důležitá je vysoká aktivita Si (OH)_4 , Mg^{2+} , Ca^{2+} a pH nad 6,5. Naopak je důležitá nízká aktivita K^+ a Al^{3+} , (při nižším pH než 6 vzniká vermikulit a poté kaolinit (Borchardt, 1989).

Montmorillonit

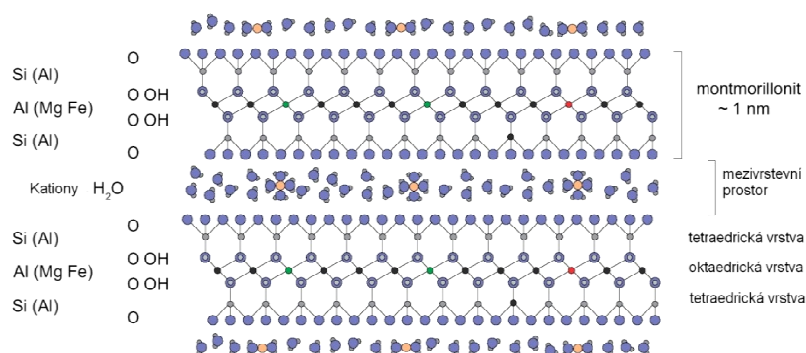
Montmorillonit je minerál, který je součástí skupiny smektitu. Je nositelem charakteristických vlastností bentonitu – velká sorpční schopnost, bobtnavost, vysoká plasticita. Montmorillonit je monoklinický, jemnozrnné agregáty jsou složeny ze submikroskopických nedokonalých destiček. Má bělavou, narůžovělou, žlutavou, šedou až hnědou barvu s bílým vrypem.

Montmorillonit vzniká především zvětráváním čedičových tufů, zvláště jejich sklovité fáze. Hojně se vyskytuje v serpentinitech, častý je v jílových horninách a jílovitých půdách (Čícel et al., 1981).

Jeho krystalochemický vzorec je:



x představuje náboj vrstvy. Může se měnit od 0,2 do 0,6. Montmorillonit má osobitou vlastnost, kterou je neexistence tetraedrického náboje. Celý náboj je soustředěný na oktaedrické síti, (Karlán & Birgersson, 2006).



Obr. 2 Dvě vrstvy montmorillonitu s mezivrstevními kationy a molekulami vody (podle Karlán & Birgersson, 2006, upraveno)



Obr. 3 Zemitý červenohnědý montmorillonit, velikost vzorku 8,5×5 cm, foto J. Jirásek, 2006.

Kaolinit

Kaolinit je hlavní složkou kaolinu, vznikajícího rozkladem silikátů bohatých na Al (zejména živců) v žulách a arkózách. Tvoří samostatná zvětralinová ložiska, kaolinické jíly nebo je složkou kaolinických pískovců a oolitických Fe – rud. V menší míře se vyskytuje v pegmatitech a na hydrotermálních ložiscích.

Ložiska kaolinu se vyskytují hlavně na Karlovarsku a v okolí Horní Břízy. Méně kvalitní u Kadaně, Nové Rokle, Znojma a Vidnavy (Číčel et al., 1981).

Illit

Illit je slída s technologickými vlastnostmi jílových minerálů. Illit je celistvý, extrémně jemnozrnný (částice menší než 0,001 mm). Illit je bílý nebo různě světle zbarvený. Vyskytuje se především v břidlicích a mnoha dalších sedimentárních horninách, je hlavní složkou mořských jílových usazenin. Illit je hydrotermálně alterovaný na rudných žilách.

V České republice se hojně nachází ve spodnokarbonských rulách Fe v Barrandienu, v permokarbonských sedimentech Verněřovic u Trutnova, v terciérních jílech chebské pánve (Číčel et al., 1981).

2.3 Rozdělení bentonitu

V praxi rozeznáváme dva druhy bentonitu – silně bobtnavé a méně bobtnavé.

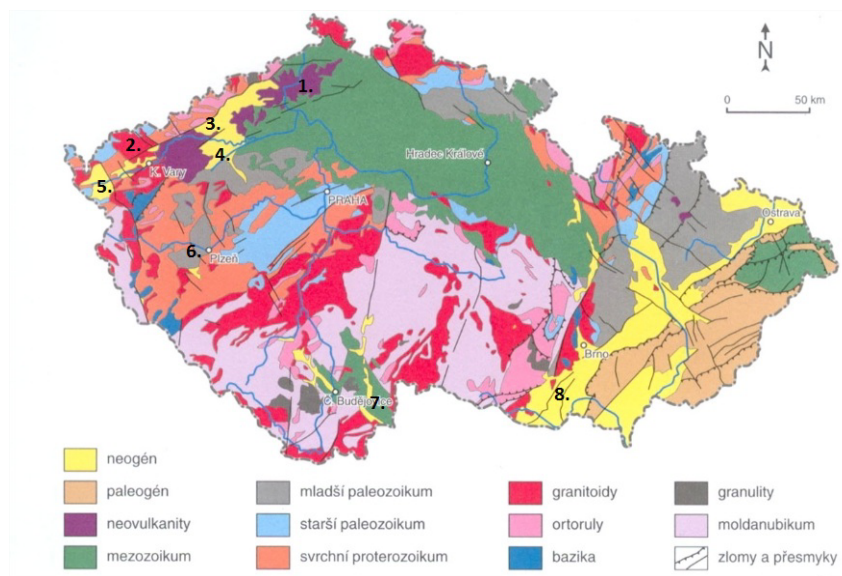
- Silně bobtnavé Na bentonity - wyomingský typ (podle ložiska v USA), výskyt pouze v USA, v České republice se Na bentonity nevyskytují (CEG, 2012).
- Méně bobtnavé - obsahující převážně draslík, vápník a hořčík. Obohacují se průmyslově sodíkem a dochází k aktivaci bobtnací schopnosti. Po této úpravě ale nedosahují kvalit Na bentonitů (CEG, 2012).

2.4 Těžba bentonitu v ČR

Česká republika se řadí mezi státy s velkými zásobami bentonitu. Bentonity v ČR jsou podobných vlastností, většinou se jedná o bentonity hořečnato-vápenaté, případně vápenato-hořečnaté. Bentonity sodné se v ČR nevyskytují, proto se musí zdejší bentonity sodíkem obohacovat tzv. aktivací. Bentonity se vyskytují převážně ve vulkanické oblasti severních Čech -

v Českém Středohoří a oblasti Doupovských hor (Kadaňsko, Podbořansko, Karlovarsko), dále pak v oblastech třetihorních pánví (Chebská, Plzeňská a Třeboňská pánev). Rozvoj těžby, úpravy a využití bentonitů v ČR nastal až koncem 50. let, zejména v souvislosti s jeho využitím ve slévárenství. Těžba kulminovala začátkem a koncem 80. let (CEG, 2012).

ČR vytěží ročně kolem 70 kt bentonitu, což činí přibližně 0,75 % světové produkce bentonitu. Producenty bentonitu v ČR jsou např. Keramost, a. s. (největší český producent bentonitů), Calofrig Borovany, a. s., Sedlecký kaolin, a. s. a další (CEG, 2012).



Obr. 4 Schématická geologická mapa území České republiky (podle Chlupáče et al., 2002, upraveno) Ložiska bentonitu v ČR

- | | |
|---------------------|-------------------------|
| 1. Český středohoří | 5. Chebská pánev |
| 2. Karlovarsko | 6. Plzeňská pánev |
| 3. Kadaňsko | 7. Třeboňská pánev |
| 4. Podbořansko | 8. Karpatská předhlubeň |

2.5 Využití bentonitu

Bentonit se využívá napříč všemi průmyslovými odvětvími. Bentonit patří mezi přírodní materiál, se kterým se do budoucna počítá jako s bariérou při budování hlubinných úložišť vyhořelého radioaktivního paliva. Například ve stavebnictví se bentonit používá jako těsnění (skládek, tunelů, přehrad a jiných vodních děl, dále při zlepšování zemin injektáží a ochraně spodních vod). Při čištění odpadních vod se využívá bentonitů jako sorbentu ropných nečistot, těžkých kovů, atd. (CEG, 2012). V posledních dvaceti letech se zkoumá možnost využití bentonitů jako účinné technické bariéry při ukládání radioaktivního odpadu, kde se bude bentonit aplikovat mezi kontejner s vyhořelým odpadem a horninu (CEG, 2012).

3 Geochemické procesy v bentonitu

Dlouhodobá chemická stabilita vodou nasyceného bentonitu je důležitý bezpečnostní požadavek pro likvidaci radioaktivních odpadů. Je důležité mít podrobné znalosti o složení bentonitu a jeho pórové vodě, protože tyto vlastnosti ovlivňují rozpustnost a sorpci radionuklidů a ovlivňují korozi ocelové nádoby obsahující odpad. Hornina bude reagovat s podzemní vodou, která získala svůj minerální obsah interakcí s okolními horninami, například s granity (příklad složení granitických vod v příloze 1) (Grauer, 1986).

Geochemie bentonitového zásypu v geologickém úložišti je ovlivněna řadou procesů, z nichž některé jsou zkoumány v laboratoři nebo v terénu. Klíčové otázky jsou chemická stabilita a pufrací kapacita bentonitu s ohledem na procesy, které mohou ovlivnit jeho acidobazické vlastnosti nebo redox vlastnosti (Grauer, 1986).

3.1 Chemické reakce

Rychlé chemické reakce

Jedná se o reverzibilní procesy, které rychle dosáhnou rovnováhy (v minutách, hodinách nebo dnech). Patří mezi ně např. komplexace v roztoku, na povrchu, rozpouštění / srážení akcesorických minerálů (uhličitany, oxidy, sírany) a rozpouštění rozpustných solí (např. NaCl) (Grauer 1993, Bradbury & Baeyens 1997).

Pomalé chemické reakce

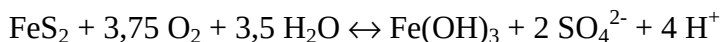
Jsou to kineticky řízené reakce, které jsou potenciálně relevantní pro chemismus pórové vody a vyznačují se velmi dlouhou dobou pro ustavení rovnováhy. Příkladem je rozpouštění a srážení silikátových minerálů. Tyto procesy nebudou mít nepříznivý vliv na dlouhodobou chemickou stabilitu bentonitu. Vzhledem k velké acidobazické a redoxní pufrací kapacitě bentonitu, chemické složení vody nebude významně ovlivněno menšími změnami v chemickém a mineralogickém složení bentonitu (Grauer, 1993).

Spojené acidobazické a redox reakce

U většiny oxidačně-redukčních reakcí se při změně valenčního stavu prvků zúčastňují protony. Oxidačně-redukční procesy určují nebo významně ovlivňují pH prostředí – není to tedy tak, jak se často předpokládá, že by byl průběh redox reakcí určen nebo ovlivňován pH prostředí, ale právě naopak. Změny pH, způsobené produkcí nebo spotřebováváním protonů, jsou tlumeny především karbonátovým systémem. Vzájemný vliv a propojení acidobazických a oxidačně-redukčních reakcí je možné demonstrovat na nejběžnějších acidobazických reakcích karbonátového systému (Bruno et al., 1999).

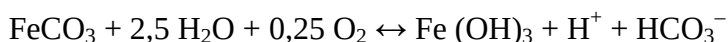
Redukční kapacita bentonitu má zásadní vliv na stabilitu úložiště. Redukční stav je kontrolován díky:

a) Oxidaci pyritu, která spotřebovává kyslík a produkuje Fe(III) a síranové aniony. Fe(III) se může srážet ve formě Fe(III) oxy-hydroxidů.



Pokud pyrit není v bentonitu přítomen, oxidace sulfidu na síranové aniony neprobíhá a oxidačně-redukční potenciál systému je pufován pomocí redoxního páru Fe(II)/Fe(III).

b) Rozpouštění sideritu/srážení amorfního oxy-hydroxidu Fe(III). Pokud karbonáty v bentonitu obsahují z velké části Fe(II), je rovnováha mezi Fe(II) z karbonátů a Fe(III) z oxy-hydroxidů hlavním kontrolním mechanismem redoxního stavu systému.



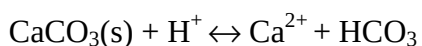
(Bruno et al., 1999)

Hlavní procesy ovlivňující chemickou stabilitu bentonitového systému jsou:

3.2 Reakce ovlivňující (pufrující) pH

Mezi reakce pufrující pH patří především srážení a rozpouštění kalcitu, iontová výměna, povrchově protonační reakce, srážení a rozpouštění sulfátů a zvětrávání montmorillonitu

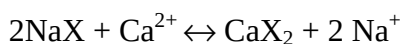
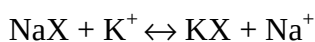
rozpouštění a srážení kalcitu



(Bruno et al., 1999)

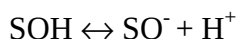
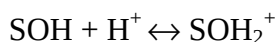
iontová výměna

Na iontovou výměnu má vliv parciální tlak, který je v různých částech odlišný



(Bruno et al., 1999)

povrchově protonační reakce



(Bruno et al., 1999)

Srážení a rozpouštění sulfátů

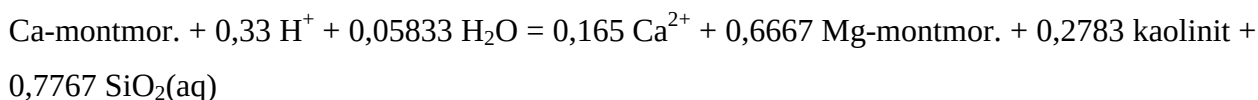
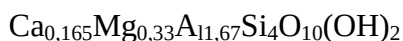
Srážení a rozpouštění sádrovce, popř. anhydritu



(Bruno et al., 1999)

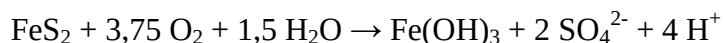
zvětrávání (rozpouštění) montmorillonitu

Ca-Montmorillonit



3.3 Reakce ovlivňující (pufrující) Eh

Reakce pufrující Eh jsou způsobeny především oxidací pyritu a dalších Fe(II) akcesorických minerálů obsažených v bentonitu



(Bruno et al., 1999)

3.4 Difuze

Difuze je dominantní transportní proces v bentonitu. Většina difúzních studií provedených na vzorcích kompaktního bentonitu, se zabývala transportem radionuklidů. Tyto výsledky naznačují velký rozsah zjevných difúzních koeficientů, vzhledem k silnému kolísání retardace (Sato et al., 1992; Choi & Oscarson, 1996).

4 Charakteristika podzemních vod na uvažovaných lokalitách hlubinných úložišť ČR

Na základě provedených geologických výzkumů jsou na jednotlivých lokalitách vymezována budoucí průzkumná území s potenciálně vhodnými vlastnostmi pro vybudování hlubinného úložiště a uvnitř těchto území jsou vymezeny plochy povrchového areálu (v některých případech ve variantách), kde byly zjištěny vhodné podmínky k napojení veškeré nutné technické infrastruktury pro potenciální hlubinné úložiště (SÚRAO, 2013).

4.1 Štola Josef

Lokalita, ze které byla použita podzemní voda jako sytící médium.

Typ kolektoru a jeho kvantitativní charakteristika

Kolektor s puklinovou propustností zvýrazněnou v přípovrchové zóně rozpojení hornin; hladina podzemní vody volná i napjatá. Z hornin jsou zastoupeny žuly a granodiority, žulové porfyry, metabazity jílovského pásma (Hazdrová et al., 1983).

Chemické složení podzemních vod

Mineralizace vod kolísá od 0,2 do 0,7 g/l s průměrnou mineralizací 0,316 g/l. Ve vymezeném území jsou zastoupeny vody hydrogenkarbonátové. Plošně nejrozšířenější jsou hlavně smíšené typy Ca – HCO₃ vod Alekinových typů II – IIIa (Hazdrová et al., 1983).

4.2 Lokalita Čihadlo

Typ kolektoru a jeho kvantitativní charakteristika

Puklinový kolektor hydrogeologického masivu moldanubika se zvýšenou propustností v přípovrchové zóně zvětralin. Z hornin jsou zastoupeny žuly včetně žilných leukokratních žul, granitoidy, křemenné diority, propustnost puklinová (Hazdrová, Krásný, 1975).

Chemické složení podzemních vod

Mělké podzemní vody krystalinika jsou podle O. A. Alekina převážně typu C^{Ca}_{II-IIIa} nebo S^{Ca}_{II-IIIa}. Na území krystalinika se vyskytují vody typu Ca-SO₄ s celkovou mineralizací < 0,3g/l (Hazdrová, Krásný, 1975).

4.3 Lokalita Hrádek

Typ kolektoru a jeho kvantitativní charakteristika

Jedná se o průlinový kolektor centrálního moldanubického a jihlavského masivu – různé typy žul včetně žilných leukokratních žul, granitoidy, křemenné diority, propustnost kolektoru je puklinová (Myslil, 1985).

Chemické složení podzemních vod

Na území se vyskytují vody typu Ca-SO₄ s celkovou mineralizací < 0,3g/l (Myslil, 1985).

4.4 Lokalita Horka

Typ kolektoru a jeho kvantitativní charakteristika

Jedná se o puklinový kolektor biotitického granodioritu s amfibolem až biotitického křemenného dioritu.

Chemické složení podzemních vod

Na území se vyskytují vody typu Ca-SO₄ smíšeného typu s celkovou mineralizací < 0,3 g/l. Na SZ okraji území se vyskytují podzemní vody typu Ca-HCO₃ základního typu s mineralizací < 0,3 g/l (Myslil, 1985).

4.5 Lokalita Kraví Hora

Typ kolektoru a jeho kvantitativní charakteristika

Jedná se o puklinový kolektor hydrogeologického masivu s proměnlivým podílem průlinové porozity v pásnu přípovrchového rozpukání a rozpojení hornin: pararuly, migmatitické ruly až migmatity s polohami hornin pestré skupiny moldanubika (Myslil et al., 1985).

Chemické složení podzemních vod

Chemismus podzemních vod v oblasti výskytu pararul moldanubika je charakterizován převládajícím kalcium-bikarbonátovým základním typem Gazdovy klasifikace. Podle klasifikace Alekina se nejvýznamněji uplatňuje typ C^{Ca}_{II-IIIa}. Celková mineralizace je velmi nízká. Pestřejším chemismem podzemních vod se vyznačuje okrajová zóna migmatitizovaných pararul, charakterizovaná převahou kalcium-síranové složky. Území, ve kterém jsou významně zastoupeny amfibolity, granulity, popř. serpentinity, je charakterizováno naprosto převládajícím kalcium-bikarbonátovým typem chemismu podzemních vod Gazdovy klasifikace, převážně C^{Ca}_{II-IIIa} (Myslil et al., 1985).

4.6 Lokalita Magdaléna

Typ kolektoru a jeho kvantitativní charakteristika

Jedná se o kolektor s puklinovou propustností. Z hornin jsou zastoupeny žuly až granodiority, syenity, křemenné diority a žulové a granodioritové porfyry, syenodiority, příp. až křemenné gabrodiority středočeského a z části moldanubického plutonu (Hazdrová, Krásný, 1975).

Chemické složení podzemních vod

Na území se vyskytují podzemní vody typu $\text{Ca-HCO}_3 \text{ C}^{\text{Ca}}_{\text{II,IIIa}}$ základního typu s celkovou mineralizací $< 0,3 \text{ g/l}$ (Hazdrová, Krásný, 1975).

4.7 Lokalita Březový potok

Typ kolektoru a jeho kvantitativní charakteristika

Jedná se o puklinový kolektor přípovrchové zóny rozpojených a rozpukaných granitoidů typu červenského. Z hornin je zastoupen biotitický až amfibolicko biotitický granodiorit – blatenský typ, dále žilné vyvřeliny bazické (Myslil, 1985).

Chemické složení podzemních vod

Na území tvořeném moldanubickými paraskupinami místy s tělesy intruzív je v zóně přípovrchového rozpojení hornin časté střídání hydrochemických typů Ca-SO_4 a Ca-HCO_3 od základních typů, přes přechodné až po smíšené typy. U vod s převahou iontů Ca a HCO_3 převládá typ základní, u vod s převahou iontů Ca a SO_4 jde často o typy smíšené. Celková mineralizace je většinou nízká. Sulfátové vody se vyskytují především na vyvýšených územích, což odpovídá přítomnosti v nejsvrchnější části profilu, zatímco hydrogenuhličitanové vody převládají v nižších polohách a jsou charakteristické pro hlubší oběh podzemní vody (Myslil, 1985).

5 Metodika

Jako substrát byl použit bentonit B75 (sušený a mletý přírodní vápenato-hořečnatý bentonit pocházející ze severočeských těžebních lokalit) od firmy Keramost a.s. Bentonit byl sycen dvěma médii. Prvním z nich byla destilovaná voda, druhým potom přírodní podzemní voda ze štol Josefa. Bentonit B75 byl smíchán s destilovanou vodou a vodou Josefa v poměru 1:15. Objem bentonitu činil 100g, objem vody byl 1500 ml. Směs byla promíchána po dobu cca 5 minut, zakryta fólií, vložena do sušicí trouby (Binder) a ohřívána na 90°C. Nasycený substrát byl ve skleněných kádinkách.

Měření

V časovém intervalu 14, 28, 42, 56, 84 dní bylo provedeno měření fyzikálně chemických parametrů pH, Eh, konduktivity, TDS (Total Dissolved Solids), T (pH metr Denver 215, měřicí přístroj multi 350i, Electrode SenTix ORP, pH-Electrode SenTix 41, TetraCon® 325 - WTW). Současně došlo k odebírání vody pro analýzy koncentrací iontů. Minimální objem vody potřebný pro analýzy byl 200 – 250 ml. Byla odebrána voda nad bentonitem, pórová voda bentonitu – nasycený bentonit promíchán, odebrán pro centrifugaci a vložen do centrifugy (UNIMED C2 series). Doba centrifugace byla 15 min, velikost otáček 15000 za minutu.

Analýza koncentrací látek ve vodě

Koncentrace K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Al^{3+} , Fe byla analyzována metodou AAS, $SiO_2(aq)$ fotometricky, SO_4^{2-} vážkově, HCO_3^- , CO_3^{2-} - titračně, Cl^- - titračně.

6 Výsledky a jejich diskuze

6.1 Charakteristika podzemní vody Josef

Podzemní voda ze štol Josef je mírně alkalická. Největší koncentrace mezi kationty dosahuje Ca^{2+} , dále Na^+ a SiO_2 . Naopak nejmenší je koncentrace K^+ , Fe a Al. Největší koncentrace mezi anionty dosahuje HCO_3^- a SO_4^{2-} . Podstatně menší je koncentrace Cl^- a CO_3^{2-} . Podle převládajících iontů jde o typ Ca- HCO_3 vod.

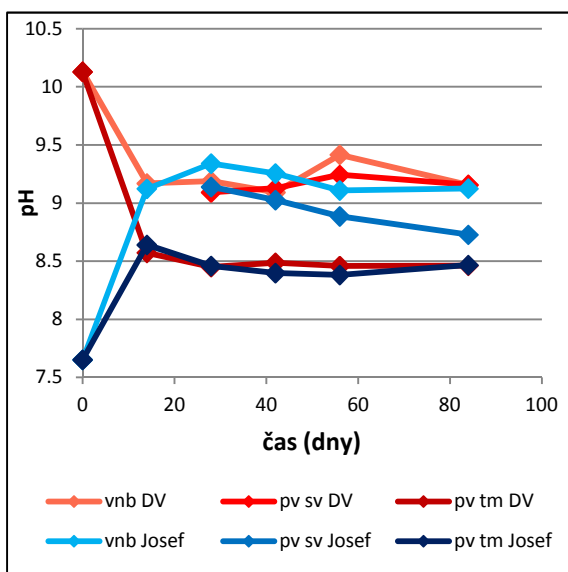
Tabulka 1: Fyzikálně-chemické parametry a koncentrace rozpuštěných složek ve vodě Josef

Voda Josef	
pH	7.65
Eh	301.58 (mV)
Konduktivita	785 (uS/cm)
TDS	784 (mg/l)
Na^+	37.04 (mg/l)
K^+	1.46 (mg/l)
Ca^{2+}	69.92 (mg/l)
Mg^{2+}	12.81 (mg/l)
Cl^-	19.71 (mg/l)
SiO_2	16.41 (mg/l)
SO_4^{2-}	106.20 (mg/l)
CO_3^{2-}	7.29 (mg/l)
HCO_3^-	362.7 (mg/l)
Fe	0 (mg/l)
Al	0 (mg/l)

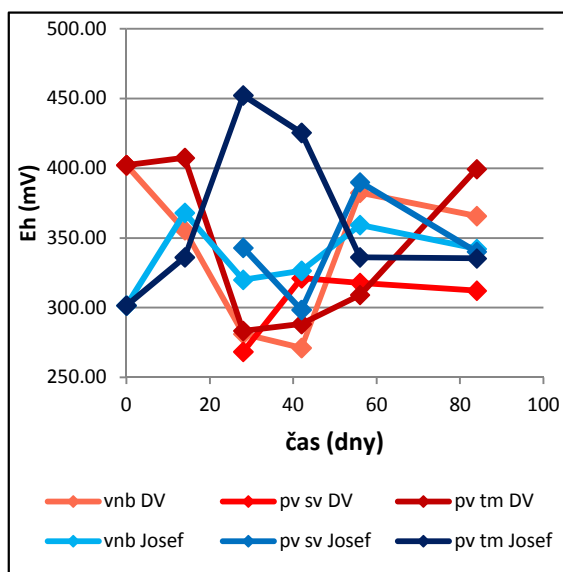
Po vložení směsi bentonitu spolu se sytícím médiem (destilovanou vodou, vodou Josef) do sušící trouby a ohříváním na 90°C došlo k vytvoření vrstev (viz příloha 2). Ve skleněných kádinkách se po 14 dnech vytvořila vrstva čiré vody nad bentonitem a vrstva vodou nasyceného bentonitu. V průběhu dalších 14 dnů se vytvořila vrstva vody nad bentonitem, vrchní světlá vrstva a spodní tmavá vrstva vodou nasyceného bentonitu. Tyto dvě vrstvy se liší zejména svými fyzikálně-chemickými parametry. Rozdíly jsou patrné zejména v pH, kdy světlejší vrstva a voda nad bentonitem dosahuje vyšší alkality než spodní tmavá vrstva. U konduktivity a TDS dosahuje vyšších hodnot spodní tmavá vrstva.

Z důvodu nedostatečného množství vody potřebné pro analýzy nebylo možné stanovit koncentrace některých složek ve všech vrstvách.

6.2 Vývoj fyzikálně-chemických parametrů



Obr. 5 Vývoj pH v závislosti na čase ve vodě nad bentonitem (vnb), pórové vodě světlé vrstvy bentonitu (pv sv) a pórové vodě tmavé vrstvy bentonitu (pv tm).



Obr. 6 Vývoj Eh v závislosti na čase ve vodě nad bentonitem (vnb), pórové vodě světlé vrstvy bentonitu (pv sv) a pórové vodě tmavé vrstvy bentonitu (pv tm).

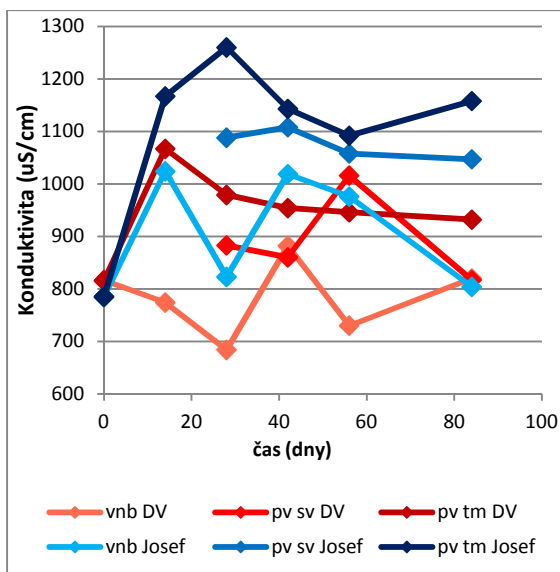
pH

pH (obr. 5) ve směsi bentonitu s původně destilovanou vodou od počátečního stavu klesá a po 14 dnech kolísá. Nejvyšší hodnoty pH byly zaznamenány ve vodě nad bentonitem, nejnižší v pórové vodě tmavé spodní vrstvy bentonitu. pH ve směsi bentonitu s vodou Josef od počátečního stavu roste a po 14 dnech mírně kolísá. Nejvyšší hodnota je ve vodě nad bentonitem, nižší v pórové vodě. Po 14 dnech kolísají hodnoty pH ve směsi bentonitu s původně destilovanou vodou a směsi bentonitu s vodou Josef v podobných hodnotách.

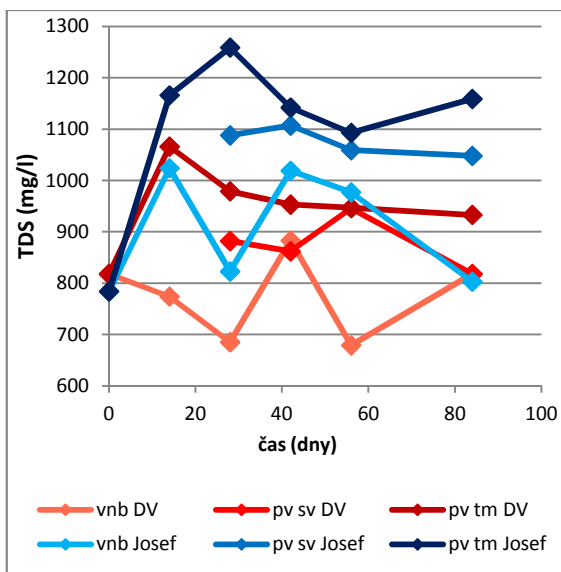
Na základě pH se jedná o alkalické prostředí.

Eh

Eh (obr. 6) od počátečního stavu kolísá. Největších výkyvů dosahuje od 14. do 56. dne. Ve směsi bentonitu s původně destilovanou vodou nejprve klesá, poté roste. Ve směsi bentonitu s vodou Josef nejprve roste, poté klesá a kolísá. Na základě hodnot Eh se jedná o oxidační prostředí.



Obr. 7 Vývoj konduktivity v závislosti na čase ve vodě nad bentonitem (vnb), pórové vodě světlé vrstvy bentonitu (pv sv) a pórové vodě tmavé vrstvy bentonitu (pv tm).



Obr. 8 Vývoj TDS v závislosti na čase ve vodě nad bentonitem (vnb), pórové vodě světlé vrstvy bentonitu (pv sv) a pórové vodě tmavé vrstvy bentonitu (pv tm).

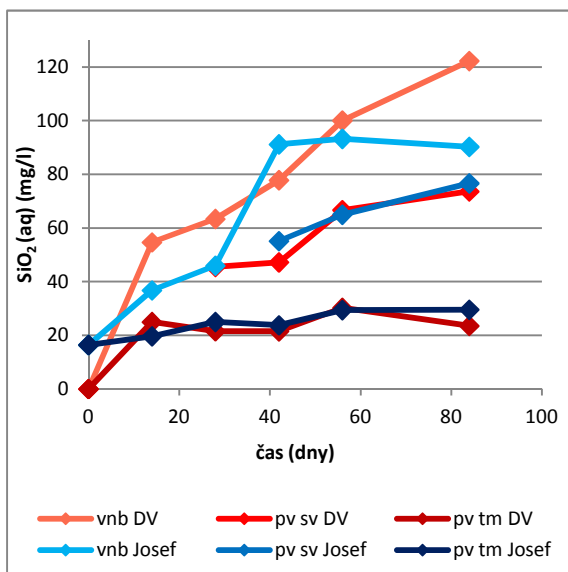
Konduktivita

Konduktivita (obr. 7) ve směsi bentonitu s původně destilovanou vodou od počátečního stavu kolísala. Ve vodě nad bentonitem dosahovala nejnižších hodnot. V pórové vodě tmavé spodní vrstvy bentonitu nejprve rostla, poté mírně klesala. Konduktivita ve směsi bentonitu s vodou Josef od počátečního stavu narůstala, pouze ve vodě nad bentonitem od počátečního stavu kolísala. Ve směsi bentonitu s vodou Josef byla konduktivita vyšší než ve směsi bentonitu s původně destilovanou vodou.

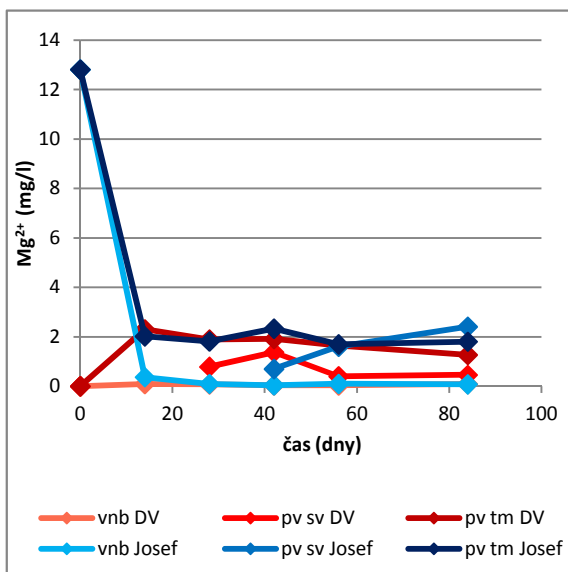
TDS

TDS (obr. 8) ve směsi bentonitu s původně destilovanou vodou od počátečního stavu kolísala. Ve vodě nad bentonitem dosahovala nejnižších hodnot. V pórové vodě tmavé vrstvy bentonitu nejprve rostla, poté mírně klesala a dosahovala vyšších hodnot než voda nad bentonitem. TDS ve směsi bentonitu s vodou Josef od počátečního stavu narůstala, pouze ve vodě nad bentonitem od počátečního stavu kolísala. Ve směsi bentonitu s vodou Josef bylo TDS vyšší než ve směsi bentonitu s původně destilovanou vodou.

6.3 Koncentrace rozpuštěných látek ve vodě



Obr. 9 Koncentrace SiO₂ (aq) (mg/l) v závislosti na čase ve vodě nad bentonitem (vnb), pórové vodě světlé vrstvy bentonitu (pv sv) a pórové vodě tmavé vrstvy bentonitu (pv tm).



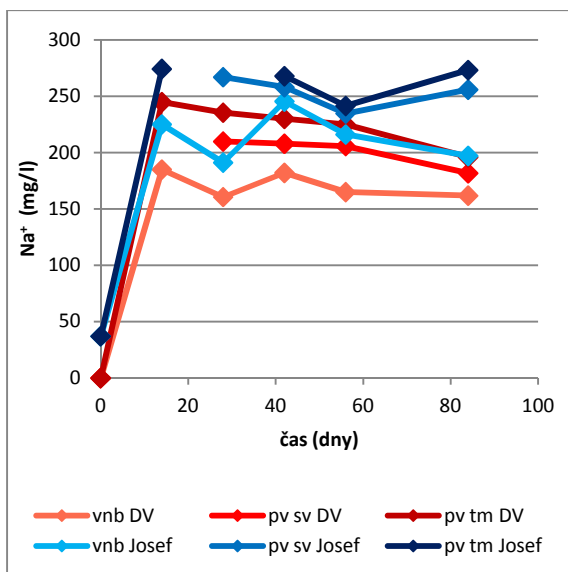
Obr. 10 Koncentrace Mg²⁺ (mg/l) v závislosti na čase ve vodě nad bentonitem (vnb), pórové vodě světlé vrstvy bentonitu (pv sv) a pórové vodě tmavé vrstvy bentonitu (pv tm).

SiO₂ (aq)

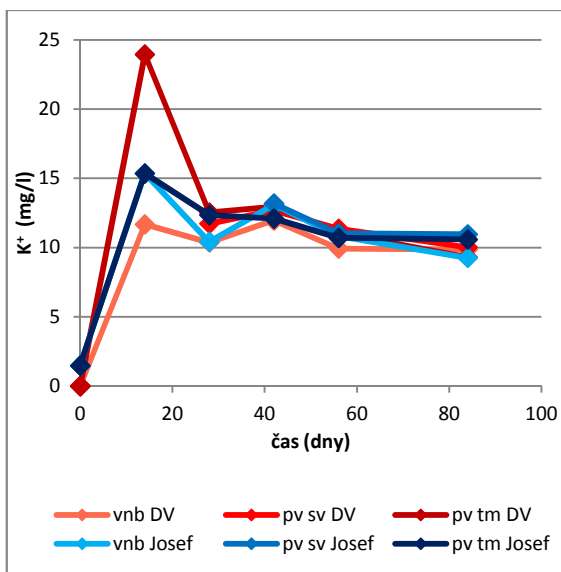
Koncentrace SiO₂ (aq) (obr. 9) ve směsi bentonitu s původně destilovanou vodou od počátečního stavu rostla. Ve směsi bentonitu s vodou Josef koncentrace SiO₂ rostla. Nejvyšší hodnoty byly zaznamenány ve vodě nad bentonitem, nejnižší v pórové vodě tmavé spodní vrstvy bentonitu. S výjimkou vody nad bentonitem, byly ve směsi bentonitu s vodou Josef zaznamenány vyšší koncentrace SiO₂ než ve směsi bentonitu s původně destilovanou vodou.

Mg²⁺

Koncentrace Mg²⁺ (obr. 10) ve směsi bentonitu s původně destilovanou vodou od počátečního stavu mírně rostla, naopak ve směsi bentonitu s vodou Josef od počátečního stavu prudce klesla a po 14 dnech se ustálila. Nejvyšší hodnoty byly zaznamenány v pórové vodě tmavé spodní vrstvy bentonitu, nejnižší ve vodě nad bentonitem. V obou systémech se po 14 dnech pohybovaly koncentrace Mg²⁺ v rozmezí 0 – 2,4 mg/l.



Obr. 11 Koncentrace Na^+ (mg/l) v závislosti na čase ve vodě nad bentonitem (vnb), pórové vodě světlé vrstvy bentonitu (pv sv) a pórové vodě tmavé vrstvy bentonitu (pv tm).



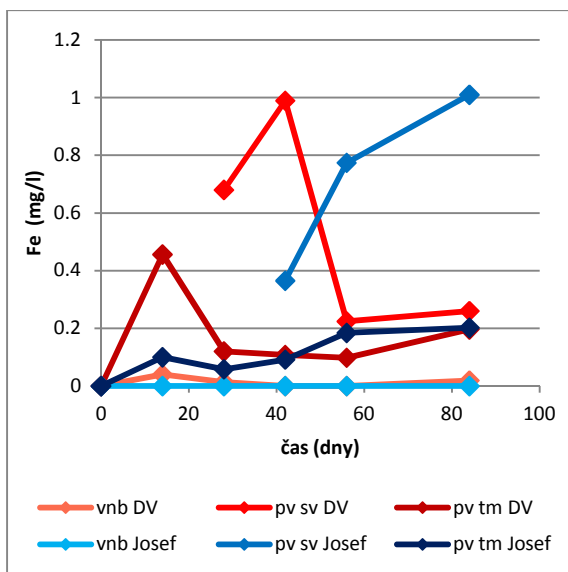
Obr. 12 Koncentrace K^+ (mg/l) v závislosti na čase ve vodě nad bentonitem (vnb), pórové vodě světlé vrstvy bentonitu (pv sv) a pórové vodě tmavé vrstvy bentonitu (pv tm).

Na⁺

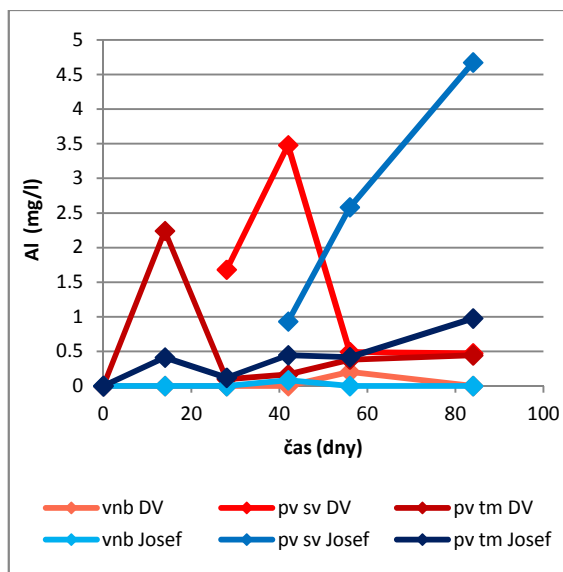
Koncentrace Na^+ (obr. 11) od počátečního stavu rostla. Ve vodě nad bentonitem byly koncentrace nižší než v pórové vodě. Koncentrace dosahovaly vyšších hodnot ve směsi bentonitu s vodou Josef než ve směsi bentonitu s původně destilovanou vodou.

K⁺

Koncentrace K^+ (obr. 12) od počátečního stavu rostla, potom klesala a mírně kolísala. Ve směsi bentonitu s původně destilovanou vodou, v pórové vodě tmavé spodní vrstvy bentonitu nejprve strmě rostla, poté po 14 dnech pozvolna klesla k průměrným hodnotám okolo 10 – 11 mg/l. Ve vodě nad bentonitem a pórové vodě světlé spodní vrstvy bentonitu postupně narůstala a následně mírně kolísala. Ve směsi bentonitu s vodou Josef a bentonitu s původně destilovanou vodou se po 14 dnech pohybovaly koncentrace K^+ v rozmezí 10 – 15 mg/l a vykazovaly mírný pokles.



Obr. 13 Koncentrace Fe (mg/l) v závislosti na čase ve vodě nad bentonitem (vnb), pórové vodě světlé vrstvy bentonitu (pv sv) a pórové vodě tmavé vrstvy bentonitu (pv tm).



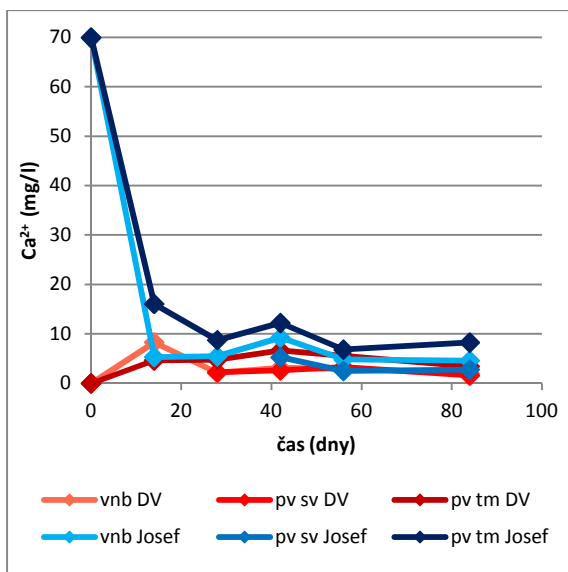
Obr. 14 Koncentrace Al (mg/l) v závislosti na čase ve vodě nad bentonitem (vnb), pórové vodě světlé vrstvy bentonitu (pv sv) a pórové vodě tmavé vrstvy bentonitu (pv tm).

Fe

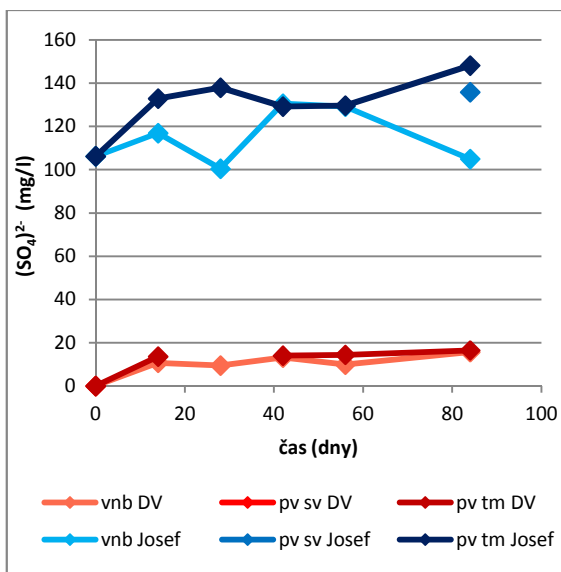
Koncentrace Fe (obr. 13) od počátečního stavu rostla a kolísala. Ve směsi bentonitu s původně destilovanou vodou se ve vodě nad bentonitem od počátečního stavu téměř nezměnila. V pórové vodě světlé spodní vrstvy bentonitu nejprve rostla, poté klesala k hodnotám okolo 0,1 - 0,2 mg/l. V pórové vodě tmavé spodní vrstvy bentonitu koncentrace nejprve rostla, poté klesala. Ve směsi bentonitu s vodou Josef se koncentrace Fe ve vodě nad bentonitem neměnila. V pórové vodě světlé spodní vrstvy bentonitu narůstala a v pórové vodě tmavé spodní vrstvy bentonitu mírně narostla. Oba systémy dosahovaly přibližně stejných hodnot koncentrací Fe.

Al

Koncentrace Al (obr. 14) od počátečního stavu kolísala. Ve vodě nad bentonitem se však koncentrace neměnila, vyjma mírného nárůstu od 56. dne, poté opět klesla na nulovou. V pórové vodě světlé spodní vrstvy nejprve narůstala, poté od 42. dne klesala k průměrným hodnotám 0,5 mg/l. V pórové vodě tmavé spodní vrstvy bentonitu koncentrace nejprve narůstala, poté klesala. Pouze ve směsi bentonitu s vodou Josef, ve spodní světlé vrstvě koncentrace rostla.



Obr. 15 Koncentrace Ca^{2+} (mg/l) v závislosti na čase ve vodě nad bentonitem (vnb), pórové vodě světlé vrstvy bentonitu (pv sv) a pórové vodě tmavé vrstvy bentonitu (pv tm).



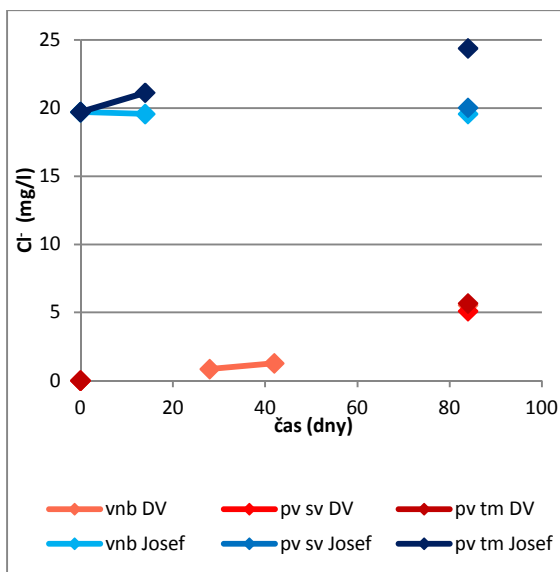
Obr. 16 Koncentrace SO_4^{2-} (mg/l) v závislosti na čase ve vodě nad bentonitem (vnb), pórové vodě světlé vrstvy bentonitu (pv sv) a pórové vodě tmavé vrstvy bentonitu (pv tm).

Ca^{2+}

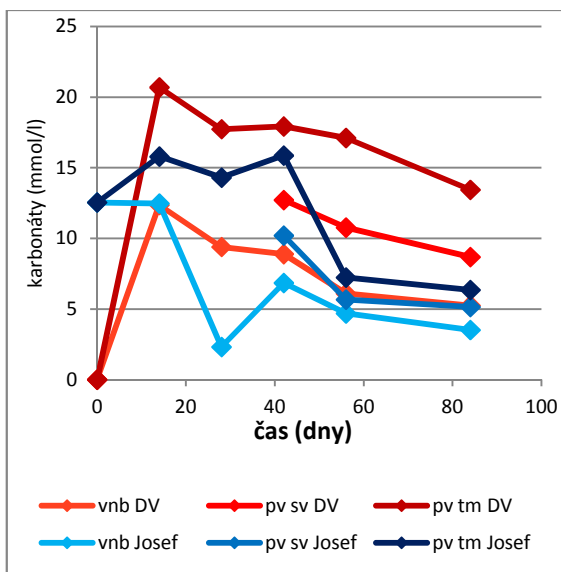
Koncentrace Ca^{2+} (obr. 15) ve směsi bentonitu s původně destilovanou vodou od počátečního stavu kolísala. Ve směsi bentonitu s vodou Josef od počátečního stavu prudce klesala a po 14 dnech kolísala. Ve směsi bentonitu s vodou Josef byly koncentrace mírně vyšší než ve směsi bentonitu s původně destilovanou vodou.

SO_4^{2-}

Koncentrace SO_4^{2-} (obr. 16) od počátečního stavu rostla. Ve vodě nad bentonitem dosahovaly nižších hodnot, ve směsi bentonitu s původně destilovanou vodou byly ale koncentrace ve vodě nad bentonitem a v pórové vodě téměř stejné. Celkově byly koncentrace ve směsi bentonitu s vodou Josef podstatně vyšší než ve směsi bentonitu s původně destilovanou vodou.



Obr. 17 Koncentrace Cl^- (mg/l) v závislosti na čase ve vodě nad bentonitem (vnb), pórové vodě světlé vrstvy bentonitu (pv sv) a pórové vodě tmavé vrstvy bentonitu (pv tm).



Obr. 18 Koncentrace rozpuštěných karbonátových látek (mmol/l) v závislosti na čase ve vodě nad bentonitem (vnb), pórové vodě světlé vrstvy bentonitu (pv sv) a pórové vodě tmavé vrstvy bentonitu (pv tm).

Cl^-

Koncentrace Cl^- (obr. 17) od počátečního stavu mírně narůstala. Hodnoty ve vodě nad bentonitem byly nižší než v pórové vodě. Ve směsi bentonitu s vodou Josef dosahovaly koncentrace Cl^- mnohem vyšších hodnot než ve směsi bentonitu s původně destilovanou vodou.

Koncentrace rozpuštěných karbonátových látek

Koncentrace rozpuštěných karbonátových látek (obr. 18) ve směsi bentonitu s původně destilovanou vodou od počátečního stavu nejprve rostou, po 14 dnech klesají. Koncentrace ve směsi bentonitu s vodou Josef od počátečního stavu klesají. Celkově jsou vyšší koncentrace v pórové vodě než ve vodě nad bentonitem. Ve směsi bentonitu s původně destilovanou vodou dosahují koncentrace vyšších hodnot než ve směsi bentonitu s vodou Josef.

6.4 Charakteristika rozpuštěných látek

Kationty

Nejvyšších hodnot dosahovaly koncentrace Na^+ , mírně vyšší byly ve směsi bentonitu s vodou Josef než ve směsi bentonitu s původně destilovanou vodou. Po interakci bentonitu se sytícím médiem (destilovaná voda, voda Josef) byly koncentrace Na^+ vyšší než v původní vodě. Druhé nejvyšší hodnoty dosahoval SiO_2 . Po interakci bentonitu se sytícím médiem byly koncentrace SiO_2 vyšší než v původní vodě. Třetí nejvyšší hodnoty dosahovaly koncentrace K^+ . Po interakci bentonitu se sytícím médiem byly koncentrace K^+ vyšší než v původní vodě. O něco menších koncentrací než K^+ dosahovaly hodnoty koncentrace Ca^{2+} . Po interakci bentonitu s původně destilovanou vodou byly koncentrace mírně vyšší než v původní vodě. Po interakci bentonitu s vodou Josef byly koncentrace Ca^{2+} o 50 – 60 mg/l nižší než v původní vodě Josef. Podstatně menší hodnoty byly Mg^{2+} , kdy podobně jako u Ca^{2+} byly po interakci bentonitu s původně destilovanou vodou koncentrace mírně vyšší než v původní vodě a po interakci bentonitu s vodou Josef byly koncentrace Mg^{2+} o 10 mg/l nižší než v původní vodě Josef. Koncentrace Fe a Al byla nejmenší.

Anionty

Mezi anionty dosahovaly nejvyšších hodnot koncentrace SO_4^{2-} , přičemž ve směsi bentonitu s vodou Josef byly vyšší než ve směsi bentonitu s destilovanou vodou. Po interakci bentonitu se sytícími médii (destilovaná voda, voda Josef) byly hodnoty SO_4^{2-} vyšší než v původní vodě. Menších hodnot dosahoval Cl^- . Po interakci bentonitu se sytícími médii (destilovaná voda, voda Josef) byly hodnoty Cl^- vyšší než v původní vodě.

Koncentrace rozpuštěných karbonátových látek (HCO_3^- , CO_3^{2-}) dosahovaly vyšších hodnot ve směsi bentonitu s původně destilovanou vodou než ve směsi bentonitu s vodou Josef. Nejvyšší maxima byly zaznamenány po 14 dnech, poté hodnoty kolísaly a postupně klesaly. Po interakci bentonitu s původně destilovanou vodou byly koncentrace vyšší než v destilované vodě, naopak po interakci bentonitu s vodou Josef byly koncentrace karbonátových látek nižší než ve vodě Josef.

Na základě vyhodnocení dat z laboratorních analýz bylo zjištěno, že pro vývoj složení vody je rozhodující substrát (bentonit). Složení původní vody neovlivňuje složení vody v systému bentonit-voda po jejich vzájemné interakci. Složení vod se přizpůsobí substrátu a výsledné složení vod je určeno substrátem.

7 Závěr

Vrstvy bentonitu se liší zejména svými fyzikálně-chemickými parametry. Rozdíly vidíme v pH, kdy spodní světlá vrstva bentonitu a voda nad bentonitem mají alkaličtější charakter než spodní tmavá vrstva bentonitu. Na základě naměřených hodnot pH se jedná o alkalické prostředí. U konduktivity a TDS dosahuje vyšších hodnot pórová voda bentonitu než voda nad bentonitem.

Mezi kationty dosahovaly nejvyšších hodnot koncentrace Na^+ , mírně vyšší byly ve směsi bentonitu s vodou Josef než ve směsi bentonitu s původně destilovanou vodou. V obou případech byly koncentrace nižší ve vodě nad bentonitem, než v pórové vodě. Druhé nejvyšší hodnoty dosahoval SiO_2 . Ve vodě nad bentonitem byly zaznamenány vyšší koncentrace SiO_2 než v pórové vodě. Třetí nejvyšší hodnoty dosahovaly koncentrace K^+ . O něco menších koncentrací než K^+ dosahovaly hodnoty Ca^{2+} . Podstatně menší hodnoty byly Mg^{2+} , Fe a Al, jejichž koncentrace byly nejmenší. U Mg^{2+} , Fe a Al byly ve vodě nad bentonitem nižší hodnoty koncentrací než v pórové vodě.

Mezi anionty dosahovaly nejvyšších hodnot koncentrace SO_4^{2-} , přičemž ve směsi bentonitu s vodou Josef byly vyšší než ve směsi bentonitu s původně destilovanou vodou. Menších hodnot dosahoval Cl^- , ve směsi bentonitu s vodou Josef dosahovaly koncentrace vyšších hodnot než ve směsi bentonitu s původně destilovanou vodou.

Koncentrace rozpuštěných karbonátových látek (HCO_3^- , CO_3^{2-}) dosahovaly vyšších hodnot ve směsi bentonitu s původně destilovanou vodou než ve směsi bentonitu s vodou Josef. Nejvyšší maxima byly zaznamenány po 14 dnech, poté hodnoty kolísaly a postupně klesaly.

S výjimkou SiO_2 jsou koncentrace rozpuštěných látek v pórové vodě víceméně vyšší než ve vodě nad bentonitem. Na základě analýz koncentrací a vývoje koncentrací látek v čase lze říct, že složení vod nemá výrazný podíl na změny koncentrací rozpuštěných látek ve vodných roztocích. Více, než chemické složení vod, má vliv na složení pórové vody bentonitů samotný bentonit. Složení vod se přizpůsobí substrátu (bentonit) a výsledné složení vod je určeno substrátem. Bentonit tedy ovlivňuje složení vody, složení vod neovlivňuje složení bentonitu.

8 Použitá literatura

- Borchardt, G. (1989) Smectites: in Minerals in Soil Environments: 2nd ed., J. B. Dixon and S. B. Weed, eds., Soil Sci. Soc. Am., Madison, Wisconsin, 675-727.
- Bradbury, M. H. - Baeyens, B. (1997): A mechanistic description of Ni and Zn sorption on Na-montmorillonite. Part II: modelling. J. Contam. Hydrol. 27, 223-248.
- Bruno J. - Acros D. - Duro L. (1999): Processes and features affecting the near field hydrochemistry. Groundwater – bentonite interaction. SKB TR 99-29, 47 pp. Stockholm
- Bruno, J. - Arcos, D. - Duro, L. (1999): Processes and features affecting the near field hydrochemistry. Groundwater-bentonite interaction. SKB Technical Report TR-99-29, SKB, Stockholm, Sweden.
- Čícel, Blahoslav - Ivan Novák & Ivan Horváth. (1981): Mineralógia a kryštalochémia ílov. Vyd. 1. Bratislava: Veda, 257 s.
- Chlupáč I. - Brzobohatý R. - Kovanda J. - Stráník Z. (2002): Geologická minulost České republiky. – Academia. Praha
- Jirásek, J. - Sivek, M.: Ložiska nerostů. Ostrava: Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy ČR & Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2007.
- Karnland O. & Birgersson M. (2006): Montmorillonite stability. With special respect to KBS-3 conditions.- SKB TR 06-11, 38 pp. Stockholm
- Koch D. (2002): Bentonites as a basic material for technical base liners and site encapsulation cut-off walls.- Appl. Clay Sci., 21, pp. 1-11
- Kužvart M. (1983): Ložiska nerudných surovin, Univerzita Karlova, Praha
- Choi, J.W. - Oscarson, D.W. (1996): Diffusive transport through compacted Na- and Ca-bentonite. J. Contam. Hydrol. 22, 189-202.
- Grauer, R. (1986): Bentonit als Verfüllmaterial im Endlager für hochaktiven Abfall: Chemische Aspekte. EIR Report 576, Würenlingen, Switzerland, 179 p.
- Grauer, R. (1993): Zum Verhalten der technischen Barrieren in einem Endlager für hochaktiven Abfall. Internal Technical Note AN-44-93-04, Waste Management Laboratory, Paul Scherrer Institut, Villigen, Switzerland.
- Sato, H. - Ashida, T. - Kohara, Y. - Yui, M. - Sasaki, N. (1992): Effect of dry density on diffusion of some radionuclides in compacted sodium bentonite. J. Nucl. Sci. Techn., 29, 873-882.
- Gazda S. (1971): Modifikácia Palmerovho klasifikačného systému. – Hydrogeol. Ročen., 1969-1970. Praha-Brno.

Hazdrová M. – Krásný J. (1983): Vysvětlivky k základní hydrogeologické mapě ČSSR 1:200000. List Praha 12. Praha. - ÚÚG. Praha.

Hazdrová M. – Krásný J. (1975): Vysvětlivky k základní hydrogeologické mapě ČSSR 1:200 000 list 22 Strakonice. – MS archiv Ústř. úst. geol. Praha

Myslil, V. – Dvořák, J. – Holánek, J. – Kněžek, M. – Michlíček, E. – Sukovitá, D. – Šebesta, J. – Štefek J. – Taraba, I. – Trefná, E. (1985): Vysvětlivky k základní hydrogeologické mapě ČSSR 1: 200 000 list 24 Brno — ÚÚG Praha

Myslil V. (1985): Vysvětlivky k základní hydrogeologické mapě ČSSR: 1:200 000 list 23 Jihlava. - MS archiv Ústř. úst. geol. Praha

Správa úložišť radioaktivních odpadů (SÚRAO), Praha (2013): Úložiště radioaktivních odpadů, dostupné z: <http://www.surao.cz/cze/Uloziste-radioaktivnich-odpadu/Budouci-hlubinne-uloziste/Zvazovane-lokality>, 10. 1. 2013

Centrum experimentální geotechniky (CEG) ČVUT, Stavební fakulta (2012): Bentonit. Dostupné z: <http://ceg.fsv.cvut.cz/vyzkum/bentonit>, 3.12.2012

Přílohy

Příloha 1: Příklad složení granitických podzemních vod, data v mol/dm³ (Bruno et al., 1999).

Component	Gideå	Finnsjön	Äspö
Na	$4.57 \cdot 10^{-3}$	$1.20 \cdot 10^{-2}$	$9.13 \cdot 10^{-2}$
K	$5.13 \cdot 10^{-5}$	$5.13 \cdot 10^{-5}$	$2.05 \cdot 10^{-4}$
Ca	$5.25 \cdot 10^{-4}$	$3.55 \cdot 10^{-3}$	$4.73 \cdot 10^{-2}$
Mg	$4.11 \cdot 10^{-5}$	$6.99 \cdot 10^{-4}$	$1.73 \cdot 10^{-3}$
Fe	$8.95 \cdot 10^{-7}$	$3.22 \cdot 10^{-5}$	$4.30 \cdot 10^{-6}$
Mn	$1.82 \cdot 10^{-7}$	$2.37 \cdot 10^{-6}$	$5.28 \cdot 10^{-6}$
H ₄ SiO ₄	$1.67 \cdot 10^{-4}$	$1.99 \cdot 10^{-4}$	$1.46 \cdot 10^{-4}$
HCO ₃ ⁻	$2.95 \cdot 10^{-4}$	$4.56 \cdot 10^{-3}$	$1.64 \cdot 10^{-4}$
F ⁻	$1.68 \cdot 10^{-4}$	$7.89 \cdot 10^{-5}$	$7.89 \cdot 10^{-5}$
Cl ⁻	$5.01 \cdot 10^{-3}$	$1.56 \cdot 10^{-2}$	$1.81 \cdot 10^{-1}$
SO ₄ ²⁻	$1.04 \cdot 10^{-6}$	$5.10 \cdot 10^{-4}$	$5.83 \cdot 10^{-3}$
pH	9.3	7.9	7.7

Příloha 2: Vrstvy bentonitu po interakci s vodou

