

Technická zpráva číslo 333/2018

**MIGRAČNÍ PROCESY
RADIONUKLIDŮ V PROSTŘEDÍ
KRYSTALICKÝCH HORNIN
A MIGRAČNÍ PARAMETRY
HORNIN ČESKÉHO MASIVU**

Václava Havlová

a kolektiv

ÚJV Řež, a. s.

Praha, říjen 2018

Název projektu: Výzkumná podpora pro bezpečnostní hodnocení hlubinného úložiště

Název dílčího projektu: *Transport radionuklidů z úložiště / Vstupní parametry a procesní modely pro hodnocení transportu radionuklidů přes horninové prostředí*

Název dílčí etapové zprávy: *Migrační procesy radionuklidů v prostředí krystalických hornin a migrační parametry hornin českého masivu*

Závěrečná zpráva

Evidenční číslo objednatele: SÚRAO TZ 333/2018

Evidenční číslo poskytovatele:

PB-2018-ZZ-S2300-003-Transport1-Migracni_charakteristiky_radionuklidu

ŘEŠITELÉ:

ÚJV Řež, a. s.

Autoři: Václava Havlová, Lukáš Brázda, Kateřina Kolomá, Eva Šustková, Tomáš Rosendorf, Milan Zuna



Obsah

1	Úvod	13
2	Základní soubor relevantních radionuklidů	14
3	Uvažované transportní parametry	15
4	Vlastnosti horniny, ovlivňující transport radionuklidů	17
4.1	Odběr a příprava vzorků	17
4.1.1	Lokality	17
4.1.2	Příprava vzorků	20
4.2	Mineralogické složení hornin	21
4.2.1	Metodika	21
4.2.2	Výsledky a vyhodnocení	22
4.3	Porozita ε a hustota ρ hornin	23
4.3.1	Měření pórovitosti metodou nasycení vodou	23
4.3.2	Výsledky a vyhodnocení	25
4.4	Stanovení kationtové výměnné kapacity hornin	28
4.4.1	Horninové vzorky a jejich úprava	28
4.4.2	Stanovení CEC	29
4.4.3	Sorpční izotermy	31
5	Sorpce radionuklidů na granitické horniny	34
5.1	Metodika	34
5.1.1	Popis pevné a kapalné fáze	35
5.1.1.1	Popis pevné fáze (charakterizace použitých horninových frakcí)	35
5.1.1.2	Vlastnosti použitých roztoků	35
5.2	Výsledky a vyhodnocení	36
5.2.1	Cesium	36
5.2.2	Stroncium	38
5.2.3	Selen	40
5.2.4	Uran	42
5.2.5	Shrnutí výsledků	44
6	Difúze radionuklidů v horninovém prostředí granitů	49
6.1	Metodika	49
6.2	Uspořádání experimentální aparatury v ÚJV Řež, a. s.	49
6.2.1	Vyhodnocení výsledků průnikových difúzních experimentů	50
6.3	Vlastnosti použitých horninových vzorků	52

6.4	Vlastnosti použitých roztoků	53
6.5	Výsledky a vyhodnocení.....	53
6.6	Diskuze	60
6.7	Složení vod v horninovém masivu granitických hornin.....	61
7	Závěr	64
8	Literatura	65
9	Přílohy.....	68

Seznam obrázků:

Obr. 1 a) Příklad odvrtání vzorků GRB (granulit) z bloku horniny, b) Odebrané vzorky vrtného jádra po naformátování pro laboratorní analýzy.....	20
Obr. 2 vlevo: Čelistový drtič BB 200 (Retsch), vpravo: Nadrcený vzorek horniny	21
Obr. 3 Planetární kulový mlýn PM 200 (Retsch), síťovací stroj AS 300 (Retsch) a UV lázeň pro čištění sít (popis obrázku zprava doleva).....	21
Obr. 4 Příklad vyhodnocení křivky osychání horninového vzorku	24
Obr. 5 Hustoty vzorků (kg m^{-3}) z lokalit	26
Obr. 6 Pórovitosti vzorků (%) z lokalit	26
Obr. 7 Hustoty vzorků (kg m^{-3}) z lokalit	26
Obr. 8 Pórovitosti vzorků (%) z lokalit	26
Obr. 9 Hustoty (kg m^{-3}) vzorků jader	27
Obr. 10 Pórovitosti (%) vzorků jader	27
Obr. 11 Hustoty (kg m^{-3}) vzorků jader S-3 a S-4 v závislosti na typu horniny	27
Obr. 12 Pórovitosti (%) vzorků S-3 a S-4 vs. horninový typ	27
Obr. 13 Sorpční izoterma cesia na vzorku PZV1, $c(\text{Cs}) = 1 \cdot 10^{-5} - 9 \cdot 10^{-3} \text{ mol l}^{-1}$, frakce B: 0,125–0,063 mm	31
Obr. 14 Hodnoty kationtových výměnných kapacit hornin vypočtených z Langmuirovy izotermy (Q_{max}) a metodou s Cu(II)-trienem (CEC).....	33
Obr. 15 Hodnoty R_d cesia včetně jejich rozšířených standardních nejistot na horninových vzorcích z potenciálních lokalit, vlevo: frakce C (0,63–0,125 mm), vpravo: frakce D (0,8–0,63 mm), $c(\text{Cs}) = 2 \cdot 10^{-5} \text{ mol l}^{-1}$	38
Obr. 16 Hodnoty R_d stroncia včetně jejich rozšířených standardních nejistot na horninových vzorcích z potenciálních lokalit, vlevo: frakce C (0,63–0,125 mm), vpravo: frakce D (0,8–0,63 mm), $c(\text{Sr}) = 2 \cdot 10^{-5} \text{ mol l}^{-1}$	40
Obr. 17 Hodnoty R_d seleničitanu na horninových vzorcích z potenciálních lokalit, vlevo: frakce C (0,63–0,125 mm), vpravo: frakce D (0,8–0,63 mm), $c(\text{Se}) = 2 \cdot 10^{-5} \text{ mol l}^{-1}$	42
Obr. 18 Hodnoty R_d uranu na horninových vzorcích z potenciálních lokalit, vlevo: frakce C (0,63–0,125 mm), vpravo: frakce D (0,8–0,63 mm), $c(\text{U}) = 2,6 \cdot 10^{-4} \text{ mol l}^{-1}$	44
Obr. 19 Sorpce vybraných radionuklidů na horninové vzorky z potenciálních lokalit, frakce C: 0,63–0,125 mm, frakce D: 0,8–0,63 mm	46
Obr. 20 Závislost hodnot R_d radionuklidů na obsahu plagioklasu v horninových vzorcích u studovaných radionuklidů: graf Cs – frakce C a D; graf Sr – frakce C; graf Se – frakce C; graf U – frakce C. Frakce C: 0,63–0,125 mm, frakce D: 0,8–0,63 mm (poznámka: na grafu Cs není zobrazena hodnota R_d durbachitu PZV1, jejíž vysoká sorpce na PZV1 je důsledkem vyššího obsahu biotitu ve vzorku).....	47
Obr. 21 Závislost hodnot R_d radionuklidů na obsahu biotitu v horninových vzorcích u studovaných radionuklidů: graf Cs – frakce C a D; graf Sr – frakce C; graf Se – frakce C; graf U – frakce C. Frakce C: 0,63–0,125 mm, frakce D: 0,8–0,63 mm (poznámka: na grafu Cs není zobrazena hodnota R_d durbachitu PZV1, jejíž vysoká sorpce na PZV1 je důsledkem vyššího obsahu biotitu ve vzorku).....	48

Obr. 22 Základní uspořádání cely pro laboratorní difúzní experimenty (zleva): vstupní nádrž – vzorek – výstupní nádrž.....	49
Obr. 23: Difúzní cely pro průnikové difúzní experimenty: design ÚJV Řež, a. s. s různými velikostmi rezervoárů	50
Obr. 24 Průnikové křivky (vývoj relativní objemové aktivity ve výstupních rezervoárech) pro difúzní experimenty s HTO (^3H), jodidem (^{125}I) a chloridem (^{36}Cl)	54
Obr. 25 Hodnoty efektivních difúzních koeficientů (analytické řešení) tritia (^3H) vs. aniont (chlorid ^{36}Cl , jodid ^{125}I)	55
Obr. 26 Hodnoty efektivních difúzních koeficientů (analytické řešení) tritia (^3H) v závislosti na porozitě vzorku (stanovené metodou osychání)	56
Obr. 27 Piperův diagram složení podzemních vod podle Tab. 28.....	62

Seznam tabulek:

Tab. 1 Soubor relevantních radionuklidů pro hodnocení bezpečnosti HÚ (SÚRAO).....	14
Tab. 2 Přehled použitých horninových vzorků z potenciálních lokalit pro umístění HÚ použitých pro sorpční experimenty	19
<i>Tab. 3 Velikostní frakce horniny pro mineralogickou analýzu a sorpční experimenty.....</i>	<i>20</i>
Tab. 4 Mineralogické složení použitých horninových vzorků z potenciálních lokalit (hm. %), frakce C: 0,63–0,125 mm, frakce D: 0,8–0,63 mm	22
Tab. 5 Výsledky loužení horninových vzorků před stanovením CEC	29
Tab. 6 Hodnoty CEC horninových vzorků metodou s Cu(II)-trienem.....	30
Tab. 7 Hodnoty kationtových výměnných kapacit hornin vypočtených z Langmuirovy izotermy (Q_{max}) a metodou s Cu(II)-trienem (CEC)	32
Tab. 8 Chemické složení a pH syntetické granitické vody SGW2 (Červinka a Gondolli 2016)	35
Tab. 9 Hodnoty R_d cesia včetně jejich rozšířených standardních nejistot na frakcích C horninových vzorků z potenciálních lokalit, $c(\text{Cs}) = 2 \cdot 10^{-5} \text{ mol l}^{-1}$, frakce C: 0,63–0,125 mm	37
<i>Tab. 10 Hodnoty R_d cesia včetně jejich rozšířených standardních nejistot na frakcích D horninových vzorků z potenciálních lokalit, $c(\text{Cs}) = 2 \cdot 10^{-5} \text{ mol l}^{-1}$, frakce D: 0,8–0,63 mm ...</i>	<i>37</i>
Tab. 11 Hodnoty R_d stroncia včetně jejich rozšířených standardních nejistot na frakcích C horninových vzorků z potenciálních lokalit, $c(\text{Sr}) = 2 \cdot 10^{-5} \text{ mol l}^{-1}$, frakce C: 0,63–0,125 mm	39
<i>Tab. 12 Hodnoty R_d stroncia včetně jejich rozšířených standardních nejistot na frakcích D horninových vzorků z potenciálních lokalit, $c(\text{Sr}) = 2 \cdot 10^{-5} \text{ mol l}^{-1}$, frakce D: 0,8–0,63 mm....</i>	<i>39</i>
<i>Tab. 13 Hodnoty R_d seleničitanu včetně jejich rozšířených standardních nejistot na frakcích C horninových vzorků z potenciálních lokalit, $c(\text{Se}) = 2 \cdot 10^{-5} \text{ mol l}^{-1}$, frakce C: 0,63–0,125 mm</i>	<i>41</i>
<i>Tab. 14 Hodnoty R_d seleničitanu včetně jejich rozšířených standardních nejistot na frakcích D horninových vzorků z potenciálních lokalit, $c(\text{Se}) = 2 \cdot 10^{-5} \text{ mol l}^{-1}$, frakce D: 0,8–0,63 mm...</i>	<i>41</i>

Tab. 15 Hodnoty R_d uranu včetně jejich rozšířených standardních nejistot na frakcích C horninových vzorků z potenciálních lokalit, $c(U) = 2,6 \cdot 10^{-4} \text{ mol l}^{-1}$, frakce C: 0,63–0,125 mm	43
Tab. 16 Hodnoty R_d uranu včetně jejich rozšířených standardních nejistot na frakcích D horninových vzorků z potenciálních lokalit, $c(U) = 2,6 \cdot 10^{-4} \text{ mol l}^{-1}$, frakce D: 0,8–0,63 mm..	43
Tab. 17 Výsledné hodnoty R_d vybraných radionuklidů na frakcích C a D horninových vzorků z potenciálních lokalit, poměr fází 1:10, 7 dní, frakce C: 0,63–0,125 mm, frakce D: 0,8–0,63 mm.....	45
Tab. 18 Porovnání relativní sorpčních kapacit minerálů obsažených v granitických horninách (Ticknor et al. 1989)	46
Tab. 19 Seznam užitých vzorků s rozměry pro difúzní experimenty.....	52
Tab. 20 Vyhodnocení efektivních difúzních koeficientů pro vzorky z jádra D2	56
Tab. 21 Vyhodnocení efektivních difúzních koeficientů pro vzorky z jádra TIV1	57
Tab. 22 Vyhodnocení efektivních difúzních koeficientů pro vzorky z jádra PZV1	57
Tab. 23 Vyhodnocení efektivních difúzních koeficientů pro vzorky z jádra PDV1.....	57
Tab. 24 Vyhodnocení efektivních difúzních koeficientů pro vzorky z jader GRB	58
Tab. 25 Vyhodnocení efektivních difúzních koeficientů pro vzorky z jádra 2S3	59
Tab. 26 Vyhodnocení efektivních difúzních koeficientů pro vzorky z jader BT	59
Tab. 27 Vyhodnocení efektivních difúzních koeficientů pro vzorky z jader GB a GC	60
Tab. 28 Základní chemické složení podzemních vod 1) Melechovský masiv – průměr, příprava SGW (Buňatová et al. 1995), 2) Lokalita Háje u Příbrami, podzemní zásobník plynu, vývěr P-6, roky 1990-1996 – průměr, 3) Český masiv - medián (Rukavičková et al. 2009), 4) Český masiv, minerální vody - medián (Rukavičková et al. 2009), 5) Český masiv, fosilní vody - medián (Rukavičková et al. 2009), 6) Jáchymov, pramen Běhounek, vrt HG-1, 7) Lokalita Čertovka, vrt TIV-1 (Havlová et al. 2015), 8) Lokalita Magdaléna, vrt N-2 (Havlová et al. 2015), 9) Lokalita Horka, vrt NT-2 (Havlová et al. 2015), 10) Lokalita Čihadlo, vrt DE-2 (Havlová et al. 2015), 11) Lokalita Březový potok, vrt HV-5 (Havlová et al. 2015), 12) Lokalita Hrádek, vrt DC-1 (Havlová et al. 2015), 13) Lokalita Kraví Hora, vrt S-1, PVP Bukov (Havlová et al. 2015), 14) PVP Bukov (600 m) – průměr, příprava SGW2 , 15) Důl Rožná (1000 m) – průměr, příprava SGW3	61
Tab. 29 Navržené chemické složení podzemní vody SGW2 a SGW3 na základě reálných analýz podzemních vod z PVP Bukov a dolu Rožná	63
Tab. 30 Výsledky stanovení pórovitosti (%) a hustoty vzorků z lokalit.....	68
Tab. 31 Výsledky stanovení pórovitosti (%) a hustoty vzorků z lokality PVP Bukov – 170 Kraví Hora	70

Seznam textových příloh:

Přehled výsledků stanovení pórovitosti a hustoty z lokalit (Tab.30)

Přehled výsledků stanovení pórovitosti vzorků z lokality Bukov -170 Kraví Hora (Tab. 31)


Seznam elektronických příloh:

Příloha 1 Export databáze-T1_30112018.xls, xlm

 SÚRAO	Migrační procesy hornin Českého masivu	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 333/2018

Seznam použitých zkratk:

AMS	anizotropie magnetické susceptibility
CEC	kationtová výměnná kapacita
ČGS	Česká geologická služba
ČR	Česká republika
HTO	tritiovaná voda
HÚ	hlubinné úložiště
PÚ	průzkumné území
SW	software
SKB	Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company
RAO	radioaktivní odpad
TDS	celková salinita
TD	through-diffusion experiment (průnikový difúzní experiment)
TEM	through-electromigration experiment (průnikový elektromigrační experiment)
UOS	ukládací obalový soubor
VAO	vysoce aktivní odpady
VJP	vyhořelé jaderné palivo
ZL	zadávací list

 SÚRAO	Migrační procesy hornin Českého masivu	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 333/2018

Abstrakt

Tato zpráva shrnuje výsledky stanovení transportních parametrů granitických a metamorfovaných hornin z Českého masivu v rámci ZL Transport 1 a Charakterizace PVP Bukov. Zaměřila se především na stanovení sorpčních a difúzních parametrů, významných pro migraci radionuklidů. Nedílnou součástí jsou však i stanovení souvisejících vlastností, jako je mineralogické složení, pórovitost, hustota, kationtová výměnná kapacita, bez nichž tato stanovení nemají odpovídající výpovědní hodnotu.

Klíčová slova


úložiště, radioaktivní odpady, migrace, sorpce, difúze, porozita, podzemní voda, hodnocení bezpečnosti

Summary

This report summarizes the results of transport parameters determination of granite and metamorphic rocks from Bohemian Massif within ZL Transport 1 and Characterization of PVP Bukov. It focused mainly on the determination of sorption and diffusion parameters that are important for the migration of radionuclides. Assessment of other related properties (such as mineral composition, porosity, density, cation exchange capacity) which are essential for adequate/correct data interpretation, is another integral part of this report.

Keywords

repository, radioactive waste, migration, sorption, diffusion, porosity, ground water, safety assessment

 SÚRAO	Migrační procesy hornin Českého masivu	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 333/2018

1 Úvod

Tato zpráva byla zpracována v rámci projektu SÚRAO „Výzkumná podpora bezpečnostního hodnocení hlubinného úložiště“, který je součástí přípravy hlubinného úložiště radioaktivních odpadů (dále jen HÚ). Cílem projektu je získat vybraná data, modely, argumenty a další informace potřebné pro zhodnocení potenciálních lokalit pro umístění HÚ z hlediska dlouhodobé bezpečnosti. Na základě veřejného zadávacího řízení byla v červenci 2014 uzavřena čtyřletá smlouva s ÚJV Řež, a. s. a jeho subdodavateli: Českou geologickou službou, ČVUT v Praze, Technickou univerzitou v Liberci, Ústavem geoniky AV ČR a společnostmi Arcadis CZ a. s., PROGEO, s.r.o., Chemcomex Praha, a. s. a Centrum výzkumu Řež, s.r.o. o poskytování výzkumné podpory hodnocení dlouhodobé bezpečnosti v následujících oblastech:

- (i) Chování VJP a forem RAO, nepřijatelných do přípovrchových úložišť, v prostředí HÚ;
- (ii) Chování ukládacích obalových souborů (UOS) VJP a RAO v prostředí HÚ;
- (iii) Chování tlumicích, výplňových a dalších konstrukčních materiálů v prostředí HÚ;
- (iv) Řešení úložných vrtů a jejich vliv na vlastnosti obklopujícího horninového prostředí;
- (v) Chování horninového prostředí;
- (vi) Transport radionuklidů z úložiště;
- (vii) Další charakteristiky lokalit potenciálně ovlivňující bezpečnost úložiště.

Cílem plnění dílčího projektu "Vstupní parametry a procesní modely pro hodnocení transportu radionuklidů přes horninové prostředí" (oblast Transport radionuklidů z úložiště) je získat vstupní parametry a procesní modely pro hodnocení transportu radionuklidů přes horninové prostředí pro podporu pracovníků Objednatele v souladu s výše uvedenou oblastí (vi) Transport radionuklidů z úložiště.

Předmětem řešení tohoto dílčího projektu je:

- Shrnutí a analýza transportních procesů, modelů a výpočetních kódů pro určení transportních cest a hodnocení transportu radionuklidů přes horninové prostředí.
- Výběr vhodných procesních modelů pro popis transportu radionuklidů v krystalinickém prostředí a určení transportních cest na kandidátních lokalitách v návaznosti na přípravu 3D strukturně-geologických a hydrogeologických modelů v dílčích projektech, aktualizace analýz zahraničních poznatků a určení transportních cest pro vybrané lokality podle požadavků SÚRAO.
- Shrnutí a aktualizace odhadu transportních parametrů horninových prostředí pro vybrané lokality podle požadavků Objednatele ve formě databáze parametrů včetně odhadu jejich nejistot na základě analýzy dosavadních poznatků dosažených při přípravě HÚ v ČR a aktualizace analýz zahraničních poznatků.
- Ověření vybraných modelů a implementace výpočetních kódů pro určení transportních cest v potenciálních lokalitách.
- Ověření a srovnání transportních charakteristik dostupných vzorků z různých horninových prostředí uvažovaných pro HÚ v ČR.

Tato zpráva shrnuje výsledky stanovení transportních parametrů (porozity, sorpčních koeficientů a difúzních koeficientů pro vybrané radionuklidy) za dosavadního průběhu experimentálních prací na vzorcích z potenciálních lokalit.


 SÚRAO	Migrační procesy hornin Českého masivu	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 333/2018

2 Základní soubor relevantních radionuklidů

Základní soubor relevantní radionuklidů vychází ze zadání Objednatele a z předchozích prací, jako je např. Aktualizace referenčního projektu 2011. Relevantní radionuklidy jsou shrnuty v Tab. 1.

Tab. 1 Soubor relevantních radionuklidů pro hodnocení bezpečnosti HÚ (SÚRAO)

Aktivační produkty	Aktinidy					Štěpné produkty
Be-10	Th-229	Th-230	Th-232			Se-79
C-14	Pa-231					Sr-90
Cl-36	U-233	U-234	U-235	U-236	U-238	Zr-93
Ca-41	Np-237					Tc-99
Ni-59	Pu-238	Pu-239	Pu-240	Pu-242		Pd-107
Ni-63	Am-241	Am-242m	Am-243			Sn-126
Zr-93	Cm-244	Cm-245	Cm-246			I-129
Mo-93						Cs-135
Nb-94						Cs-137
Ag-108m						Sm-151
Ho-166m						

 SÚRAO	Migrační procesy hornin Českého masivu	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 333/2018

3 Uvažované transportní parametry

Výběr hodnot vybraných transportních parametrů vychází ze zprávy Havlová et al. (2015a), kde byly shrnuty obecné předpoklady pro hodnocení transportních parametrů jako vstupních dat pro hodnocení bezpečnosti.

Identifikace důležitých parametrů v této zprávě vycházela z následujícího zjednodušení popisu migrace radionuklidů z úložiště do biosféry. Je evidentní, že každý z níže uvedených parametrů je možno dále dělit na další a další parametry, které jsou potřebné pro jeho vyhodnocení.

Koncentraci radionuklidu j z úložné jednotky i , který migruje do biosféry, je možno vyjádřit následující rovnicí, kdy se prakticky uvažuje pouze 5 procesů:

- pokles aktivity radionuklidu za dobu transportu radionuklidů do biosféry v důsledku radioaktivní přeměny,
- srážení radionuklidů v důsledku překročení limitu rozpustnosti,
- retardace v geosféře,
- zředění a
- disperze radionuklidů v geosféře (Vokál et al. 2009).

$$C_{jibio}(t) = \frac{C_{jigeo}(t) \cdot e^{-\lambda T_i R_i}}{G_i}, \quad (3-1)$$

kde C_{jibio} je koncentrace radionuklidu j v biosféře, C_{jigeo} je koncentrace radionuklidu j vstupujícího do geosféry, λ je přeměnová konstanta, T_i je doba migrace nesorbujících se radionuklidů do biosféry, R_i je retardační koeficient sorbujícího se radionuklidu v geosféře a G_i vyjadřuje faktor ředění a disperze radionuklidu v horninovém prostředí.

Doba migrace nesorbujících se radionuklidů do biosféry je složena z doby migrace radionuklidů v systému vzájemně propojených puklin a odpovídá době toku vody v puklinách. Propojenost puklin je jedním z důležitých faktorů ovlivňujících migraci radionuklidů v puklinovém prostředí. Celková doba toku radionuklidů (T_i) z jedné pukliny je složena z doby toku mnoha puklinami (T_k). Tato doba odpovídá poměru délky pukliny a rychlosti toku radionuklidů v puklině. V případě horniny obklopující ukládací soubory je proto možno zjednodušeně za jedny z nejdůležitějších parametrů považovat vzdálenost ukládacích souborů od hydraulicky aktivní zlomové či puklinové zóny a rychlost toku vody v puklině, jež odpovídá poměru Darcyho rychlosti a transportní porozity. Zředovací faktor geosféry G je pak zjednodušeně definován jako:

$$G = \frac{Q_{G/B}}{Q_{U/G}}, \quad (3-2)$$

kde $Q_{G/B}$ je průtok podzemní vody na rozhraní geosféra-biosféra a $Q_{U/G}$ průtok podzemní vody na rozhraní úložný systém-geosféra.

Makrodisperze v puklinovém prostředí má stejný efekt jako ředění a není zvlášť řešena zejména z důvodu, že je velmi obtížné určit disperzní koeficient v puklinovém prostředí. „Mikrodisperze“, reprezentovaná ředěním, je zahrnuta do retardačního koeficientu.

 SÚRAO	Migrační procesy hornin Českého masivu	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 333/2018

V případě sorbujících se radionuklidů je velmi významným parametrem retardační koeficient R_r , který závisí na velké řadě faktorů, jež budou dále podrobněji diskutovány v textu. Koncentrace radionuklidů v geosféře je dále ovlivněna maximální koncentrací radionuklidů v pórové vodě horniny.

Je však třeba si položit otázku, jak je možno zaručit, že hodnoty disperze a ředění zůstanou stejné po dobu tisíců let? Proto výběr vhodného úložného prostředí pro hlubinné úložiště není vhodné založit na příznivých počátečních hodnotách disperze a ředění. V bezpečnostních analýzách je však třeba s tímto faktorem vždy počítat a je nutné najít určitou konzervativní hodnotu, jež bude vyjadřovat možnou minimální hodnotu disperze a ředění v lokalitě.

Rozhodujícími parametry pro pokles koncentrace radionuklidu v horninovém prostředí směrem od HÚ RAO k biosféře jsou následující procesy:

- **rozpuštění radionuklidu** (ve zprávě Klajmon et al. 2017)
- **difúze do horninové matrice**
- **sorpce na horninovou matici**

Pro popis těchto procesů musíme znát ještě další vedlejší parametry, charakterizující horninové prostředí, včetně podzemní vody, a to:

- porozitu horninové matrice ε ,
- hustotu horniny ρ ,
- vzdálenost, do níž je hornina v rovnováze s podzemní vodou v puklině δ ,
- rozevření (apertura) pukliny a ,
- složení podzemní vody,
- mineralogické složení horniny.

 SÚRAO	Migrační procesy hornin Českého masivu	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 333/2018

4 Vlastnosti horniny, ovlivňující transport radionuklidů

4.1 Odběr a příprava vzorků

S ohledem na studium transportních parametrů byl preferován odběr vzorků z hmotné dokumentace vrtných jader odebraných z hlubších vrtů, které blíže odrážejí chování hornin v plánovaném úložišti a nejsou významněji ovlivněné zvětrávacími procesy.

Vzorky vrtných jader byly odebrány z vrtného jádra PZV-1 (Pozďátky u Třebíče – Horka), TIV- 1 (Tis u Blatna – Čertovka) a PDV-1 (Panské Dubenky), která byla odvrtána v rámci projektu (FR-TI1/367) v roce 2010–2011. Vybrané vzorky metamorfovaných hornin z lokality Kraví hora byly odebrány z hmotné dokumentace jader S3 a S4 realizovaných na pracovišti PVP Bukov (Bukovská et al. 2017).

Vzhledem k tomu, že na ostatních lokalitách nebyla k dispozici horninová jádra, byly vzorky odebírány z povrchových vzorků. Vzorky z lokality Březový Potok a Hrádek byly poskytnuty od společnosti SÚRAO a jednalo se o vzorky po stanovení AMS (Hanák et al. 2017). Kusové vzorky z lokalit Čihadlo (granit) a Kraví hora (granulit) byly ve spolupráci s ČGS odebrány v činných lomech z čerstvě vylomených bloků horniny. Vzorky jader byly připraveny odvrtáním z kusových vzorků odebraných na lokalitách a následně naformátovány na požadované rozměry.

4.1.1 Lokality

110 Březový potok (BT - Defurovy Lažany, N49°24'25.6", E13°39'57.9")

Jako základní hornina na lokalitě Březový potok byl hodnocen amfibol – biotitický granodiorit (BT – blatenský typ) od Defurových Lažan. Dalším typem na lokalitě je amfibol – biotitický granodiorit (CT – červenský typ) z lokality Barák. Oba typy náleží blatenské suitě středočeského plutonického komplexu (Hanák et al. 2017).

Pro difúzní experimenty byly použity vzorky amfibol-biotitického granodioritu z lokality Defurovy Lažany (vzorky BT8 a BT3).

120 Čertovka (TIV-1 - Tis u Blatna, N50°04'54.4", E13°20'53.6")

Granitoidy této oblasti náleží čistecko – jesenickému masivu (bohemikum). Těleso je komplikovanější stavby, čistecký granodiorit tvoří oválný peň v tiském granitu. Čistecko – jesenický masiv jako celek je součástí lounského plutonu. Základní hodnocenou horninou je středně zrnitý biotitický granit tiského plutonu z odběrové lokality Tis u Blatna.

Hornina ve vrtu TIV-1 je tvořena hrubě zrnitým neporfyrickým biotitickým tiským granitem, který je homogenní na velkou vzdálenost (Rukavičková et al. 2011).

130 Čihadlo (D2 - Deštná lom, N49°15'9.688", E14°55'20.150")

Vymezené území zastihuje moldanubický pluton, tzv. čiměřský granit včetně okolních hornin. Základním horninovým typem na této lokalitě je středně zrnitý muskovit – biotitický granit typu Eisgarn, subtyp Klenov (Hanák et al. 2017). Vzorky bloku horniny byly odebrány v lomu Deštná z čerstvě vylomených vzorků. Jde o středně zrnitý až hrubozrný muskovit-biotitický granit, místy porfyrický.

 SÚRAO	Migrační procesy hornin Českého masivu	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 333/2018

140 Horka (PZV-1 - Pozdřátky u Třebíče, N49°11'38.049", E015°56'47.274")

Lokalita Horka je vymezena v území třebíčského masivu. Základní horninou je porfyrický amfibol – biotitický melanokratický granit až křemenný syenit (melasyenit) (Hanák et al. 2017), dále označovaný pro námi zpracovávané vzorky jako syenit.

Lokalita Pozdřátky leží v třebíčském masivu moldanubického plutonu. Moldanubický pluton představuje nejrozsáhlejší hercynský komplex vyvřelých hornin v ČR (Mísař 1983).

Vzorek vrtného jádra byl odebrán z hmotné dokumentace vrtu PZV-1. Vrt PZV-1 byl realizován nedaleko skládky nebezpečných odpadů cca 250 metrů jižně od vrtu VP-5, který se nachází cca 600 m jz od obce Pozdřátky u Třebíče.

150 Hrádek (GB - Boršov lom, N49°23'46.710", E15°25'49.789)

Lokalita Hrádek zaujímá území u Horní Cerekve, kdy ve vymezené ploše převládají granity centrálního moldanubického plutonu, eisgarnského granitu spolu s enklávami rul a migmatitů. Součástí lokality je i granitový peň Čeřínek. Základní horninou je granit typu Čeřínek (GC) z lokality Bromberg. Za jemu blízký je považován drobnozrnný muskovit – biotitický granit typu Boršov (GB) z lokality Boršov lom (Hanák et al. 2017).

Pro difúzní experimenty byly použity vzorky GB2 a GB4 lomu Boršov a Bromberg (GC3).

160 Magdaléna


Vzorek z lokality 160 Magdaléna nebylo možné s ohledem na dostupnost vzorků odebrat. Dostupné výchozy poskytují pouze navětralé vzorky hornin, které nejsou pro transportní parametry reprezentativní. Po dohodě se zadavatelem nebyly vzorky z této lokality analyzovány.

170 Kraví hora (lokalita Dolní Bory – lom, 49.4250744N, 16.0401256E)

Území této lokality náleží strážeckému moldanubiku, tj. ve v. okrajové části moldanubika mezi svrateckým krystalinikem a třebíčským plutonem. Základním horninovým typem je biotitický granulit až granulitová rula moldanubika. Granulitové těleso, které se nachází ve středu území, má protáhlý tvar (Hanák et al. 2017). Jde o felsický granulit světlý (grt + ky), místy páskovaný. Pro experimenty byly připraveny vzorky z lomu Dolní Bory.

Současně byly studovány vzorky horninových jader z hloubky 550 m odebrané z lokality PVP Bukov. Lokalita PVP Bukov spadá do vymezeného území rudního pole Rožná - Olší, kde od roku 1957 do roku 2017 probíhala hlubinná těžba uranu. Z pohledu regionálně-geologického členění jednotky Českého masivu (Mísař 1983) zájmová lokalita leží v komplexu vysoce metamorfovaných hornin severovýchodního okraje jednotky strážeckého moldanubika při styku se svrateckým krystalinikem.

Byly vybrány vzorky základních horninových typů metamorfovaných hornin na lokalitě (migmatit S4-2, amfibolit S4-4, migmatizovaný amfibolit S3-3, biotit-amfibolická pararula S4-3, amfibolický migmatit s biotitem a granátem S3-4). Více informací o těchto vzorcích je uvedeno ve zprávě Bukovská et al. (2017).

 SÚRAO	Migrační procesy hornin Českého masivu	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 333/2018


Panské Dubenky (vrt PDV1, N49°12'41.103", E015°16'34.787")

Lokalita Panské Dubenky se nachází v prostoru budovaném mohutným granitoidním tělesem – centrálním masivem moldanubika. Jde o pozdně orogenní masiv hlubinných magmatických hornin, který pronikl v závěru variského orogenního procesu do komplexu rul a dalších metamorfovaných hornin převážně sedimentárního původu (Černý et al. 1998). Z petrografického hlediska je ložiskovou surovinou dvojslídna, muskoviticko-biotitická žula, která je střednězrnná, porfyrická, vyrostlicemi jsou živce, a to zejména draselné (Černý et al. 1998).

Vrt PDV-1 se nachází asi 100 m východně od Horního lomu v Panských Dubenkách, v jeho ložiskovém území.

Tab. 2 Přehled použitých horninových vzorků z potenciálních lokalit pro umístění HÚ použitých pro sorpční experimenty

Horninový vzorek	Hloubka odběru (m)/metráž	Hornina (zjednodušené označení)	Původ	Lokalita HÚ	Kód lokality
BT	Povrchový odběr	Granodiorit	Defurovy Lažany	Březový potok	110
TIV1	89,40–89,20	Granit	Tis u Blatna	Čertovka	120
D2	Povrchový odběr	Granit	Deštná	Čihadlo	130
PZV1	92,80–93,00	Syenit	Pozdřátky u Třebíče	Horka	140
GB	Povrchový odběr	Granit	Boršov	Hrádek	150
GRB	Povrchový odběr	Granulit	Dolní Bory	Kraví hora	170
S3-3	550 m 81,63–81,98	Migmatizovaný granát-biotitický amfibolit	PVP Bukov	Kraví hora	170
S3-4	550 m 86,70–87,00	Amfibolický migmatit s biotitem a granátem	PVP Bukov	Kraví hora	170
S4-3	550 m 25,00–25,28	Migmatizovaná biotit-amfibolická pararula	PVP Bukov	Kraví hora	170
2S4-2	550 m 10,50–10,67	Biotitický migmatit s převahou leukosomu	PVP Bukov	Kraví hora	170
2S4-4	550 m 36,16–36,39	Jemnozrnný amfibolit s biotitem	PVP Bukov	Kraví hora	170
PDV1	Vrtné jádro - směsný vzorek	Granit	Panské Dubenky	--	--

 SÚRAO	Migrační procesy hornin Českého masivu	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 333/2018

4.1.2 Příprava vzorků

Vzhledem k technickým požadavkům plánovaných experimentů bylo nutné odebrané vrtné jádro (z hmotné dokumentace) převrtat na průměr 50 mm. Z povrchových kusových vzorků byla odvrtána horninová jádra o průměru 48–50 mm. Po odvrtání byla horninová jádra naformátována pomocí diamantové pily na podvzorky pro jednotlivé analýzy (Obr. 1). Převzaté vzorky z lokalit (BT, GB, GC) byly nařezány z válečků na 10 mm plátky pro difúzní experimenty.

a)



b)



Obr. 1 a) Příklad odvrtání vzorků GRB (granulit) z bloku horniny, b) Odebrané vzorky vrtného jádra po naformátování pro laboratorní analýzy

Jednotlivé vzorky byly následně zaevidovány do databáze vzorků, zdokumentovány a předány pro následné analýzy dle plánu a požadavků.

Část vzorků byla nadrcena na čelistovém drtiči BB 200 (Retsch) (Obr. 2). Sítování bylo následně provedeno na analytickém síťovacím stroji AS 300 (Retsch), kdy bylo u některých frakcí nutné přemletí vzorku na požadované množství dané frakce. Mletí vzorku bylo prováděno na planetárním kulovém mlýnu PM 200 (Retsch) (viz Obr. 3). Pro sorpční experimenty byly připraveny zrnitostní frakce uvedené v Tab. 3, použity byly frakce C a D.

Tab. 3 Velikostní frakce horniny pro mineralogickou analýzu a sorpční experimenty

Označení frakce	Velikost frakce (mm)
A	< 0,063
B	0,125–0,063
C	0,63–0,125
D	0,8–0,63
E	> 0,8



Obr. 2 vlevo: Čelistový drtič BB 200 (Retsch), vpravo: Nadrcený vzorek horniny



Obr. 3 Planetární kulový mlýn PM 200 (Retsch), síťovací stroj AS 300 (Retsch) a UV lázeň pro čištění sít (popis obrázku zprava doleva)

4.2 Mineralogické složení hornin

4.2.1 Metodika

Vzorky z jednotlivých frakcí byly nadrceny na analytickou jemnost a následně analyzovány rtg difrakcí na práškovém rtg difraktometru Bruker D8 Advance v Bragg-Brentanově uspořádání na pracovišti ČGS (Dr. František Laufek).

Použito bylo CuK α záření pozičně citlivého detektoru s detektorem Lynx Eye XE. Práškový vzorek byl umístěn na rovinné podložce (tzv. bezdifrakční křemík). Difrakční záznam byl pořízen v úhlovém rozsahu 4–80° 2 Θ s krokem 0,015° a načítacím časem 0,8 s na krok.

 SÚRAO	Migrační procesy hornin Českého masivu	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 333/2018

Získané rtg difrakční záznamy byly kvalitativně vyhodnoceny v programu Diffrac.Eva (Bruker AXS 2015) za pomoci databáze PDF 2. Následná semikvantitativní fázová analýza byla provedena pomocí Rietveldovy metody (Post a Bish 1989) v programu Topas 5 (Bruker AXS 2014). Modely krystalových struktur jednotlivých fází byly získány z databáze ICSD (FIZ 2015). Během Rietveldovy analýzy byly upřesňovány škálové faktory jednotlivých fází, jejich mřížkové parametry a velikost koherentně difraktujících domén. Byla použita korekce na přednostní orientaci.

Limit detekce metody se pohybuje v závislosti na charakteru fáze a její krystalinitě v rozmezí cca 0,2–0,5 hm. %.

4.2.2 Výsledky a vyhodnocení

Výsledky semikvantitativních analýz jednotlivých frakcí hornin jsou uvedeny v Tab. 4.

Tab. 4 Mineralogické složení použitých horninových vzorků z potenciálních lokalit (hm. %), frakce C: 0,63–0,125 mm, frakce D: 0,8–0,63 mm

Horninový vzorek	Frakce	Křemen	Plagioklas	K-živec	Chlorit	Amfibol		Biotit, annit	Kaolinit	Muskovit	Pyroxen	Kalcit	Titanit	Silimanit	Pravděpodobně přítomné minerály
						Hornblend	Cummingtonit								
PZV1	C	24,5	21,0	20,0		15,0		19,5							
	D	25,0	24,5	26,0		14,5		10,0							a
	wr	18	21,5	27,5		18,5		14,5							
TIV1	C	46,5	29,0	18,0	0,5			1,5	0,5	4,0					
	D	44,0	30,5	19,0	0,5			5,8	0,2						
	wr	44	31,5	20,5				3		1					
PDV1	C	52,0	24,5	15,0	0,5					7,0	1,0				
	D	46,0	27,0	18,0	0,5					7,0	1,5				
D2	C	43,0	30,0	20,5				2,0	1	3,5					b
	D	37,0	32,5	24,5				1,5	1	3,5					b
	wr	38	29,5	24,5				2	1	5					d
S3-3	C	8,0	59,5		0,5	26,0	2	4,0							
	D	8,5	60,0		0,5	25,0	3	3,0							c
S3-4	C	29,0	49,0	0,5	0,5	17,0		4,0							
	D	29,0	52,0	1,0	0,5	15,0		2,5							
	wr	25	49,5	0,5	0,5	23		2							
S4-3	C	26,5	46,0	0,5		22,5		4,5							
	D	29,0	52,0	0,5		16,0		3,0							d
2S4-2	C	41,0	46,5		1			11				0,5			e
	D	42,0	48,5		1			8,0				0,5			e
	wr	41,5	46,5		0,5			10				1,5			

Horninový vzorek	Frakce	Křemen	Plagioklas	K-živec	Chlorit	Amfibol		Biotit, annit	Kaolinit	Muskovit	Pyroxen	Kalcit	Titanit	Silimanit	Pravděpodobně přítomné minerály
						Hornblend	Cummingtonit								
2S4-4	C	11,0	35,5		1	50,0						0,5	2,0		f
	D	9,0	39,5		0,5	49,0						0,5	1,5		
	wr	11	41		0,5	47						0,5			h,f
GRB	C	47,5	28,0	23,0				0,5						1,0	
	D	43,0	30,5	24,5				0,5						1,5	
	wr	44,5	29	24				0,5						2	
BT	C	33,0	37,0	21,5				8,5							d, g
	D	32,0	42,0	19,0				7,0							d, g
	wr	33	39	20				8							d, g
GB	C	42,0	31,0	22,0				3,5		1,5					
	D	42,0	30,0	23,0				3,5		1,5					
	wr	40,5	31,5	23				3,5		1,5					

wr – whole rock

a) apatit; b) pyroxen; c) dolomit; d) chlorit, hematit; e) pyrit; f) slída, K-živec; g) kaolinit; h) titanit

4.3 Porozita ε a hustota ρ hornin

4.3.1 Měření pórovitosti metodou nasycení vodou

Pórovitost (v %) je vyjádřena poměrem objemu pórů, který z celkového objemu látky (V_S) připadá na objem pórů (V_P), viz rovnice:

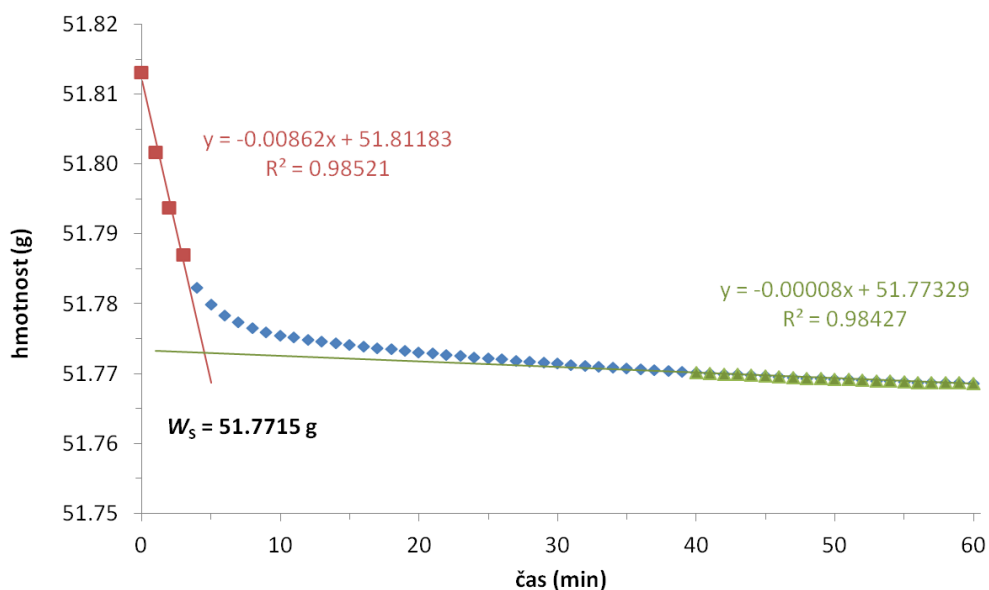
$$\varepsilon = \frac{V_P}{V_S} \cdot 100 \quad (4-1)$$

Stanovení celkové pórovitosti jednotlivých vzorků je nezbytné pro vyhodnocení efektivních difúzních koeficientů. Pórovitost hornin je možno studovat celou řadou metod. Jednou z nich je metodika stanovení pórovitosti metodou nasycení vodou a osychání. Tato metoda, popsaná v pracovním postupu PP 2402.03, vychází z metodiky Melnyk a Skeet (1986). Jedná se o poměrně jednoduchou metodu, kterou lze snadno aplikovat v laboratoři s běžným vybavením a která poskytuje informace o pórovitosti vzorků. Tuto metodiku je možno využít jako srovnávací postup ke klasickému postupu měření metodou rtuťové porozimetrie. Postup stanovení lze rozdělit do čtyř kroků:

1. Zjištění hmotnosti suchého vzorku W_D opakovaným sušením v sušárně při teplotě 105 °C do konstantní hmotnosti. Tím je zajištěno, že veškerá voda obsažená v pórech vzorku z něj byla odstraněna.
2. Nasycení vzorku pod vakuem v exsikátoru syntetickou granitickou vodou (případně deionizovanou vodou). Nejprve je vzorek důkladně evakuován v exsikátoru. Poté je

do evakuovaného exsikátoru pomalu, aby nedošlo k poškození vzorku, napouštěna odplyněná kapalina (granitická voda/deionizovaná voda), dokud není vzorek celým objemem ponořen pod hladinou. Vzorek se nechá určitou dobu pod vodní hladinou a vakuem sytit. Poté je do exsikátoru pomalu napouštěn vzduch, aby došlo k vyrovnání vakua s okolním atmosférickým tlakem.

3. Zjištění hmotnosti nasyceného vzorku ponořeného pod kapalinou W_A . Vzorek je zavěšen na závěsné zařízení pod vahami a přitom je ponořen do nádoby s odplyněnou kapalinou. Pozornost musí být věnována tomu, aby na závěsném zařízení nebo vzorku neulpěly vzduchové bublinky a aby byl vzorek na závěsném zařízení či samotné závěsné zařízení ponořen do vody vždy na stejnou úroveň (označení ponoru).
4. Stanovení hmotnosti nasyceného, na povrchu suchého, vzorku W_S pomocí křivky vysoušení vzorku. Povrch nasyceného vzorku je po vyjmutí z kapaliny na povrchu otřen. Vzorek je poté kontinuálně vážen a je zaznamenávána hmotnost na povrchu osychajícího vzorku v čase. Na základě těchto údajů je vykreslena křivka vysoušení vzorku, dokud není vzorek vizuálně suchý a rychlost poklesu hmotnosti pomalá a ustálená. Požadovaná hmotnost W_S je vypočtena z průsečíku lineárního proložení počáteční a konečné části křivky vysoušení – příklad vyhodnocení viz Obr. 4.



Obr. 4 Příklad vyhodnocení křivky osychání horninového vzorku

Ze získaných hmotností se pak vypočte objem vzorku V_S a objem pórů V_P podle těchto rovnic:

$$V_S = (W_S - W_A) / \rho \quad (4-2)$$

$$V_P = (W_S - W_D) / \rho \quad (4-3)$$

kde ρ je hustota kapaliny, kterou byl vzorek sycen.

Výsledná pórovitost vzorku ε se pak vypočítá podle rovnice

 SÚRAO	Migrační procesy hornin Českého masivu	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 333/2018

$$\varepsilon = \frac{V_P}{V_S} = \frac{(W_S - W_D)}{(W_S - W_A)} \quad (4-4)$$

kde V_P je objem pórů a V_S je objem vzorku. Při použití této finální rovnice není potřeba znalost hustoty kapaliny.

Tuto metodu lze využít pro vzorky, které jsou dále použity pro průnikové difúzní experimenty. Je využito především nasycení vzorku vodou při měření pórovitosti, které je základním předpokladem pro relevantní průběh difúzních experimentů.

4.3.2 Výsledky a vyhodnocení

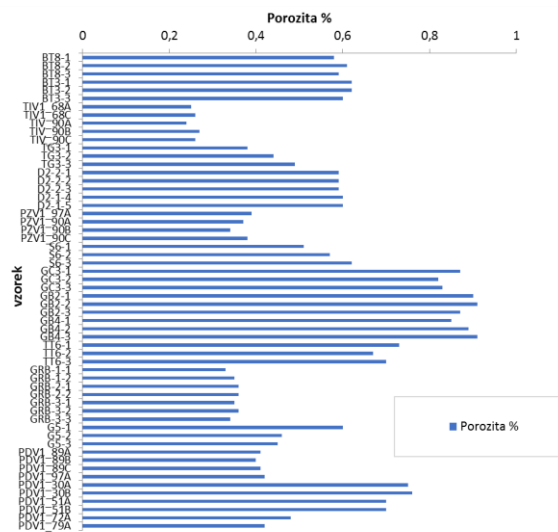
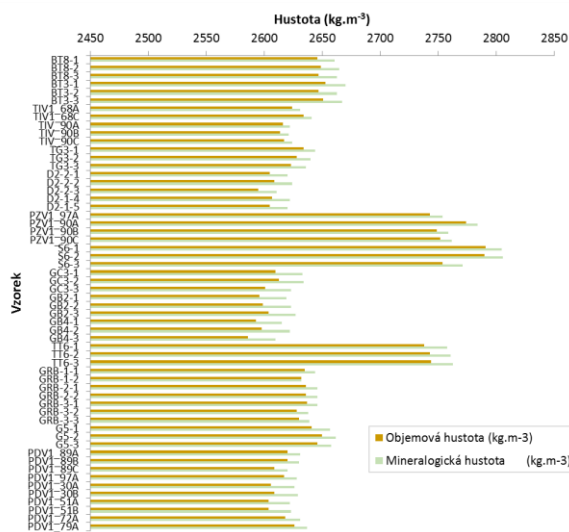
Pórovitost

Metodika stanovení pórovitosti nasycení vodou je popsána v kapitole 4.3.1. Hodnoty byly stanoveny na připravených vzorcích disků o průměru 48–50 mm a výšce 10 mm. Následně byly vybrané vzorky předány na difúzní experimenty.

Žádný ze zpracovávaných vzorků nedosahoval vysoké pórovitosti (nad 3 %), proto by metodika Melnyka a Skeeta (1986) měla být vhodná pro všechny typy vzorků - dle zkušeností je vhodná pro vzorky do pórovitosti cca 3 %. Vzorky byly syceny syntetickou granitickou vodou (SGW2).

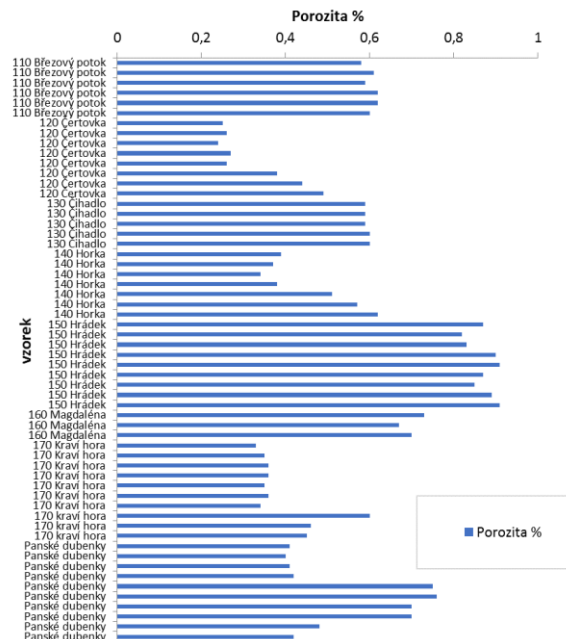
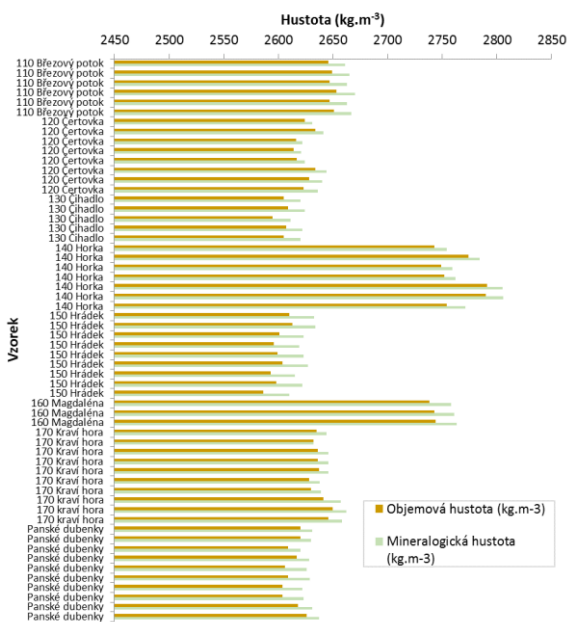
Hodnoty pórovitosti naměřené na vzorcích z lokalit se pohybovaly v intervalu 0,24–0,91 %. Nejvyšší pórovitosti byly naměřeny na vzorcích granitu (GC a GB) z lokality Hrádek, kdy byla naměřena pórovitost až 0,91 %. Naopak nejnižší hodnoty kolem 0,26 % byly zjištěny na vzorcích z lokality Čertovka u vzorků z vrtu TIV1, odebraných z hloubek 68 m a 90 m. Vzorky z povrchu vykazovaly nepatrně vyšší hodnoty kolem 0,44 %. Hodnoty kolem 0,35 % byly naměřeny na vzorcích granulitu z lokality Kraví hora. Granodiority z lokality Březový potok vykazovaly pórovitost kolem 0,6 %. Výsledky naměřených pórovitostí jsou uvedeny v Tab. 30.

Pórovitosti tak odpovídají čerstvým horninám, hodnoty u granitoidů se pohybují kolem 0,5 % a níže. Vyšší hodnoty pórovitostí z lokalit Hrádek (GC) a Magdaléna (TT) pravděpodobně odrážejí navětrání odebraných vzorků z povrchu.



Obr. 5 Hustoty vzorků (kg m⁻³) z lokalit

Obr. 6 Pórovitosti vzorků (%) z lokalit

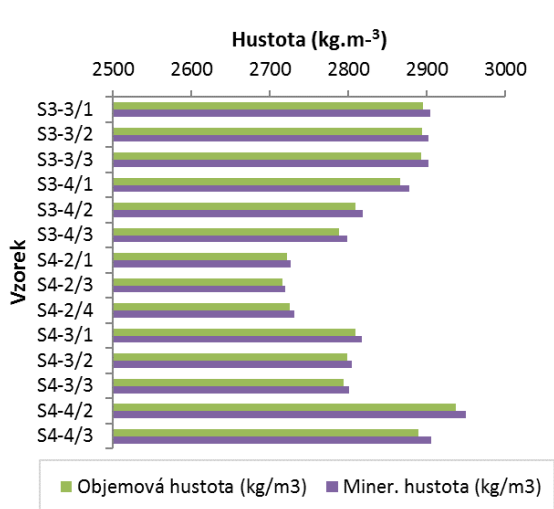


Obr. 7 Hustoty vzorků (kg m⁻³) z lokalit

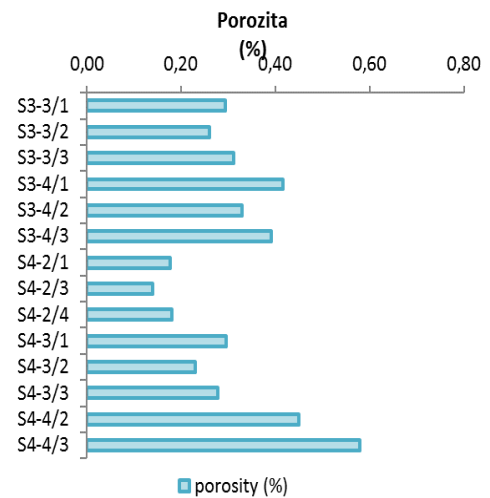
Obr. 8 Pórovitosti vzorků (%) z lokalit

Mineralogické hustoty sledovaných hornin jsou objektivním ukazatelem jejich látkového složení. Nejvyšší hustoty tak byly naměřeny u vzorků syenitů z lokality Horka (2777 kg m⁻³) a Magdaléna (2761 kg m⁻³) v závislosti na obsahu mafické složky. Naopak nejnižší hodnoty mineralogických hustot byly naměřeny na lokalitě Hrádek. Granity z lokality Hrádek (GC – typ Čerínek a GB – typ Boršov) vykazují velmi podobné hodnoty mineralogické hustoty kolem 2623 kg m⁻³, hodnoty tak odpovídají leukokratickým granitům a vypovídají o látkové stabilitě obou lokalit. Podrobné výsledky jsou zobrazeny na Obr. 5 a Obr. 7 a uvedeny v Tab. 30.

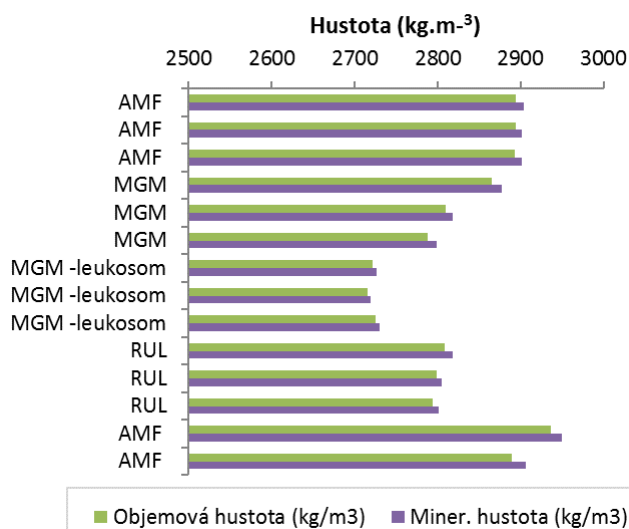
Pórovitosti u vzorků z jader S-3 a S-4 na lokalitě PVP Bukov dosahují hodnot mezi 0,14–0,58 %. Hodnoty poukazují na nízké narušení těchto hornin. Výsledky pórovitostí pro jednotlivé vzorky a horninové typy jsou zobrazeny na Obr. 10 a Obr. 12.



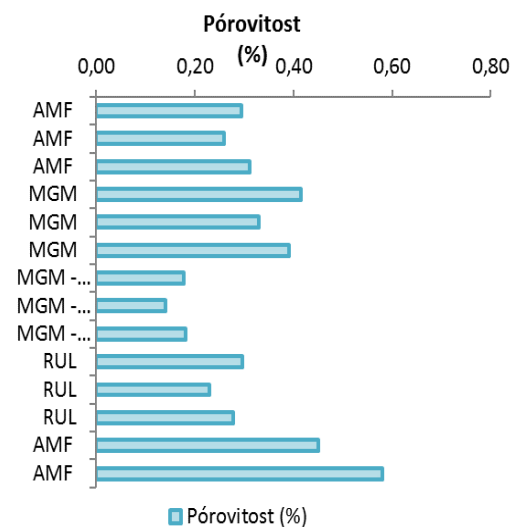
Obr. 9 Hustoty (kg m⁻³) vzorků jader S-3 a S-4



Obr. 10 Pórovitosti (%) vzorků jader S-3 a S-4



Obr. 11 Hustoty (kg m⁻³) vzorků jader S-3 a S-4 v závislosti na typu horniny



Obr. 12 Pórovitosti (%) vzorků S-3 a S-4 vs. horninový typ

Nejvyšší hustoty byly naměřeny u vzorků amfibolitů S3-3 a S4-4 (v rozmezí 2901–2950 kg m⁻³). Naopak nejnižší mineralogické hustoty byly sledovány u vzorků migmatitů S4-2, S3-2 a S3-4 (2720–2799 kg m⁻³) (Obr. 11). Podrobnější výsledky jsou uvedeny ve zprávě Bukovská et al. 2017.

Mineralogická hustota intruzív je nejvíce závislá na jejich color indexu, který zapříčiňuje nejvyšší diference v hodnotách, méně mineralogickou hustotu ovlivňuje poměr křemen – živec v modálním složení (tabelární hustota křemene je 2650 kg m⁻³, plagioklasů – podle bazicity (albit – oligoklas) kolem 2620–2640 kg m⁻³, ortoklasu 2560 kg m⁻³. Hustota tmavých komponent (biotit, amfiboly, pyroxeny) se pohybuje přibližně v rozmezí 2700–3200 kg m⁻³. Objemová hustota je dána vztahem mezi pórovitostí a mineralogickou hustotou (Hanák et al. 2017).

 SÚRAO	Migrační procesy hornin Českého masivu	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 333/2018

V práci Havlové et al. (2015a) bylo provedeno vyhodnocení dostupných hodnot pórovitostí pro horniny Českého masivu. Byl posouzen soubor 71 vzorků granitických hornin z vrtů bez extrémních vzorků (např. cínovec s porozitou 1,5–4,9 %). V tomto souboru se hodnoty pórovitostí pohybovaly v rozsahu 0,23–2,70 % se střední hodnotou 0,63 %. Námi naměřené hodnoty se pohybují kolem střední hodnoty $0,55 \pm 0,20$ %.

4.4 Stanovení kationtové výměnné kapacity hornin

Vyhodnocení kationtové výměnné kapacity horninového materiálu může poskytnout relevantní informace o sorpci radionuklidů na granitické horniny, např. informace o mechanismu sorpce radionuklidů nebo o dominantních sorbentech ve struktuře horninové matrice. Významnými sorbenty v horninových materiálech jsou např. vrstevnaté minerály, tzv. fylosilikáty (slídy, jíly), jež jsou charakteristické několika typy sorpčních míst. Sorpce na tato sorpční místa může probíhat iontovou výměnou, na což upozorní právě vysoká hodnota kationtové výměnné kapacity.

4.4.1 Horninové vzorky a jejich úprava

Kationtová výměnná kapacita (CEC) byla stanovena na vybraných horninových vzorcích, jež se od sebe významně odlišovaly obsahem fylosilikátů. Byly vybrány následující vzorky, reprezentující určité typy horninových materiálů s cílem osvětlit mechanismus sorpce kationtů na jednotlivé minerály obsažené v hornině: Durbachit PZV1 (lokalita Horka) s vysokým obsahem slíd a draselných živců, granit TIV1 (lokalita Čertovka) s vysokým obsahem draselných živců a nízkým obsahem slíd, granit PDV1 s vysokým obsahem křemene a vyšším obsahem muskovitu, granit S3-3 (PVP Bukov) s nízkým obsahem živců a slíd, ovšem s vyšším obsahem hornblendu a plagioklasu, a granit 2S4-4 (PVP Bukov) s 50 hm. % obsahem magneziohornblendu a 35 hm. % plagioklasu. Přehled vybraných horninových vzorků je uveden v Tab. 2.

Před samotným stanovením kationtové výměnné kapacity bylo definované množství drceného horninového vzorku dva měsíce louženo v deionizované vodě, aby se vyplavily nečistoty a aby došlo k vymytí kationtů, které nejsou pevně navázány ve struktuře horniny. Během loužení byl celý objem kapalné fáze pravidelně odebírán, k horninovým vzorkům byla následně přidána čerstvá deionizovaná voda a loužení dále pokračovalo. V odebrané kapalné fázi byl stanoven obsah základních kationtů (Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+}) metodou AAS a byl tak sledován pokles koncentrace kationtů v kapalné fázi, dokud nebyla koncentrace kationtů konstantní a pohybovala se v řádu setin mg l^{-1} . Delší loužení, které by vedlo k dosažení koncentrací kationtů v kapalné fázi pod limitem detekce, nebylo možné, vzhledem k možnému riziku rozpuštění fylosilikátů. Koncentrace kationtů v kapalné fázi byla následně přepočítána na celkové množství kationtů vyloužených z horninové matrice, viz Tab. 5.

 SÚRAO	Migrační procesy hornin Českého masivu	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 333/2018

Tab. 5 Výsledky loužení horninových vzorků před stanovením CEC

Vzorek	Navážka	Celkové množství vyloužených kationtů (mg)			
		Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
PZV1	10,0469	0,110	1,325	0,687	0,548
TIV1	18,0329	0,261	1,361	0,024	0,143
PDV1	13,4819	0,165	1,299	0,066	0,118
S3-3	7,1545	0,115	1,506	0,302	0,489
2S4-4	13,0622	0,285	0,510	0,366	1,086

4.4.2 Stanovení CEC

CEC a obsazení kationtů na výměnných místech byly stanoveny na základě certifikované metodiky č. j. SÚJB/ONRV/15452/2014 (Červinka R. 2014). V metodice je využíván komplex Cu(II)triethyltetraminu (zkráceně Cu(II)-trienem) k výměně kationtů v mezivrstvi fylosilikátů za kation Cu²⁺. Výsledkem stanovení je hodnota kationtové výměnné kapacity horninového materiálu CEC (v meq 100 g⁻¹), jež odpovídá množství mědi, která byla navázána (tj. vyměněna za kationty) na horninový materiál, a dále hodnota CEC_{sum} (v meq 100 g⁻¹), jež odpovídá celkovému množství vyměněných kationtů. Tyto dvě hodnoty by měly být v rovnováze.

Tento postup je rutinně užíván ke stanovení kationtové výměnné kapacity jílových materiálů (bentonitů) a hodnoty CEC se v závislosti na vlastnostech konkrétního bentonitu pohybují v řádu desítek meq 100 g⁻¹. CEC vybraných bentonitů byly stanoveny např. v rámci projektu TIP. Pro ilustraci, stanovená CEC pro bentonit Rokle byla 80 meq 100 g⁻¹; pro bentonit B75 56,8 meq 100 g⁻¹ a pro bentonit S65 71,5 meq 100 g⁻¹ (Gondolli et al. 2013).

Výsledné hodnoty CEC horninových vzorků jsou uvedeny v Tab. 6. Jak je vidět, CEC je u všech vzorků velice nízká a pohybuje se v řádu desetin meq 100 g⁻¹, což je o dva řády nižší hodnota než u výše uvedených bentonitových materiálů. Takto nízká CEC je dána nízkým obsahem kationtových výměnných minerálů, např. vrstevnatých silikátů (biotit, muskovit, smektit, kaolinit, chlorit, atd.). Ač se jedná o nízké hodnoty CEC, lze ve výsledných datech pozorovat jistý trend. Nejvyšší CEC byla stanovena na vzorku PZV1, který obsahoval nejvyšší množství biotitu. Naopak přítomnost draselných živců, plagioklasu ani magneziohornblendu nevedla k vyšší kationtové výměnné kapacitě. Rovněž bilance vyměněných kationtů CEC_{sum} a mědi CEC je přibližně v rovnováze pouze u vzorku PZV1 (0,45 meq 100 g⁻¹ kationtů vs. 0,38 meq 100 g⁻¹ mědi), viz Tab. 6. U ostatních vzorků, kde je CEC i řádově nižší, bilance vyměněných kationtů a mědi neodpovídá vůbec.

To je dáno právě nízkou výměnnou kapacitou materiálu, kdy stanovení takovýchto hodnot CEC je zatíženo tak velkou chybou, že z výsledků nelze činit hlubší závěry. Bylo by tedy vhodné zvážit použitelnost metody s Cu(II)-trienem pro stanovení nízkých CEC hornin. Pro srovnání, pro české bentonity se hodnoty CEC pohybují v rozpětí 56,8 – 71,5 mmol 100 g⁻¹ (Červinka et al. 2018).

 SÚRAO	Migrační procesy hornin Českého masivu	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 333/2018

Tab. 6 Hodnoty CEC horninových vzorků metodou s Cu(II)-trienem

Hornina	Frakce	CEC (meq 100 g ⁻¹)	CEC _{sum} (meq 100 g ⁻¹)	Obsah slíd ^a (hm. %)
PZV1	B	0,38	0,45	13
TIV1	C	0,07	0,13	5,5
PDV1	C	0,09	0,18	7
D2	C	n.a.	n.a.	5,5
S3-3	C	0,27	0,43	4
S3-4	C	n.a.	n.a.	4
S4-3	C	n.a.	n.a.	4,5
2S4-2	C	n.a.	n.a.	11
2S4-4	C	0,07	0,25	< LOD

a) celkový obsah biotitu a muskovitu

n.a. nebylo stanoveno

4.4.3 Sorpční izotermy

Pro ověření hodnot CEC získaných metodou s Cu(II)-trienem byly na horninových vzorcích stanoveny CEC pomocí sorpčního experimentu s radioaktivním stopovačem ^{137}Cs a vyhodnocením Langmuirovy izotermy:

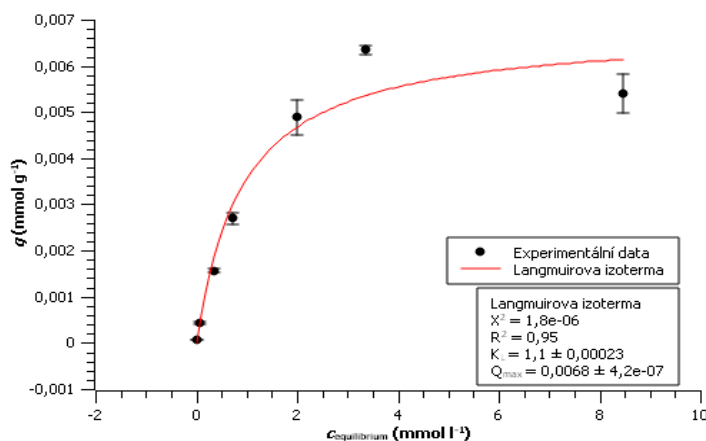
$$q_k = \frac{K_L \cdot C_k \cdot Q_{\max}}{(1 + K_L \cdot C_k)} \quad (4-5)$$

kde q_k je koncentrace radionuklidu v pevné fázi, C_k je koncentrace radionuklidu v kapalné fázi, K_L je koeficient Langmuirovy izotermy (rovnovážná reakce rovnice adiční reakce), Q_{\max} je koeficient Langmuirovy izotermy (maximálně dosažitelná koncentrace sledované složky v pevné fázi).


Langmuirova izoterma je typickým příkladem nelineární izotermy shora konkávního tvaru a je odvozena za předpokladu, že se sorpce uskutečňuje adiční reakcí. Koeficient Langmuirovy izotermy Q_{\max} (v mmol g^{-1}) kvantifikuje maximálně dosažitelnou koncentraci sledované složky v pevné fázi a při sorpci radionuklidu iontovou výměnou je ekvivalentní hodnotě kationtové výměnné kapacity (CEC) daného materiálu (Štamberg 1998).

Pro lepší přehlednost bude v dalším textu kationtová výměnná kapacita stanovená Langmuirovou izotermou označována jako Q_{\max} (v mmol g^{-1}). Tato metoda byla použita rovněž např. v projektu TIP, kde byly kationtové výměnné kapacity pomocí sorpčních izoterm stanoveny pro různě modifikované bentonity S65 a B75. Pro ilustraci, výsledná hodnota Q_{\max} pro bentonit B75 byla $0,68 \text{ mmol g}^{-1}$ a pro bentonit S65 byla $0,71 \text{ mmol g}^{-1}$ (Gondolli et al. 2013).

Izotermy na horninách byly realizovány v rozsahu koncentrací cesia $1 \cdot 10^{-5}$ – $9 \cdot 10^{-3} \text{ mol l}^{-1}$ na frakci C všech studovaných vzorků. Výjimku tvořil materiál PZV1, u kterého byla sorpční izoterma vytvořena na frakci B. Menší horninová frakce byla nakonec zvolena z důvodu problematiky vyhodnocení sorpčních experimentů a jejich izoterm na frakci C. Patrně vlivem heterogenity složení pevné fáze na frakci C nebylo možné proložit výsledné body izotermy Langmuirovou rovnicí. Stejně jako u studia sorpce radionuklidů na horninové vzorky byly v experimentálních pracích použity navážky pevné fáze 0,5 g a objem kapalné fáze 5 ml, experiment trval rovněž 7 dní. Pro ilustraci je na Obr. 13 uvedena výsledná sorpční izoterma cesia na materiálu PZV1.



Obr. 13 Sorpční izoterma cesia na vzorku PZV1, $c(\text{Cs}) = 1 \cdot 10^{-5}$ – $9 \cdot 10^{-3} \text{ mol l}^{-1}$, frakce B: 0,125–0,063 mm

 SÚRAO	Migrační procesy hornin Českého masivu	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 333/2018

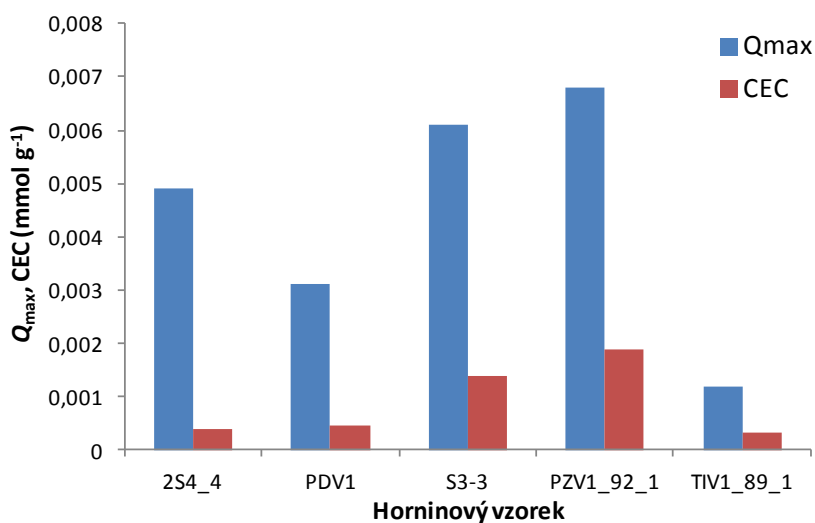
Výsledné Q_{\max} studovaných hornin jsou uvedeny v Tab. 7. Jedná se o velice nízké hodnoty, které jsou důsledkem mineralogického složení horninových vzorků, konkrétně nízkého obsahu kationtových výměnných minerálů. Pro porovnání jsou v tabulce uvedeny rovněž hodnoty CEC získané metodou s Cu(II)-trienem a přepočtené na jednotky mmol g^{-1} . Z výsledků je patrné, že ačkoliv obě hodnoty, tzn. Q_{\max} a CEC, popisují kationtovou výměnnou kapacitu horninového materiálu a měly by být tedy totožné, vzájemně se od sebe liší. Řádově se ovšem shodují a kopírují stejný trend, kdy oběma metodami bylo dosaženo nejvyšších hodnot výměnných kapacit na materiálu PZV1 s vysokým obsahem slíd (Obr. 14). Rozdílné hodnoty Q_{\max} a CEC jsou patrně dány schopností Cs se vázat i na sorpční místa (či se vyměňovat s K^+) z míst, která jsou pro molekulu Cu(II)-trienem pravděpodobně nedostupné (vzhledem k organické povaze této sloučeniny lze předpokládat i velký rozměr molekuly).

Stejně jako při porovnání CEC hornin a bentonitů, i hodnoty Q_{\max} hornin jsou o dva řády nižší než Q_{\max} bentonitů (viz výše).

Tab. 7 Hodnoty kationtových výměnných kapacit hornin vypočtených z Langmuirovy izotermy (Q_{\max}) a metodou s Cu(II)-trienem (CEC)

Hornina	Frakce	Q_{\max} (mmol g^{-1})	CEC (mmol g^{-1})
PZV1	B	0,0068	0,0019
TIV1	C	0,0012	0,0003
PDV1	C	0,0031	0,0005
D2	C	0,0033	n.a.
S3-3	C	0,0061	0,0014
S3-4	C	0,0046	n.a.
S4-3	C	0,0045	n.a.
2S4-2	C	0,0036	n.a.
2S4-4	C	0,0049	0,0004

n.a. nebylo stanoveno



Obr. 14 Hodnoty kationtových výměnných kapacit hornin vypočtených z Langmuirovy izotermy (Q_{max}) a metodou s Cu(II)-trienem (CEC)

Na základě výsledků lze tedy konstatovat, že k sorpci radionuklidů mechanismem iontové výměny dochází jen na sorpčních místech vrstevnatých silikátů, jež jsou ve struktuře hornin zastoupeny pouze minoritně, a sorpce na ostatní minerály (plagioklas, hornblend, atd.) probíhá patrně tvorbou povrchových komplexů. Z výsledků rovněž vyplývá, že stanovení kationtových výměnných kapacit horninových vzorků je problematické a ani jedna z použitých metod není zcela vhodná pro přesnější stanovení nízkých hodnot výměnných kapacit.

 SÚRAO	Migrační procesy hornin Českého masivu	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 333/2018

5 Sorpce radionuklidů na granitické horniny

5.1 Metodika

Principem statického sorpčního experimentu je interakce známého množství pevné fáze (sorbentu) m (g) a známého objemu kapalné fáze V (l) o dané koncentraci c_0 (mol l⁻¹) nebo objemové aktivitě A_0 (Bq l⁻¹; cpm atd.) studovaného radionuklidu. Reakční směs, obsahující pevnou fázi, kapalnou fázi a radionuklid, je umístěna po určitou dobu v uzavíratelné vzorkovnici (zkumavka, baňka, lahvička atd.) a je pravidelně promíchávána. Míchání je realizováno dle možností kontinuálně na třepačce, nebo manuálně periodicky (např. 1× denně). Po uplynutí daného časového intervalu jsou od sebe pevná a kapalná fáze odděleny a je stanovena koncentrace (aktivita) radionuklidu c (resp. A) v kapalně fázi. Sorpce je popisována hodnotami rozdělovacího distribučního koeficientu R_d a výtěžku sorpce η_{sorpce} , které jsou dány vztahy:

$$R_d = \frac{(c_0 - c) \cdot V}{c \cdot m}, \quad (5-1)$$

$$\eta_{\text{sorpce}} = \frac{(c_0 - c)}{c_0} \cdot 100, \quad (5-2)$$

kde c_0 je počáteční koncentrace sledované látky (mol l⁻¹), c je koncentrace sledované látky ve vodné fázi (mol l⁻¹), V je objem kapalné fáze (l), m je hmotnost pevné fáze (g).


V experimentálních pracích byl poměr pevné (g) a kapalné fáze (ml) $s : l = 1 : 10$, navážka horninového materiálu byla 0,5 g. Sorpční experiment trval 7 dní a sorpce radionuklidu byla sledována po 0,04; 0,31; 1; 2; 4 a 7 dnů kontaktu fází.

Na horninových vzorcích byla studována sorpce následujících specií radionuklidů:

- ¹³⁷Cs; CsCl ($c = 2 \cdot 10^{-5}$ mol l⁻¹) značený ¹³⁷CsCl v 0,1 M HCl ($A_0 \sim 800$ Bq ml⁻¹)
- ⁸⁵Sr; SrCl₂ ($c = 2 \cdot 10^{-5}$ mol l⁻¹) značený ⁸⁵SrCl₂ v 0,5 M HCl ($A_0 \sim 800$ Bq ml⁻¹)
- SeO₃²⁻ ve formě Na₂SeO₃ ($c = 2 \cdot 10^{-5}$ mol l⁻¹)
- UO₂²⁺ ve formě UO₂(NO₃)₂ ($c = 2,6 \cdot 10^{-4}$ mol l⁻¹)

Cesium se řadí mezi kritické radionuklidy vyskytující se výhradně jako kation Cs(I), který nevytváří v roztoku komplexy. K jeho sorpci na hydroxylové skupiny daných minerálů nedochází vlivem velké velikosti a nízkému náboji Cs(I), naproti tomu vysoce efektivní je jeho sorpce na slídové minerály kationtovou výměnou a povrchovou komplexací (Söderlund et al. 2014).

Stroncium patří mezi zástupce kationových slabě se sorbujících kritických radionuklidů. Vyskytuje se ve formě Sr(II), při pH > 9 nebo v přítomnosti karbonátů tvoří karbonátové komplexy a hydroxokomplexy. Hlavním sorpčním mechanismem v horninovém prostředí je iontová výměna, při které je sorpce kontrolována zejména hodnotami kationové výměnné kapacity (CEC) a pH (Carbol a Engkvist 1997).

 SÚRAO	Migrační procesy hornin Českého masivu	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 333/2018

Selen je zástupcem redox-senzitivních aniontových kritických radionuklidů. Vyznačuje se komplikovanou chemií, v oxidačních podmínkách se vyskytuje jako seleničitan (SeO_3^{2-}) a selenan (SeO_4^{2-}), v mírně redukčních podmínkách jako elementární Se a v redukčních podmínkách je dominantní specií selenid (HSe^{2-}). Pro experimenty byl zvolen selen ve formě SeO_3^{2-} , u kterého může docházet za daných podmínek k sorpci na horninový materiál. SeO_4^{2-} se naproti tomu v prostředí krystalických hornin chová jako nesorbující se radionuklid (Havlová et al. 2013).

Uran patří mezi redox-senzitivní kritické radionuklidy a v geosféře se vyskytuje převážně ve dvou oxidačních stupních U(IV) a U(VI). Jeho sorpce na horniny závisí na pH systému, při nízkém pH jsou uranylové ionty $(\text{UO}_2)^{2+}$ sorbovány kationovou výměnou, s rostoucím pH klesá sorpce uranylu jakožto důsledek tvorby nesorbujících se U(VI)-karbonátových komplexů (Hakanen et al. 2014).

5.1.1 Popis pevné a kapalně fáze

5.1.1.1 Popis pevné fáze (charakterizace použitých horninových frakcí)

Sorpce radionuklidů byla sledována na vybraných horninových vzorcích z potenciálních lokalit pro umístění HÚ. Jejich přehled a charakterizace jsou uvedeny v Tab. 2.

Z každého vzorku vybraných hornin bylo připraveno pět zrnitostních frakcí (A: < 0,063 mm, B: 0,125–0,063 mm, C: 0,63–0,125 mm, D: 0,8–0,63 mm a E: > 0,8 mm), které byly následně analyzovány rentgenovou difrakcí na práškovém difraktometru. Mineralogické složení jednotlivých použitých frakcí je uvedeno v Tab. 4.

Vybrané frakce pro sorpční experimenty (C: 0,63–0,125 mm a frakce D: 0,8–0,63 mm) byly následně promyty syntetickou granitickou vodou SGW2, vysušeny na vzduchu a použity pro sorpční experimenty. Navážka horninového materiálu byla 0,5 g.

5.1.1.2 Vlastnosti použitých roztoků

Pro sorpční experimenty byla použita syntetická granitická voda označena SGW2 (Červinka a Gondolli 2016), jejíž složení je uvedeno v Tab. 8.

Tab. 8 Chemické složení a pH syntetické granitické vody SGW2 (Červinka a Gondolli 2016)

Specie	SGW2 (mg l ⁻¹)
Na ⁺	16,5
K ⁺	2,14
Ca ²⁺	37,3
Mg ²⁺	8,32
Cl ⁻	3,49
SO ₄ ²⁻	21,9
HCO ₃ ⁻	168,7
pH	8,2

 SÚRAO	Migrační procesy hornin Českého masivu	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 333/2018

5.2 Výsledky a vyhodnocení


5.2.1 Cesium

Výsledné hodnoty R_d cesia na studovaných vzorcích jsou uvedeny na Obr. 15 a v Tab. 9 a Tab. 10. Hodnoty R_d se pohybovaly v rozmezí 9–129 ml g⁻¹ na frakci C a 8–104 ml g⁻¹ na frakci D. Nízkých hodnot bylo v případě obou frakcí dosaženo na granitu TIV1 (lokalita Čertovka) a nejvyšší hodnoty R_d byly získány na vzorcích durbachitu PZV1 (lokalita Horka). Tyto dva horninové vzorky se od sebe vzájemně významně lišily v mineralogickém složení (viz Tab. 4). Granit TIV1 (lokalita Čertovka) obsahoval téměř 50 hm. % křemene (PZV1 obsahoval 25 hm. % křemene) a současně durbachit PZV1 (lokalita Horka) obsahoval výrazně vyšší množství biotitu (19,5 hm. % pro frakci C). Obsah ostatních minerálů byl srovnatelný (viz Tab. 4).

Nízkých hodnot R_d okolo 10 ml g⁻¹ bylo dosaženo u obou frakcí na vzorcích D2, 2S4-4 a GRB. Tyto vzorky se vyznačovaly nízkým (granit D2 – lokalita Čihadlo, granulit GRB – lokalita Kraví hora) nebo žádným (amfibolit 2S4-4 – PVP Bukov/Kraví hora) obsahem biotitu a 50 hm. % obsahem magneziohornblendu (amfibolit 2S4-4 – PVP Bukov/Kraví hora). U vzorku granodioritu BT (lokalita Březový potok) a granitu GB (lokalita Hrádek) se výsledná hodnota R_d pohybovala v rozmezí 22–32 ml g⁻¹. Tato dvojice se vyznačuje nižším obsahem biotitu (pod 10 hm. %) a vyšším zastoupením plagioklasu ve vzorku (30–42 hm. %).

U zbývajících horninových vzorků, tzn. vzorků z PVP Bukov (S3-3, S3-4, S4-3, 2S4-2), byly hodnoty R_d v rozmezí 30–40 ml g⁻¹ na frakci C a 70–110 ml g⁻¹ na frakci D. Obsah slídových minerálů v těchto vzorcích byl nižší než v durbachitu PZV1 (lokalita Horka), vzorky byly ovšem zajímavé obsahem amfibolického minerálu hornblendu a vysokým obsahem plagioklasu (okolo 50 hm. %). Na vzorcích z PVP Bukov byla pozorována zhruba dvojnásobná sorpce na frakci D o větší velikosti zrn ve srovnání s frakcí C. Příčina tohoto jevu, ale není zcela jasná. Obě frakce C a D se od sebe výrazně nelišily v mineralogickém složení, nedošlo tedy k nabohacení některých minerálů v jedné frakci vlivem drcení a síťování, které by mělo za následek vyšší záchyt cesia. Odlišná situace byla pozorována například u durbachitu PZV1 (lokalita Horka), kde byla pozorována vyšší sorpce na frakci C, jejíž obsah biotitu byl o polovinu vyšší, než na frakci D (viz Tab. 4). Vzhledem k tomu, že vyšší záchyt cesia byl u vzorků z PVP Bukov pozorován na frakci D, neměl na sorpci vliv ani větší sorpční povrch, jež byl uvažován u menší zrnitostní frakce C. Ostatní podmínky experimentu byly velmi podobné pro obě frakce, nebyly tak pozorovány ani rozdíly v elektrochemických parametrech pH (pH ~ 8,5) a E_h (E_H ~ 400 mV).

Z hodnot výsledných rozdělovacích distribučních koeficientů vyplývá, že u studovaných vzorků je cesium sorbováno zejména na horniny s obsahem slídy, plagioklasu a amfibolu. Slídy, patřící mezi fylosilikáty, a amfiboly, řadící se mezi inosilikáty, zadržují cesium mechanismem iontové výměny. Více informací o mechanismu záchytu cesia na horniny a minerály je uvedeno ve zprávě Havlové et al. (2017).

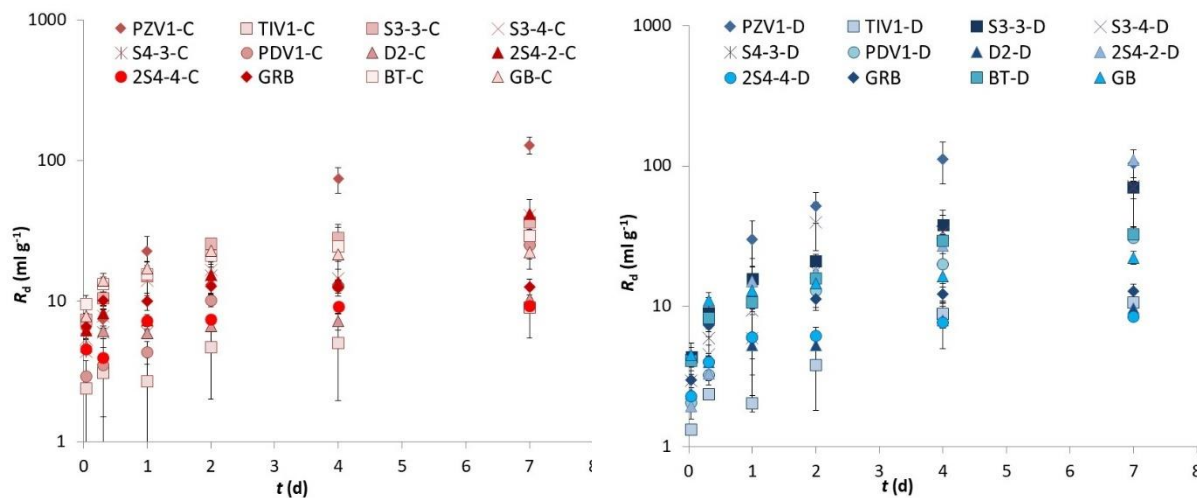
 SÚRAO	Migrační procesy hornin Českého masivu	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 333/2018

Tab. 9 Hodnoty R_d cesia včetně jejich rozšířených standardních nejistot na frakcích C horninových vzorků z potenciálních lokalit, $c(\text{Cs}) = 2 \cdot 10^{-5} \text{ mol l}^{-1}$, frakce C: 0,63–0,125 mm

Horninový vzorek	Doba sorpce (dny)					
	0,04	0,31	1	2	4	7
PZV1-C	6,4 ± 1,2	7,4 ± 1,2	22,9 ± 2,4	13,1 ± 1,6	74,1 ± 6,5	129 ± 11
TIV1-C	2,4 ± 0,9	3,1 ± 1,0	2,7 ± 0,9	4,7 ± 1,1	5,1 ± 1,1	9,0 ± 1,3
PDV1-C	2,9 ± 1,0	3,5 ± 1,0	4,4 ± 1,0	10,2 ± 1,4	12,8 ± 1,6	25,2 ± 2,6
D2-C	4,8 ± 1,1	6,2 ± 1,1	6,0 ± 1,1	6,7 ± 1,2	7,2 ± 1,2	10,3 ± 1,4
S3-3-C	7,4 ± 1,2	10,6 ± 1,4	15,2 ± 1,8	25,9 ± 2,6	28,6 ± 2,8	36,6 ± 3,4
S3-4-C	5,4 ± 1,1	7,9 ± 1,3	14,1 ± 1,7	16,7 ± 1,9	24,6 ± 2,6	41,1 ± 3,9
S4-3-C	4,4 ± 1,0	6,0 ± 1,1	6,0 ± 1,1	15,2 ± 1,8	14,5 ± 1,7	29,1 ± 2,9
2S4-2-C	6,2 ± 1,2	8,3 ± 1,3	7,4 ± 1,6	15,4 ± 1,8	13,7 ± 2,4	42,0 ± 3,2
2S4-4-C	4,6 ± 1,1	4,0 ± 1,0	7,3 ± 1,2	7,5 ± 1,2	9,2 ± 1,4	9,3 ± 1,4
GRB-C	6,6 ± 1,2	10,2 ± 1,4	10,0 ± 1,4	12,8 ± 1,6	12,5 ± 1,6	12,7 ± 1,6
BT-C	9,6 ± 1,4	13,3 ± 1,6	15,6 ± 1,8	21,0 ± 2,7	24,5 ± 3,1	29,1 ± 3,5
GB-C	7,9 ± 1,3	14,1 ± 1,7	17,2 ± 1,9	22,9 ± 2,4	21,5 ± 2,3	22,3 ± 2,3

Tab. 10 Hodnoty R_d cesia včetně jejich rozšířených standardních nejistot na frakcích D horninových vzorků z potenciálních lokalit, $c(\text{Cs}) = 2 \cdot 10^{-5} \text{ mol l}^{-1}$, frakce D: 0,8–0,63 mm

Horninový vzorek	Doba sorpce (dny)					
	0,04	0,31	1	2	4	7
PZV1-D	4,1 ± 1,0	7,4 ± 1,3	30,0 ± 3,3	51,7 ± 4,7	111 ± 10	104 ± 9,0
TIV1-D	1,3 ± 0,9	2,4 ± 0,9	2,0 ± 0,9	3,8 ± 1,0	8,9 ± 1,3	10,6 ± 1,5
PDV1-D	2,1 ± 0,9	3,3 ± 1,0	6,0 ± 1,1	12,9 ± 1,6	19,9 ± 2,2	30,7 ± 2,9
D2-D	2,4 ± 0,9	4,0 ± 1,0	5,3 ± 1,1	5,3 ± 1,1	7,9 ± 1,3	9,7 ± 1,4
S3-3-D	4,4 ± 1,0	7,2 ± 1,4	19,9 ± 1,9	12,3 ± 2,4	38,5 ± 3,6	71,0 ± 6,2
S3-4-D	4,1 ± 1,0	4,5 ± 1,0	3,9 ± 1,2	48,4 ± 3,8	41,3 ± 3,3	89,1 ± 6,5
S4-3-D	3,0 ± 1,0	5,9 ± 1,1	9,4 ± 1,4	20,9 ± 2,0	34,2 ± 3,3	72,0 ± 6,7
2S4-2-D	1,9 ± 0,9	3,3 ± 1,0	15,0 ± 1,6	17,6 ± 1,7	26,9 ± 3,8	111 ± 12
2S4-4-D	2,3 ± 0,9	4,0 ± 1,0	6,0 ± 1,1	6,2 ± 1,1	7,7 ± 1,2	8,4 ± 1,3
GRB-D	3,0 ± 1,0	7,3 ± 1,2	11,1 ± 1,5	11,3 ± 1,5	12,2 ± 1,6	12,8 ± 1,6
BT-D	4,1 ± 1,0	8,2 ± 1,3	10,7 ± 1,5	15,8 ± 2,2	29,2 ± 3,5	32,7 ± 3,8
GB-D	4,5 ± 1,0	11,0 ± 1,5	13,0 ± 1,6	14,6 ± 1,7	16,4 ± 1,9	22,2 ± 2,3




Obr. 15 Hodnoty R_d cesia včetně jejich rozšířených standardních nejistot na horninových vzorcích z potenciálních lokalit, vlevo: frakce C (0,63–0,125 mm), vpravo: frakce D (0,8–0,63 mm), $c(\text{Cs}) = 2 \cdot 10^{-5} \text{ mol l}^{-1}$

5.2.2 Stroncium

Podle odborné literatury je stroncium v krystalických horninách preferenčně sorbováno na hornblend a slídové minerály, naproti tomu křemen a živce jsou charakteristické svým nízkým záchytem stroncium. Hlavním mechanismem sorpce stroncium na krystalické horniny v prostředí podzemní vody je nespecifická reversibilní iontová výměna a intenzita sorpce je dána hodnotou CEC pevné fáze (Crawford et al. 2006). Jak je vidět, vyšší obsah biotitu nemusí vést k vyššímu záchytnému koeficientu stroncium (PZV1, lokalita Horka), při jeho sorpci je tedy nezbytné uvažovat právě amfiboly přítomné např. ve vzorcích z PVP Bukov (Ticknor et al. 1989), pravděpodobně je ovšem nutno zaměřit se rovněž na funkci plagioklasu v krystalických horninách, neboť vyšších hodnot R_d bylo dosaženo na vzorcích s téměř 50 hm. % obsahem plagioklasu. Více informací o mechanismu záchytného koeficientu stroncium na horniny a minerály je uvedeno ve zprávě Havlové et al. (2017).

Výsledné hodnoty R_d stroncium na studovaných vzorcích jsou uvedeny na Obr. 16 a v Tab. 11 a Tab. 12. Hodnoty R_d jsou o řád nižší než v případě cesia, přičemž pouze nepatrně vyšších hodnot R_d bylo dosaženo na horninových frakcích C všech studovaných materiálů. R_d stroncium na frakce C studovaných vzorků se pohybovaly od 2,2 do 7,0 ml g⁻¹. R_d na frakcích D byly v rozmezí 1,2–5,9 ml g⁻¹. V případě obou frakcí byly nejnižší hodnoty R_d na materiálu TIV1 (lokalita Čertovka) a PDV1 a vyšší hodnoty byly pozorovány na frakcích vzorků z PVP Bukov (S3-3, S4-3, S3-4) a GB (granit, lokalita Hrádek). U vzorku BT (lokalita Březový potok), který obsahoval 9 hm. % biotitu a téměř 40 hm. % plagioklasu, bylo dosaženo nejvyšší hodnoty R_d na obou frakcích. Z výsledků tedy vyplývá, že menší zrnitostní frakce studovaných hornin vedla k vyšší hodnotě R_d pouze u migmatitu 2S4-2 (lokalita PVP Bukov/Kraví hora; 4,8 ml g⁻¹ vs. 1,6 ml g⁻¹). U ostatních materiálů byly hodnoty R_d totožné nebo se od sebe na jednotlivých frakcích lišily o jednotky, což odpovídá rozšířené standardní nejistotě stanovení R_d .

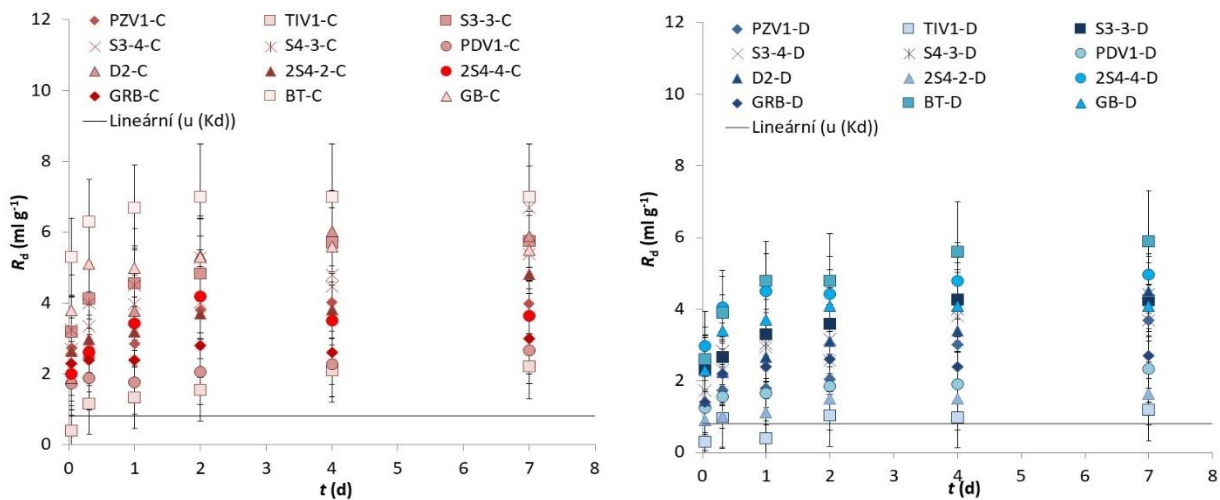
 SÚRAO	Migrační procesy hornin Českého masivu	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 333/2018

Tab. 11 Hodnoty R_d stroncia včetně jejich rozšířených standardních nejistot na frakcích C horninových vzorků z potenciálních lokalit, $c(\text{Sr}) = 2 \cdot 10^{-5} \text{ mol l}^{-1}$, frakce C: 0,63–0,125 mm

Horninový vzorek	Doba sorpce (dny)					
	0,04	0,31	1	2	4	7
PZV1-C	2,7 ± 0,9	2,7 ± 0,9	2,8 ± 1,0	3,8 ± 1,0	4,0 ± 1,0	4,0 ± 1,0
TIV1-C	< 0,8	1,2 ± 0,9	1,3 ± 0,9	1,5 ± 0,9	2,1 ± 0,9	2,2 ± 0,9
PDV1-C	1,7 ± 0,9	1,9 ± 0,9	1,8 ± 0,9	2,1 ± 0,9	2,3 ± 0,9	2,7 ± 0,9
D2-C	1,9 ± 0,9	2,6 ± 0,9	3,8 ± 1,0	5,4 ± 1,1	6,0 ± 1,1	5,9 ± 1,1
S3-3-C	3,2 ± 1,0	4,1 ± 1,0	4,6 ± 1,1	4,8 ± 1,1	5,7 ± 1,1	5,8 ± 1,1
S3-4-C	2,7 ± 0,9	3,4 ± 1,0	4,0 ± 1,0	4,0 ± 1,0	4,5 ± 1,0	5,4 ± 1,1
S4-3-C	3,3 ± 1,0	4,0 ± 1,0	4,5 ± 1,0	5,3 ± 1,1	4,8 ± 1,1	6,7 ± 1,2
2S4-2-C	2,7 ± 0,9	3,0 ± 1,0	3,2 ± 1,0	3,7 ± 1,0	3,8 ± 1,0	4,8 ± 1,1
2S4-4-C	2,0 ± 0,9	2,6 ± 0,9	3,4 ± 1,0	4,2 ± 1,0	3,5 ± 1,0	3,6 ± 1,0
GRB-C	2,3 ± 0,9	2,4 ± 0,9	2,4 ± 0,9	2,8 ± 0,9	2,6 ± 0,9	3,0 ± 1,0
BT-C	5,3 ± 1,1	6,3 ± 1,2	6,7 ± 1,2	7,0 ± 1,5	7,0 ± 1,5	7,0 ± 1,5
GB-C	3,8 ± 1,0	5,1 ± 1,1	5,0 ± 1,1	5,3 ± 1,1	5,6 ± 1,1	5,5 ± 1,1

Tab. 12 Hodnoty R_d stroncia včetně jejich rozšířených standardních nejistot na frakcích D horninových vzorků z potenciálních lokalit, $c(\text{Sr}) = 2 \cdot 10^{-5} \text{ mol l}^{-1}$, frakce D: 0,8–0,63 mm

Horninový vzorek	Doba sorpce (dny)					
	0,04	0,31	1	2	4	7
PZV1-D	1,3 ± 0,9	1,7 ± 0,9	1,8 ± 0,9	2,0 ± 0,9	3,0 ± 1,0	3,7 ± 1,0
TIV1-D	< 0,8	1,0 ± 0,9	< 0,8	1,0 ± 0,9	1,0 ± 0,9	1,2 ± 0,9
PDV1-D	1,3 ± 0,9	1,6 ± 0,9	1,7 ± 0,9	1,8 ± 0,9	1,9 ± 0,9	2,3 ± 0,9
D2-D	1,4 ± 0,9	2,2 ± 0,9	2,7 ± 0,9	3,1 ± 1,0	3,4 ± 1,0	4,5 ± 1,1
S3-3-D	2,3 ± 0,9	2,7 ± 0,9	3,3 ± 1,0	3,6 ± 1,0	4,3 ± 1,0	4,3 ± 1,0
S3-4-D	1,7 ± 0,9	2,3 ± 0,9	2,9 ± 1,0	2,6 ± 0,9	3,8 ± 1,0	3,7 ± 1,0
S4-3-D	2,4 ± 0,9	2,8 ± 1,0	3,0 ± 1,0	3,2 ± 1,0	4,0 ± 1,0	4,4 ± 1,0
2S4-2-D	0,9 ± 0,9	1,0 ± 0,9	1,1 ± 0,9	1,5 ± 0,9	1,5 ± 0,9	1,6 ± 0,9
2S4-4-D	3,0 ± 1,0	4,1 ± 1,0	4,5 ± 1,0	4,4 ± 1,0	4,8 ± 1,1	5,0 ± 1,1
GRB-D	1,4 ± 0,9	2,2 ± 0,9	2,4 ± 0,9	2,6 ± 0,9	2,4 ± 0,9	2,7 ± 0,9
BT-D	2,6 ± 0,9	3,9 ± 1,0	4,8 ± 1,1	4,8 ± 1,3	5,6 ± 1,4	5,9 ± 1,4
GB-D	2,3 ± 0,9	3,4 ± 1,0	3,7 ± 1,0	4,1 ± 1,0	4,1 ± 1,0	4,1 ± 1,0



Obr. 16 Hodnoty R_d stroncia včetně jejich rozšířených standardních nejistot na horninových vzorcích z potenciálních lokalit, vlevo: frakce C (0,63–0,125 mm), vpravo: frakce D (0,8–0,63 mm), $c(\text{Sr}) = 2 \cdot 10^{-5} \text{ mol l}^{-1}$

5.2.3 Selen

Seleničitan se na horninové materiály může sorbovat mechanismem ligandové výměny, přičemž sorpce vykazuje závislost na pH, kdy k záchytu seleničitanu na Fe-hydroxidy dochází při $\text{pH} < 9$ a k sorpci na železo obsahující silikátové minerály (např. biotit, chlorit) dochází při $\text{pH} < 8$. Dalším možným mechanismem sorpce selenu je redukce seleničitanu na Se^0 a Se^{II} . K té může dojít v přítomnosti sulfidů železa, v přítomnosti tzv. *green rust* nebo mikrobiální aktivitou. Na základě mineralogické analýzy studovaných horninových vzorků lze konstatovat, že z možných sorbentů selenu jsou ve studovaných horninách přítomny v malém množství pouze slídové minerály. Sorpce selenu na biotit je dána přítomností Fe^{II} v biotitu, jež je schopen redukce SeO_3^{2-} na Se^0 . Hornblend se jako potenciální sorbent selenu neuvádí (Söderlund et al. 2016). Více informací o mechanismu záchytu seleničitanu na horniny a minerály je uvedeno ve zprávě Havlové et al. (2017).

Výsledné hodnoty R_d seleničitanu na studovaných vzorcích jsou uvedeny na Obr. 17 a v Tab. 13 a Tab. 14. Hodnoty R_d na studovaných horninách se v případě frakce C pohybovaly v rozmezí $0,2\text{--}12 \text{ ml g}^{-1}$ a u frakce D v rozmezí $0,3\text{--}5 \text{ ml g}^{-1}$, na frakcích C studovaných hornin byla tedy pozorována nepatrně vyšší sorpce seleničitanu. Výjimku tvořil granit D2 (lokalita Čihadlo), jehož hodnota R_d byla $12,3 \text{ ml g}^{-1}$ na frakci C a $4,7 \text{ ml g}^{-1}$ na frakci D, v obou případech tedy výrazně vyšší než na ostatních studovaných horninách. Je ovšem otázka, co je příčinou vyšší sorpce selenu právě na granit D2 (lokalita Čihadlo). Z jeho mineralogie vyplývá, že neobsahuje výrazně vyšší obsah „zajímavých“ minerálů než ostatní horninové vzorky, obsah biotitu, muskovitu a kaolinitu se pohybuje v řádu prvních jednotek procent. U některých horninových vzorků docházelo k minimální sorpci, která byla menší než nejistota měření (pro $R_d \sim 0 \text{ ml g}^{-1}$ je $U_{R_d} < 0,8 \text{ ml g}^{-1}$). Z důvodu nedostatečné průkaznosti sorpce na daný materiál nejsou tyto výsledky rozdělovacího distribučního koeficientu R_d uvedeny v Tab. 13 a Tab. 14.

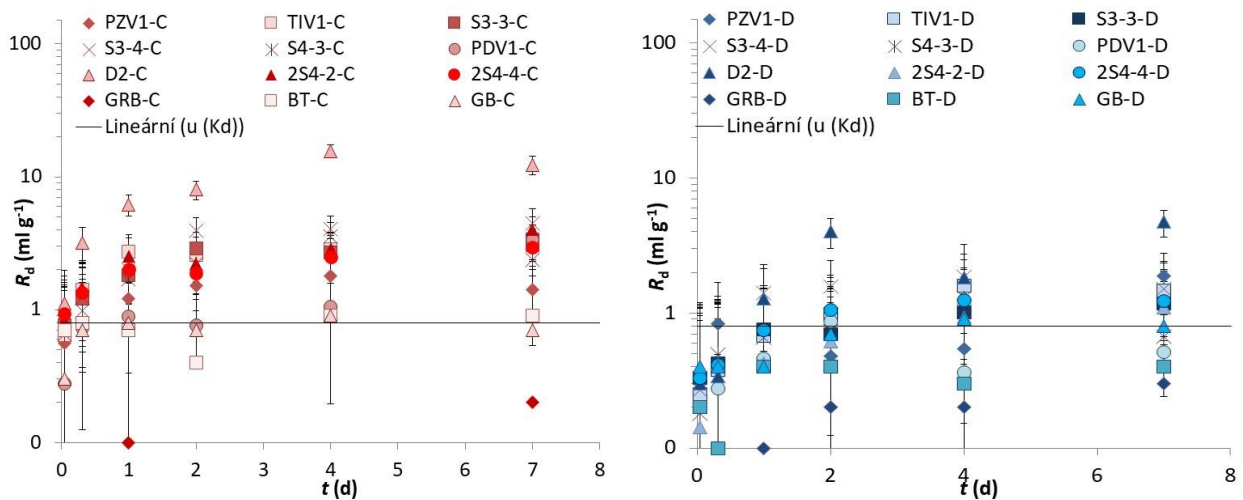
 SÚRAO	Migrační procesy hornin Českého masivu	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 333/2018

Tab. 13 Hodnoty R_d seleničitanu včetně jejich rozšířených standardních nejistot na frakcích C horninových vzorků z potenciálních lokalit, $c(\text{Se}) = 2 \cdot 10^{-5} \text{ mol l}^{-1}$, frakce C: 0,63–0,125 mm

Horninový vzorek	Doba sorpce (dny)					
	0,04	0,31	1	2	4	7
PZV1-C	< 0,8	< 0,8	1,2 ± 0,9	1,5 ± 0,9	1,8 ± 0,9	1,4 ± 0,9
TIV1-C	< 0,8	1,4 ± 0,9	2,7 ± 0,9	2,6 ± 0,9	2,8 ± 1,0	3,1 ± 1,0
PDV1-C	< 0,8	< 0,8	0,9 ± 0,8	0,8 ± 0,8	1,1 ± 0,9	3,4 ± 1,0
D2-C	1,1 ± 0,9	3,2 ± 1,0	6,2 ± 1,2	8,0 ± 1,3	15,7 ± 1,8	12,3 ± 2,0
S3-3-C	0,8 ± 0,8	1,2 ± 0,9	1,8 ± 0,9	2,9 ± 1,0	2,7 ± 0,9	3,4 ± 1,0
S3-4-C	< 0,8	1,2 ± 0,9	2,0 ± 0,9	3,9 ± 1,0	4,1 ± 1,0	4,4 ± 1,3
S4-3-C	< 0,8	1,0 ± 0,9	1,7 ± 0,9	2,2 ± 0,9	3,6 ± 1,0	2,4 ± 0,9
2S4-2-C	0,8 ± 0,8	1,5 ± 0,9	2,5 ± 0,9	2,2 ± 0,9	2,9 ± 1,0	4,0 ± 1,0
2S4-4-C	0,9 ± 0,9	1,4 ± 0,9	2,0 ± 0,9	1,9 ± 0,9	2,5 ± 0,9	3,0 ± 1,0
GRB-C	< 0,8	< 0,8	< 0,8	< 0,8	< 0,8	< 0,8
BT-C	< 0,8	< 0,8	< 0,8	< 0,8	0,9 ± 0,9	0,9 ± 0,9
GB-C	< 0,8	< 0,8	0,8 ± 0,9	0,7 ± 0,9	0,9 ± 0,9	< 0,8

Tab. 14 Hodnoty R_d seleničitanu včetně jejich rozšířených standardních nejistot na frakcích D horninových vzorků z potenciálních lokalit, $c(\text{Se}) = 2 \cdot 10^{-5} \text{ mol l}^{-1}$, frakce D: 0,8–0,63 mm

Horninový vzorek	Doba sorpce (dny)					
	0,04	0,31	1	2	4	7
PZV1-D	< 0,8	0,8 ± 0,9	< 0,8	< 0,8	< 0,8	1,9 ± 0,9
TIV1-D	< 0,8	< 0,8	< 0,8	1,0 ± 0,9	1,6 ± 0,9	1,5 ± 0,9
PDV1-D	< 0,8	< 0,8	< 0,8	0,9 ± 0,9	< 0,8	< 0,8
D2-D	< 0,8	< 0,8	1,3 ± 0,9	4,0 ± 1,0	1,8 ± 1,4	4,7 ± 1,1
S3-3-D	< 0,8	< 0,8	0,8 ± 0,8	< 0,8	1,0 ± 0,9	1,2 ± 0,9
S3-4-D	< 0,8	< 0,8	1,4 ± 0,9	1,6 ± 0,9	1,9 ± 0,9	1,5 ± 0,9
S4-3-D	< 0,8	< 0,8	< 0,8	< 0,8	1,3 ± 0,9	< 0,8
2S4-2-D	< 0,8	< 0,8	< 0,8	< 0,8	0,9 ± 0,9	1,1 ± 0,9
2S4-4-D	< 0,8	< 0,8	< 0,8	1,1 ± 0,9	1,2 ± 0,9	1,2 ± 0,9
GRB-D	< 0,8	< 0,8	< 0,8	< 0,8	< 0,8	< 0,8
BT-D	< 0,8	< 0,8	< 0,8	< 0,8	< 0,8	< 0,8
GB-D	< 0,8	< 0,8	< 0,8	< 0,8	0,9 ± 0,9	0,8 ± 0,9




Obr. 17 Hodnoty R_d seleničitanu na horninových vzorcích z potenciálních lokalit, vlevo: frakce C (0,63–0,125 mm), vpravo: frakce D (0,8–0,63 mm), $c(\text{Se}) = 2 \cdot 10^{-5} \text{ mol l}^{-1}$

5.2.4 Uran

Výsledné hodnoty R_d uranu na studovaných vzorcích jsou uvedeny na Obr. 18 a v Tab. 15 a Tab. 16. Hodnoty R_d po sedmi dnech experimentu dosáhly v případě obou horninových frakcí hodnot okolo 1 ml g^{-1} , což ukazuje zanedbatelnou sorpci uranylu na všechny studované vzorky bez ohledu na rozdíly v mineralogickém složení jednotlivých hornin. V řadě případů byla tato sorpce menší než nejistota měření (pro $R_d \sim 0 \text{ ml g}^{-1}$ je $U_{R_d} < 1,6 \text{ ml g}^{-1}$), a tak nelze s jistotou určit, zdali se skutečně jednalo o sorpci uranu na daný materiál. Pokud nejsou výsledky R_d dostatečně prokazatelné, nejsou uvedeny v Tab. 15 a Tab. 16.

Současně nebyl pozorován vliv velikosti frakce na záchyt uranylu. Stejně jako v případě seleničitanu byly pozorovány vyšší hodnoty R_d na granitu D2 (lokalita Čihadlo) a GB (granulit, lokalita Hrádek). I přes velice nízký záchyt uranu, byla v porovnání s ostatními horninami vyšší sorpce patrná (viz Obr. 18).

V podmínkách experimentálního pH (pH $\sim 7,9$) a E_h ($E_h \sim 145 \text{ mV}$) je uran v prostředí SGW2 přítomen v oxidačním stavu (+IV) jako směs specií $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{4-}$, $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2^{2-}$, $(\text{UO}_2)_2\text{CO}_3(\text{OH})_3^-$ a $\text{UO}_2(\text{OH})_2$, přičemž dominantními speciemi ve studovaném systému jsou Ca-uranyl-karbonátové komplexy. Tyto specie jsou uváděny jako hlavní specie přítomné v systému při pH $> 7,5$ a jsou charakteristické svým nesorbujícím se chováním (Hakanen et al. 2014). Více informací o mechanismu záchytu uranu na horniny a minerály je uvedeno ve zprávě Havlové et al. (2017).

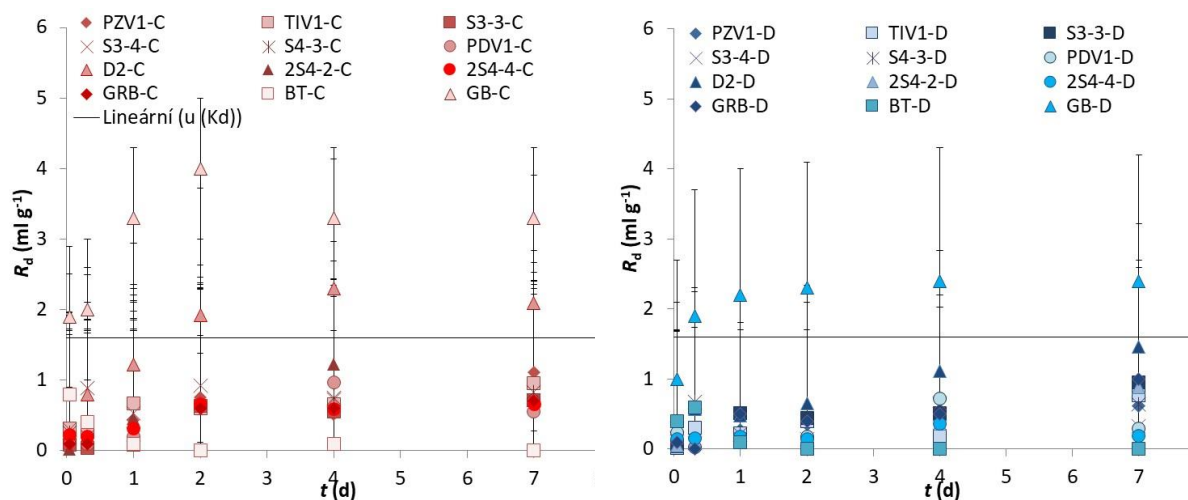
 SÚRAO	Migrační procesy hornin Českého masivu	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 333/2018

Tab. 15 Hodnoty R_d uranu včetně jejich rozšířených standardních nejistot na frakcích C horninových vzorků z potenciálních lokalit, $c(U) = 2,6 \cdot 10^{-4} \text{ mol l}^{-1}$, frakce C: 0,63–0,125 mm

Horninový vzorek	Doba sorpce (dny)					
	0,04	0,31	1	2	4	7
PZV1-C	< 1,6	< 1,6	< 1,6	< 1,6	< 1,6	< 1,6
TIV1-C	< 1,6	< 1,6	< 1,6	< 1,6	< 1,6	< 1,6
PDV1-C	< 1,6	< 1,6	< 1,6	< 1,6	< 1,6	< 1,6
D2-C	< 1,6	< 1,6	< 1,6	1,9 ± 1,8	2,3 ± 1,8	2,1 ± 1,8
S3-3-C	< 1,6	< 1,6	< 1,6	< 1,6	< 1,6	< 1,6
S3-4-C	< 1,6	< 1,6	< 1,6	< 1,6	< 1,6	< 1,6
S4-3-C	< 1,6	< 1,6	< 1,6	< 1,6	< 1,6	< 1,6
2S4-2-C	< 1,6	< 1,6	< 1,6	< 1,6	< 1,6	< 1,6
2S4-4-C	< 1,6	< 1,6	< 1,6	< 1,6	< 1,6	< 1,6
GRB-C	< 1,6	< 1,6	< 1,6	< 1,6	< 1,6	< 1,6
BT-C	< 1,6	< 1,6	< 1,6	< 1,6	< 1,6	< 1,6
GB-C	1,9 ± 1,8	2,0 ± 1,8	3,3 ± 2,0	4,0 ± 2,0	3,3 ± 2,0	3,3 ± 2,0

Tab. 16 Hodnoty R_d uranu včetně jejich rozšířených standardních nejistot na frakcích D horninových vzorků z potenciálních lokalit, $c(U) = 2,6 \cdot 10^{-4} \text{ mol l}^{-1}$, frakce D: 0,8–0,63 mm

Horninový vzorek	Doba sorpce (dny)					
	0,04	0,31	1	2	4	7
PZV1-D	< 1,6	< 1,6	< 1,6	< 1,6	< 1,6	< 1,6
TIV1-D	< 1,6	< 1,6	< 1,6	< 1,6	< 1,6	< 1,6
PDV1-D	< 1,6	< 1,6	< 1,6	< 1,6	< 1,6	< 1,6
D2-D	< 1,6	< 1,6	< 1,6	< 1,6	< 1,6	< 1,6
S3-3-D	< 1,6	< 1,6	< 1,6	< 1,6	< 1,6	< 1,6
S3-4-D	< 1,6	< 1,6	< 1,6	< 1,6	< 1,6	< 1,6
S4-3-D	< 1,6	< 1,6	< 1,6	< 1,6	< 1,6	< 1,6
2S4-2-D	< 1,6	< 1,6	< 1,6	< 1,6	< 1,6	< 1,6
2S4-4-D	< 1,6	< 1,6	< 1,6	< 1,6	< 1,6	< 1,6
GRB-D	< 1,6	< 1,6	< 1,6	< 1,6	< 1,6	< 1,6
BT-D	< 1,6	< 1,6	< 1,6	< 1,6	< 1,6	< 1,6
GB-D	< 1,6	1,9 ± 1,8	2,2 ± 1,8	2,3 ± 1,8	2,4 ± 1,9	2,4 ± 1,8



Obr. 18 Hodnoty R_d uranu na horninových vzorcích z potenciálních lokalit, vlevo: frakce C (0,63–0,125 mm), vpravo: frakce D (0,8–0,63 mm), $c(U) = 2,6 \cdot 10^{-4} \text{ mol l}^{-1}$

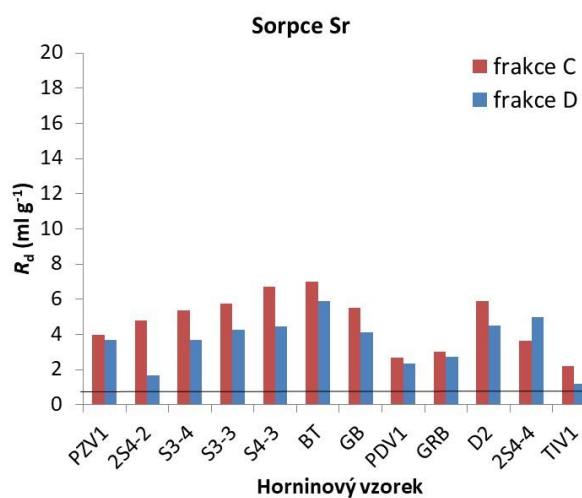
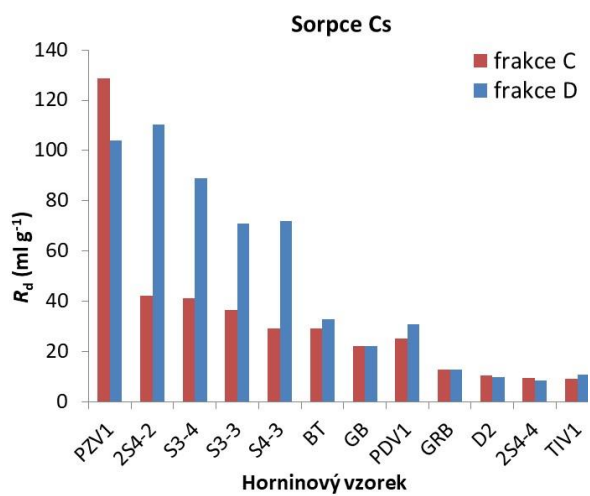
5.2.5 Shrnutí výsledků

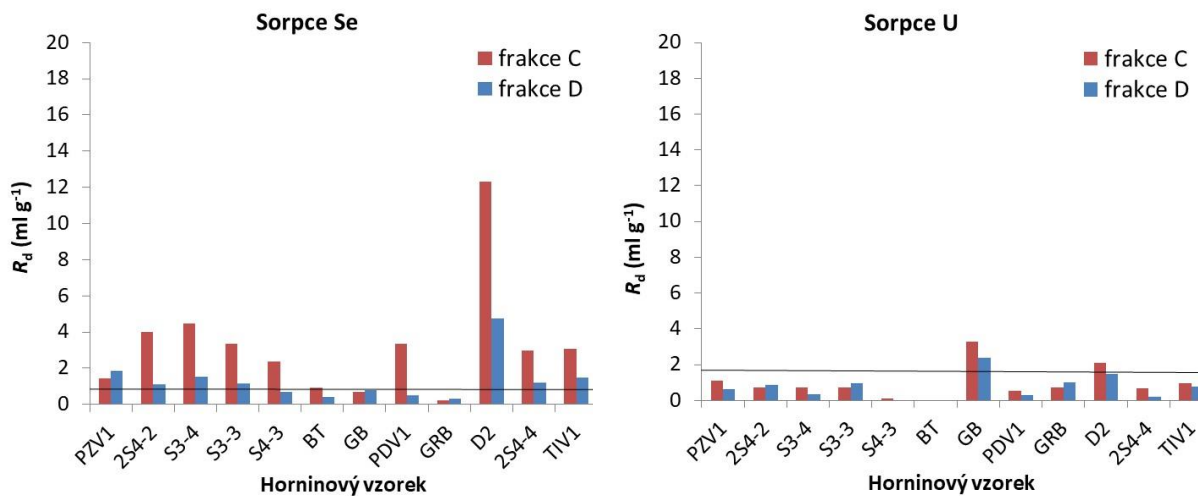
V Tab. 17 a na Obr. 19 jsou shrnuty výsledky sorpčních experimentů na dvou frakcích dvanácti vzorků z vybraných lokalit, jež byly zaměřeny na studium sorpce Cs(I), Sr(II), Se(IV) a U(VI). Z výsledků je patrné, že sorpce jednotlivých radionuklidů se od sebe vzájemně výrazně liší, byl ovšem pozorován i rozdíl v sorpci jednotlivých radionuklidů na studované horninové vzorky.

Z hlediska sorpčního chování radionuklidů lze konstatovat, že na horninové materiály se silně sorbuje cesium, stroncium vykazuje mírný sorbující charakter, seleničitan a uran U(VI) lze zařadit mezi nesorbující se radionuklidy. Významným faktorem, který ovlivňuje chování radionuklidů, je mineralogické složení horninových vzorků. V případě kationtových radionuklidů Cs(I) a Sr(II) jsou významnými sorbenty vrstevnaté minerály (zde slídy), v případě radionuklidů, jež se mohou v roztoku vyskytovat ve formě aniontů, (apř. selen, může být rozhodující přítomnost Fe-minerálů a komplexů vybraných kationtů, jež mohou různými mechanismy zvýšit sorpci selenu na horninový materiál. Obsah Fe je však ve studovaných horninách malý.

Tab. 17 Výsledné hodnoty R_d vybraných radionuklidů na frakcích C a D horninových vzorků z potenciálních lokalit, poměr fází 1:10, 7 dní, frakce C: 0,63–0,125 mm, frakce D: 0,8–0,63 mm

Vzorek	Cs		Sr		Se		U	
	Frakce C	Frakce D	Frakce C	Frakce D	Frakce C	Frakce D	Frakce C	Frakce D
PZV1	128,8	104,2	4,0	3,7	1,4	1,9	< 1,6	< 1,6
2S4-2	42,0	110,5	4,8	1,6	4,0	1,1	< 1,6	< 1,6
S3-4	41,1	89,1	5,4	3,7	4,4	1,5	< 1,6	< 1,6
S3-3	36,6	71,0	5,8	4,3	3,4	1,2	< 1,6	< 1,6
S4-3	29,1	72,0	6,7	4,4	2,4	< 0,8	< 1,6	< 1,6
BT	29,1	32,7	7,0	5,9	< 0,8	< 0,8	< 1,6	< 1,6
GB	22,3	22,2	5,5	4,1	< 0,8	< 0,8	3,3	2,4
PDV1	25,2	30,7	2,7	2,3	3,4	< 0,8	< 1,6	< 1,6
GRB	12,7	12,8	3,0	2,7	< 0,8	< 0,8	< 1,6	< 1,6
D2	10,3	9,7	5,9	4,5	12,3	4,7	2,1	< 1,6
2S4-4	9,3	8,4	3,6	5,0	3,0	1,2	< 1,6	< 1,6
TIV1	9,0	10,6	2,2	1,2	3,1	1,5	< 1,6	< 1,6



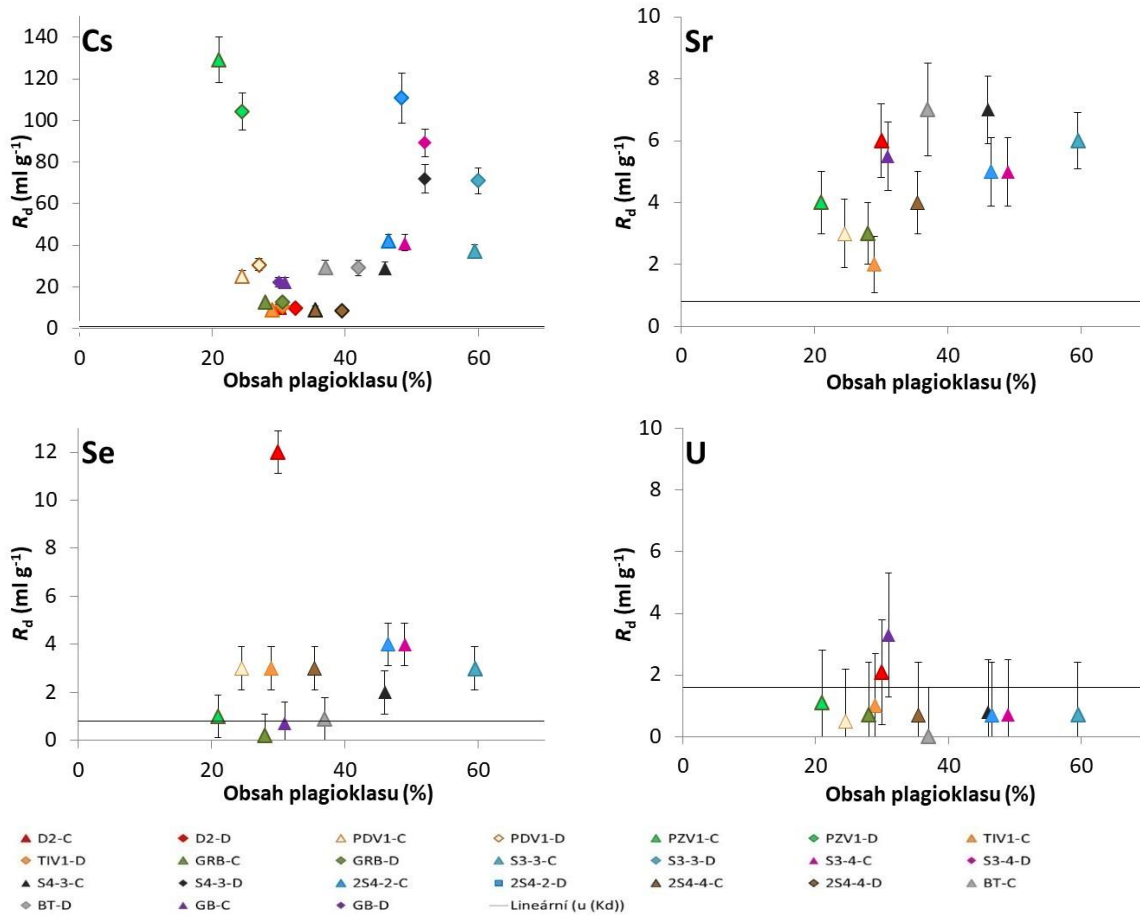


Obr. 19 Sorpce vybraných radionuklidů na horninové vzorky z potenciálních lokalit, frakce C: 0,63–0,125 mm, frakce D: 0,8–0,63 mm

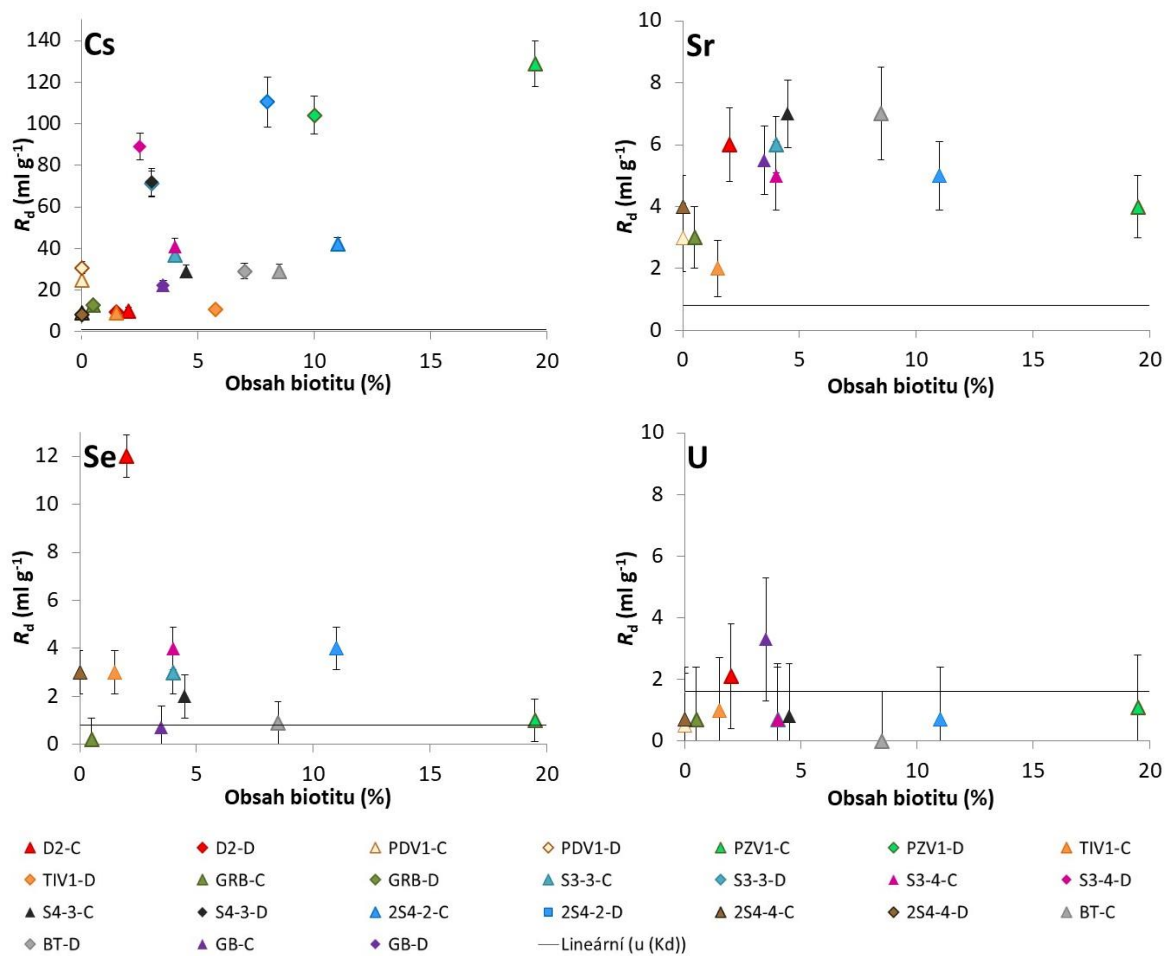
Jako potenciální sorbenty vybraných radionuklidů byly ve studovaných granitických horninách uvažovány zejména fylosilikáty (slídy) a inosilikáty (amfiboly) (viz Tab. 18). V literatuře je ovšem zmiňován i vliv plagioklasu na sorpci radionuklidů (Muuri et al. 2016; Ebong a Evans 2011; Stumpf et al. 2006; Ticknor et al. 1989; Andersson a Allard 1983). Plagioklas patří mezi tektosilikáty, obsahující tetraedry $(\text{SiO}_4)^{4-}$, u kterých může docházet k izomorfní substituci křemíku Si(IV) za hliník Al(III) a tím k přítomnosti záporného náboje v krystalografické soustavě oktaedru, jež je následně kompenzován kationty. Vzhledem k zápornému náboji na povrchu plagioklasu lze tedy předpokládat záchyt kladně nabitých radionuklidů elektrostatickými silami (Muuri et al. 2016). Nárůst hodnot R_d kationtových radionuklidů s rostoucím obsahem plagioklasu v horninových vzorcích lze pozorovat i u hornin z potenciálních lokalit (viz cesium a stroncium na Obr. 20). Naopak vliv plagioklasu na záchyt selenu je nepatrný (Ticknor et al. 1989) a ani sorpce uranuly nebyla přítomností plagioklasu výrazně ovlivněna (viz Obr. 20). Vzorky z PVP Bukov obsahovaly kolem 50 % plagioklasu (viz Obr. 20) a byl u nich pozorován vliv velikosti zrn na sorpci cesia, kdy vyšší sorpce byla pozorována na větší horninové frakci (viz Cs na Obr. 20) Nabízí se tedy otázka, zda drcení a úprava vzorků s vyšším obsahem plagioklasu a amfibolů (S3-3, S3-4, S4-3, 2S4-2) negativně neovlivňuje sorpční vlastnosti horninového materiálu.

Tab. 18 Porovnání relativní sorpčních kapacit minerálů obsažených v granitických horninách (Ticknor et al. 1989)

Radionuklid	Relativní sorpční kapacita
^{137}Cs	Hornblend ~ biotit ~ kaolinit ~ laumontit >> aktinolit ~ epidot ~ plagioklas ~ křemen
^{75}Se	Chlorit ~ serpentín > orthopyroxen > olivin >> plagioklas
^{85}Sr	Hornblend ~ biotit = kaolinit ~ laumontit ~ epidote > aktinolit >> plagioklas ~ křemen



Obr. 20 Závislost hodnot R_d radionuklidů na obsahu plagioklasu v horninových vzorcích u studovaných radionuklidů: graf Cs – frakce C a D; graf Sr – frakce C; graf Se – frakce C; graf U – frakce C. Frakce C: 0,63–0,125 mm, frakce D: 0,8–0,63 mm (poznámka: na grafu Cs není zobrazena hodnota R_d durbachitu PZV1, jejíž vysoká sorpce na PZV1 je důsledkem vyššího obsahu biotitu ve vzorku)



Obr. 21 Závislost hodnot R_d radionuklidů na obsahu biotitu v horninových vzorcích u studovaných radionuklidů: graf Cs – frakce C a D; graf Sr – frakce C; graf Se – frakce C; graf U – frakce C. Frakce C: 0,63–0,125 mm, frakce D: 0,8–0,63 mm (poznámka: na grafu Cs není zobrazena hodnota R_d durbachitu PZV1, jejíž vysoká sorpce na PZV1 je důsledkem vyššího obsahu biotitu ve vzorku)

 SÚRAO	Migrační procesy hornin Českého masivu	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 333/2018

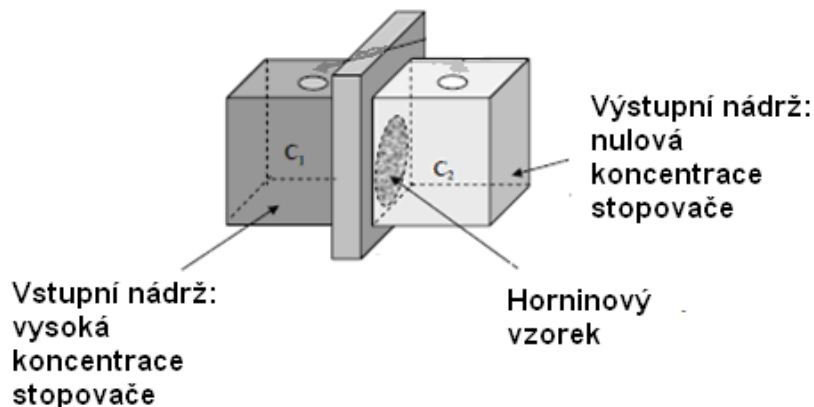
6 Difúze radionuklidů v horninovém prostředí granitů

6.1 Metodika

K popisu difundující látky (stopovač, kontaminant) skrze pórový materiál se užívá Fickových zákonů, které jsou zmíněny dále v sekci zabývající se vyhodnocením výsledků průnikových difúzních experimentů. Geometrické vlastnosti transportních pórů a retardační procesy kontaminantů v pórovém prostředí byly detailně popsány v dřívějších zprávách, např. v Bukovská et al. 2017.

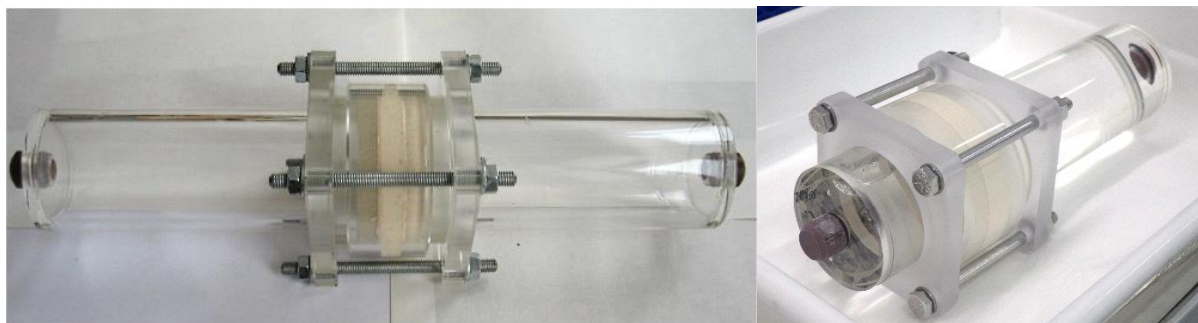
6.2 Uspořádání experimentální aparatury v ÚJV Řež, a. s.

Stanovení difúzního koeficientu za rovnovážného stavu systému se obvykle uskutečňuje v tzv. průnikových difúzních experimentech, a to především pro nesorbující se či slabě se sorbující stopovače (^3H ve formě tritiované vody, ^{36}Cl ve formě chloridu, ^{125}I ve formě jodidu). Typické uspořádání cel pro průnikové experimenty (*through diffusion*) je uvedeno na následujícím schematickém obrázku (Skagius a Neretnieks 1986) (Obr. 22).



Obr. 22 Základní uspořádání cely pro laboratorní difúzní experimenty (zleva): vstupní nádrž – vzorek – výstupní nádrž

Metodika difúzních experimentů v ÚJV Řež, a. s., vychází z pracovního postupu PP 2402.04. Difúzní cely používané v odd. Chemie palivového cyklu, byly inspirovány designem Helsinské univerzity. Design difúzní cely je vidět na Obr. 23.



Obr. 23: Difúzní cela pro průnikové difúzní experimenty: design ÚJV Řež, a. s. s různými velikostmi rezervoárů

Difúzní cela je vyrobena z polymethylmetakrylátu (PMMA), v jejímž středu je umístěno těsnění ze silikonové pryže. Vzorek je umístěn v tomto těsnění, které zajišťuje, aby se roztoky nemísily. Jedna strana vzorku je ve styku s roztokem obsahujícím stopovač ve vstupním rezervoáru, druhá strana vzorku s neznačeným roztokem ve výstupním rezervoáru (obvykle syntetická podzemní voda o daném složení). Pro tento typ cely má vzorek krystalické horniny tvar disku o průměru 42–50 mm a tloušťce 8–10 mm. Objem vstupních rezervoárů je 160–165 ml. Z důvodů nízkých difuzivit horninových vzorků mají výstupní rezervoáry nižší objem (55–59 ml).

Aktivita ve zdrojové nádrži není udržována na konstantní hodnotě a je ponechána bez úprav. Aktivita klesá tak, jak stopovač difunduje vzorkem ve směru vyrovnání koncentračního gradientu. Vzhledem k objemu vstupního rezervoáru, který je cca třikrát větší než rezervoár výstupní, a celkově malému množství prodifundovaného stopovače, není ve většině případů pokles aktivity ve vstupním rezervoáru zaznamenatelný a lze ho tedy pro analytické řešení difúzních rovnic (včetně *time-lag* metody) považovat za konstantní zdroj, viz níže. Ve výstupním rezervoáru je v průběhu experimentu sledován nárůst koncentrace stopovače. V pravidelných intervalech (7–14 dnů) jsou z obou nádrží odebírány vzorky roztoku a měřeny dle typu stopovače. Na základě nárůstu aktivity stopovače ve výstupním rezervoáru je následně vyhodnocena průniková křivka a vypočítán difúzní koeficient.

6.2.1 Vyhodnocení výsledků průnikových difúzních experimentů

Vyhodnocení výsledků bylo provedeno fitováním celkové prodifundované aktivity (resp. látkového množství) v závislosti na čase t (s) pomocí analytického řešení 2. Fickova zákona:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{D_e}{\alpha} \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \right), \quad (6-1)$$

kde C (mol m^{-3} nebo Bq m^{-3}) je koncentrace nebo objemová aktivita v pórové vodě, D_e ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) je efektivní difúzní koeficient a α je kapacitní faktor horniny, definovaný jako:

$$\alpha = \varepsilon + \rho_d \cdot K_d, \quad (6-2)$$

s porozitou ε (–), objemovou hmotností ρ_d (kg m^{-3}) a rovnovážným distribučním koeficientem K_d ($\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$).

Pro nesorbující specii je kapacitní faktor roven transportní porozitě. Počáteční a okrajové podmínky jsou dány následovně:

- $C(x, t) = 0 \quad t = 0; \quad x \neq 0,$
- $C(x, t) = C_0 \quad x = 0; \quad t \geq 0,$
- $C(L, t) = 0 \quad x = L; \quad t > 0,$

kde L (m) je tloušťka vzorku a C_0 (mol m⁻³ nebo Bq m⁻³) je (počáteční) koncentrace (nebo aktivitní koncentrace) ve vstupním rezervoáru.

Analytické řešení průnikového difúzního experimentu (TD, *through diffusion*) je dáno řešením rovnice (6-1) s počátečními a okrajovými podmínkami danými výše a za předpokladu, že tok stopovače J (mol m⁻² s⁻¹ nebo Bq m⁻² s⁻¹) ve výstupním rezervoáru na konci vzorku ($x = L$) je dán vztahem:

$$J(L, t) = -D_e \cdot \left. \frac{\partial C}{\partial x} \right|_{x=L}. \quad (6-3)$$

Výpočet efektivního difúzního koeficientu a porozity je pak dán analytickým řešením (Crank 1975, Jakob et al. 1999):

$$Q(t) = S \cdot L \cdot C_0 \cdot \left[\frac{D_e \cdot t}{L^2} - \frac{\alpha}{6} - \frac{2\alpha}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2} \cdot \exp\left(-\frac{D_e \cdot n^2 \cdot \pi^2 \cdot t}{L^2 \cdot \alpha}\right) \right], \quad (6-4)$$

kde $Q(t)$ (mol nebo Bq) je prodifundované látkové množství (nebo aktivita) v čase t skrz vzorek o tloušťce L a ploše S , C_0 je vstupní koncentrace (nebo objemová aktivita sledované látky, která je během experimentu udržována konstantní).

Pakliže difúzní tok dojde do ustáleného stavu ($t \rightarrow \infty$), potom je řešení rovnice redukováno do tvaru:


$$\frac{Q(t)}{S \cdot C_0} = \frac{D_e \cdot t}{L} - \frac{\alpha \cdot L}{6} \quad (6-5)$$

kde lze difúzní koeficient D_e určit ze směrnice závislosti $Q(t)/(S \cdot C_0)$ na čase a z úseku kapacitní faktor α .

Tento způsob vyhodnocení se nazývá metoda *time-lag*. Podrobnější popis vyhodnocování průnikových difúzních experimentů a limity vyhodnocovacích metod je možné najít v (Červinka et al. 2015 nebo Van Loon et al. 2003).

Tyto metody vyhodnocení dat se běžně používají i v případech, kdy nejsou striktně dodrženy výše zmíněné okrajové podmínky. Obecně jsou pro použití těchto metod přijímány podmínky, kdy vstupní koncentrace C_0 by neměla klesnout pod hodnotu 95 % z počáteční koncentrace C_0 ($t = 0, x = 0$) a do cílového rezervoáru by nemělo prodifundovat více než 5 % z počáteční zdrojové koncentrace (García-Gutiérrez et al. 2003). Tyto podmínky byly téměř u všech prováděných experimentů splněny (maximální pokles na zdroji byl 7 % oproti počáteční koncentraci). Občasné nesystematické odchylky naměřených hodnot lze přisuzovat nepřesnostem ve stanovení aktivity v roztocích.

Hledání optimálních hodnot D_e a α bylo provedeno fitováním experimentálních dat na model analytického řešení (6-4) metodou nejmenších čtverců. Pro zjednodušení fitování byla porozita ε nastavena na konstantní hodnotu podél difúzní dráhy, jak byla stanovena metodou postupného osychání (viz kapitola 4.3) a jediným neznámým (fitovaným) parametrem tak

 SÚRAO	Migrační procesy hornin Českého masivu	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 333/2018

zůstává efektivní difúzní koeficient D_e . Dalšími jednoduchými úpravami (viz níže) jsme schopni dopočítat ostatní parametry (geometrický faktor G (-), formační faktor hornin F_f (-)) při znalosti tabulkových hodnot referenčních difuzivit D_w ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) pro nekonečné zředění ($D_w = 2,44 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ pro HTO, $D_w = 2,30 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ pro jodid a $D_w = 2,03 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ pro chlorid).


$$D_e = \varepsilon \cdot D_p = \varepsilon \cdot D_w \cdot G = F_f \cdot D_w \quad (6-6)$$

6.3 Vlastnosti použitých horninových vzorků

Difúzní experimenty byly provedeny na vzorcích z lokalit Čihadlo (D2), Čertovka (TIV), Horka (PZV), Panské Dubenky (PDV), Kraví hora (GRB a 2S3), Březový potok (lom Defurovy Lažany – vzorky BT3 a BT8) a Hrádek (lom Boršov – vzorky GB2 a GB4; lom Bromberg – vzorek GC3). Jejich souhrnný seznam včetně rozměrů vzorků je shrnut v Tab. 19 a vychází ze seznamu použitých vzorků (viz Tab. 2).

Tab. 19 Seznam užitých vzorků s rozměry pro difúzní experimenty

Označení vzorku	BT8_1	BT8_2	BT3_2	BT3_3	GB2_1	GB2_2	GB4_1	GB4_3
Tloušťka L (mm)	9,9	9,9	9,9	10,6	10,3	10,6	9,3	10,4
Průměr d (mm)	47,9	47,9	47,5	47,5	47,8	47,8	47,8	47,8
Označení vzorku	GC3_2	D2_1/4	D2_2/1	D2_2/2	TIV1_68 A	TIV1_68 C	PZV1_90 B	PZV1_90 C
Tloušťka L (mm)	9,9	10,3	10,4	10,6	9,6	9,6	10,0	10,7
Průměr d (mm)	47,8	49,9	49,9	49,9	47,8	47,8	47,7	47,7
Označení vzorku	PDV1_8 9C	PDV1_97 A	GRB_1_ 1	GRB_1_ 2	GRB_3_ 1	GRB_3_ 2	2S3_2_1	2S3_2_3
Tloušťka L (mm)	10,6	10,7	10,4	9,5	10,8	10,2	9,9	10,2
Průměr d (mm)	47,6	47,6	50,1	50,2	50,3	50,3	49,0	49,1

 SÚRAO	Migrační procesy hornin Českého masivu	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 333/2018

6.4 Vlastnosti použitých roztoků

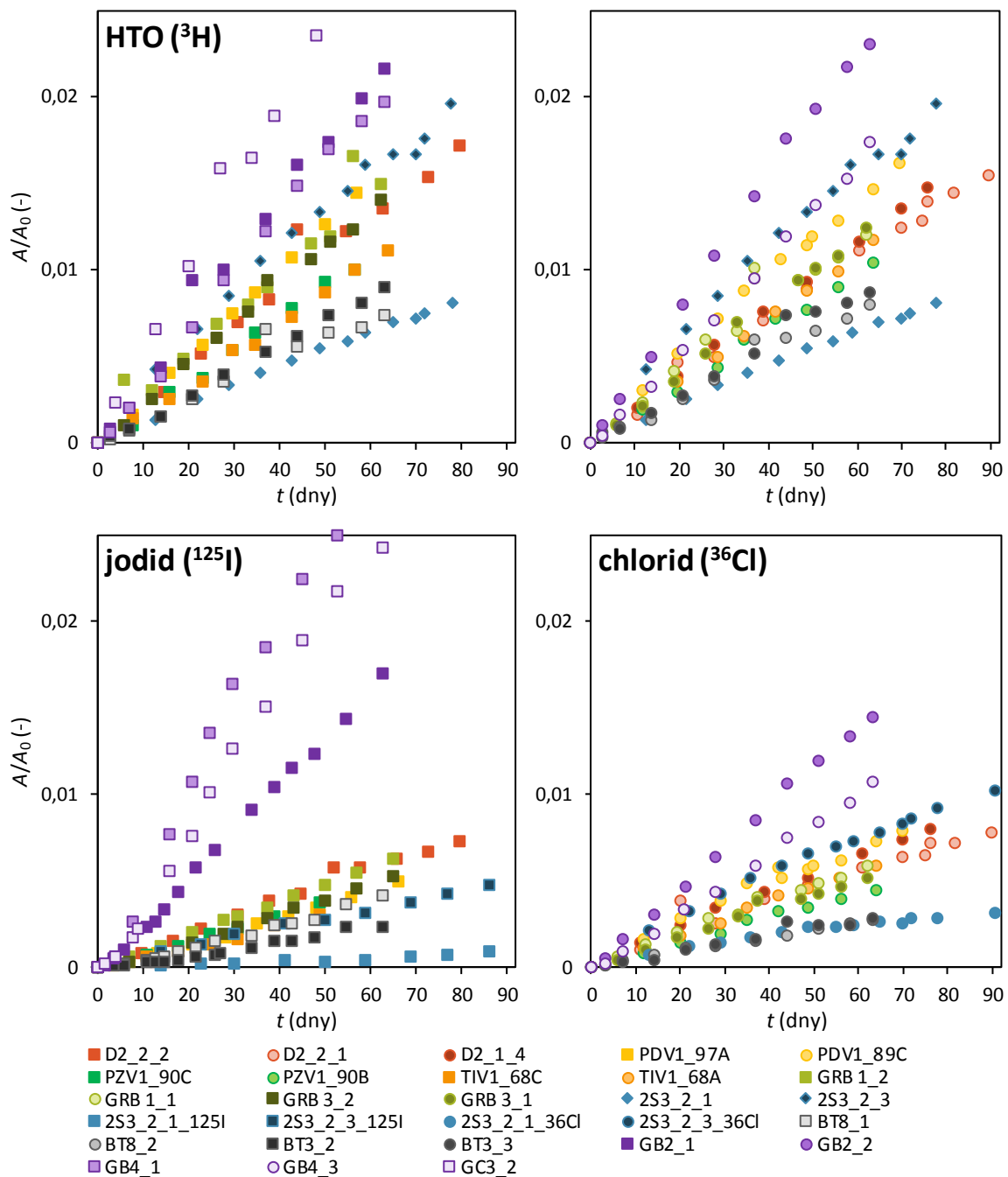
Pro všechny difúzní experimenty byla použita syntetická granitická voda SGW2 (Červinka a Gondolli 2016). Průměrné chemické složení syntetické granitické vody SGW2 je uvedeno v Tab. 8.

Za účelem sledování transportního chování vzorků byly pro difúzní experimenty na horninových vzorcích z lokalit použity dva typy zdrojových roztoků v syntetické granitické vodě SGW2 označených stopovači:

- 1) Směs stopovačů ^3H a ^{36}Cl , kdy přibližná aktivita stopovače ^3H ($T_{1/2} = 12,32$ let) byla 4 kBq ml^{-1} a stopovače ^{36}Cl ($T_{1/2} = 301\,300$ let) přibližně $2,5 \text{ kBq ml}^{-1}$ s nosičovým preparátem ve formě NaCl (o koncentraci přibližně $0,016 \text{ mol l}^{-1}$), s detekcí β^- přeměn kapalinovým scintilačním počítacem na přístroji Hidex 300 SL (Hidex Oy).
- 2) Nejprve roztok se samotným stopovačem ^3H , následně byl zdrojový roztok nahrazen roztokem se stopovačem ^{125}I ve formě NaI ($T_{1/2} = 59,4$ dne) o přibližné aktivitě $1,1\text{--}2,0 \text{ kBq ml}^{-1}$ s detekcí emitovaných fotonů pocházejících z elektronového záchytu na detektoru NaI aktivovaným thaliem na přístroji 1480 WIZARD 3“ (Wallac Oy). Do roztoku SGW2 byl přidán nosič CaI_2 o koncentraci $5 \cdot 10^{-6} \text{ mol l}^{-1}$ (výsledná koncentrace jodidu byla $10^{-5} \text{ mol l}^{-1}$) a roztok $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ pro eliminaci oxidace jodidu.

6.5 Výsledky a vyhodnocení

I přes různé rozměry vzorků (průměr $d = 47,5\text{--}50,3$ mm a tloušťka $L = 9,3\text{--}10,8$ mm) a objemy pracovních roztoků v rezervoárech jsou pro ilustraci a účely srovnání tritia vs. anionické stopovače srovnány průnikové křivky všech vzorků na Obr. 24.

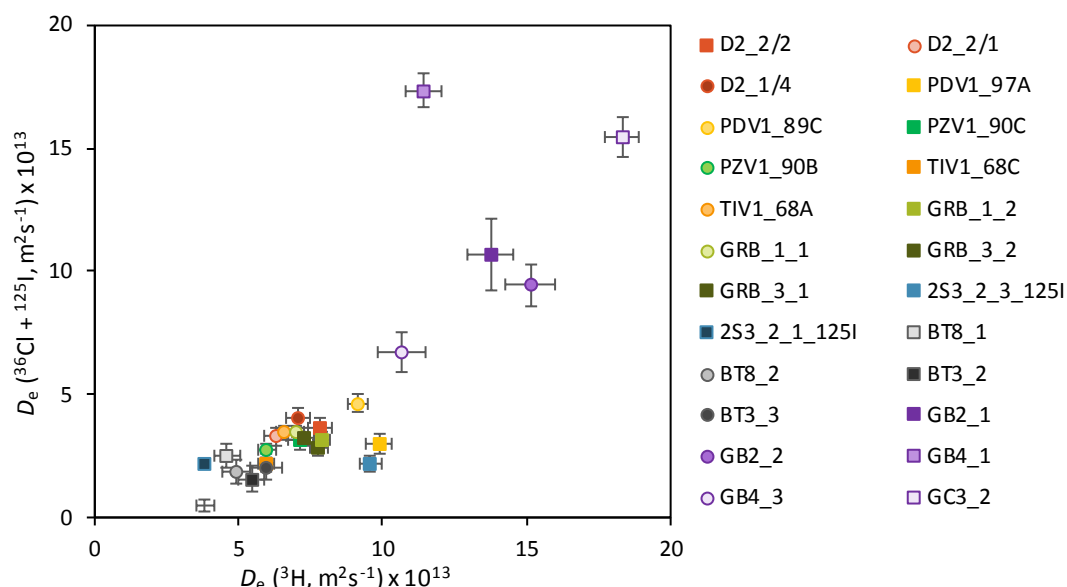


Obr. 24 Průnikové křivky (vývoj relativní objemové aktivity ve výstupních rezervoárech) pro difúzní experimenty s HTO (^3H), jodidem (^{125}I) a chloridem (^{36}Cl)

Z Obr. 24 je zřejmé, že difuzivita všech studovaných stopovačů je na vzorcích z lokality Hrádek (vzorky GB) nejvyšší, zatímco pro vzorky z lokality Březový potok (BT) nejnižší. Vzorek z lokality PVP Bukov/Kraví hora (vrtné jádro 2S3) je svými výsledky paralelních experimentů, i přes stejné porozity vzorků (stanovené dle kapitoly 4.3), značně nekonzistentní, jak v případě difúze tritia, tak i obou aniontů, a proto do tohoto srovnání nebyl uvažován. Hodnoty efektivních difúzních koeficientů pro vzorky jsou uvedeny podle lokalit v Tab. 20 až Tab. 27 s příslušnou nejistotou na hladině významnosti 0,05 (tj. $1,96 \cdot \sigma$). Na tomto místě je třeba podotknout, že měřený signál objemové aktivity ve výstupních rezervoárech se u některých difúzních experimentů i po delší době trvání experimentu pohyboval pouze lehce nad hodnotami limitu detekce s přijatelně dosažitelnou nejistotou měření (tj. tří-čtyřnásobek měřeného pozadí).

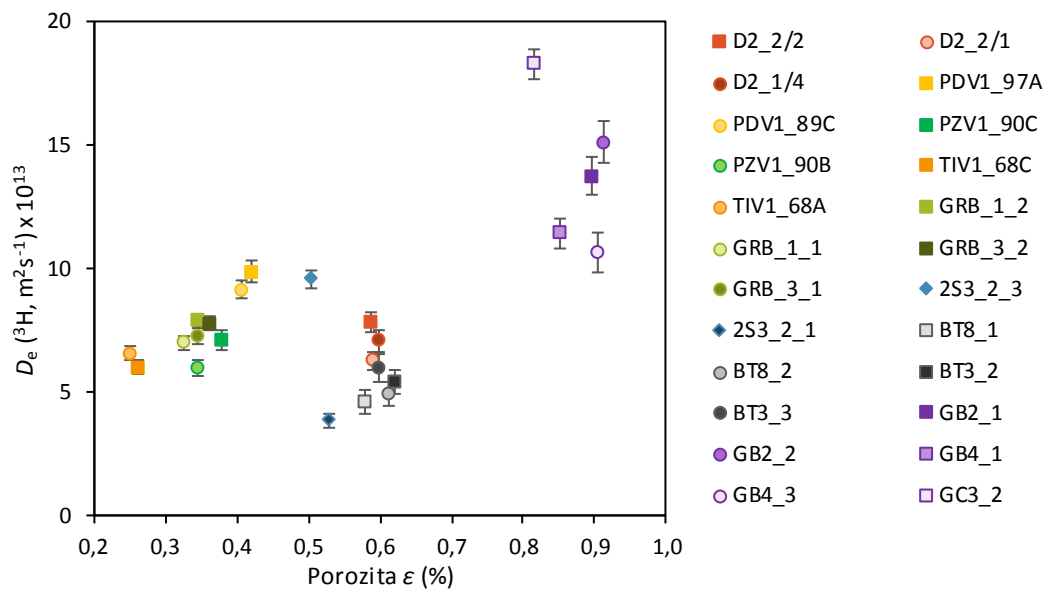
Proto je lepší uvažovat veškeré výsledky efektivních difúzních koeficientů nižších než $2 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ jako nižší nebo rovny $2 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ a hodnoty uvedené v tabulkách Tab. 25 a Tab. 26 považovat za pouhý odhad.

Porovnáním Obr. 24 s hodnotami efektivních difúzních koeficientů v Tab. 20 až Tab. 27 je patrná nižší difuzivita aniontů oproti tritiu, což je možné přisuzovat aniontové exkluzi v důsledku odpuzivých elektrostatických sil mezi záporně nabitým aniontovým stopovačem a povrchem transportních pórů horninového vzorku. Vzorek GB4_1 (granulit Kraví hora) vykazuje vyšší difuzivitu jodidu (^{125}I) oproti tritiu (^3H) v důsledku pravděpodobného výskytu pukliny uvnitř vzorku, která efekt exkluze minimalizuje. Poměr efektivních difúzních koeficientů mezi tritiem a aniontem je dále zobrazen v Obr. 25.



Obr. 25 Hodnoty efektivních difúzních koeficientů (analytické řešení) tritia (^3H) vs. aniont (chlorid ^{36}Cl , jodid ^{125}I)

Obr. 26 dále zobrazuje vliv porozity na efektivní difúzní koeficient tritia (^3H , HTO). I přes vyšší porozity vzorků na lokalitě Březový potok oproti lokalitám Čertovka, Horka, či Panské Dubenky jsou efektivní difúzní koeficienty nezanedbatelně nižší a nelze tak mezi těmito veličinami hledat spojitost. Pokud porozita stanovená osychací metodou (viz kapitola 4.3) je rovna transportní porozitě, je interpretací geometrické difúzní cesty podle (6-6) geometrický faktor roven hodnotám $G = 0,03-0,11$ (za předpokladu, že se tabulkové hodnoty D_w při nekonečném zředění vlivem pracovního roztoku (elektrolytu) a nosičového stopovače nemění). Nejistota interpretace podle (6-6) v geometrickém faktoru je posílena např. jádrem 2S3 (Kraví hora), kde se hodnoty liší o více než 100 % ve výpočtu ($G = 0,03-0,08$). Tento nesoulad byl částečně vysvětlen diskusí u vrtného jádra níže, menší nesoulad je však možné pozorovat u dalšího vrtného jádra TIV (Čertovka), kde hodnoty $G = 0,09-0,11$, i přes fakt, že vzorky jsou téměř sousední (odděleny vzorkem TIV_68B). Přes tyto nejistoty (velikost G , D_w a transportní porozity, resp. stanovení nejistoty celkové porozity osychací metodou popsanou výše), které nejsme schopni odhalit, jsou efektivní difúzní koeficienty pro popis difúzních experimentů neinteragujících specií na horninách určující a ostatní transportní parametry jsou možnou interpretací autorů.



Obr. 26 Hodnoty efektivních difúzních koeficientů (analytické řešení) tritia (^3H) v závislosti na porozitě vzorku (stanovené metodou osychání)

Lokalita 130 Čihadlo – Deštná (vrtné jádro D2)

Vzorky pocházejí z povrchového odběru čerstvého lomového kamene. Převládajícím typem horniny je granit.

Tab. 20 Vyhodnocení efektivních difúzních koeficientů pro vzorky z jádra D2

Označení vzorku	ϵ %	D_e (^3H) $\cdot 10^{-13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	D_e (^{36}Cl) $\cdot 10^{-13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	D_e (^{125}I) $\cdot 10^{-13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	Poměr D_e aniont/ ^3H	Vyhodnocení
D2_2/2	0,59	$7,8 \pm 0,4$		$3,6 \pm 0,4$	$0,46 \pm 0,06$	analytické řeš.
		$7,5 \pm 0,3$		$3,3 \pm 0,3$	$0,44 \pm 0,04$	time-lag
D2_2/1	0,59	$6,3 \pm 0,4$	$3,3 \pm 0,3$		$0,53 \pm 0,06$	analytické řeš.
		$6,0 \pm 0,3$	$2,9 \pm 0,2$		$0,49 \pm 0,05$	time-lag
D2_1/4	0,60	$7,1 \pm 0,4$	$4,1 \pm 0,4$		$0,57 \pm 0,07$	analytické řeš.
		$6,8 \pm 0,1$	$3,5 \pm 0,1$		$0,52 \pm 0,02$	time-lag

 SÚRAO	Migrační procesy hornin Českého masivu	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 333/2018

Lokalita 120 Čertovka – Tis u Blatna (vrtné jádro TIV1)

Vzorky byly odebrány z jádra vrtné dokumentace z hloubky 68 m. Převládajícím typem horniny je granit.

Tab. 21 Vyhodnocení efektivních difúzních koeficientů pro vzorky z jádra TIV1

Označení vzorku	ε %	D_e (^3H) $\cdot 10^{-13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	D_e (^{36}Cl) $\cdot 10^{-13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	D_e (^{125}I) $\cdot 10^{-13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	Poměr D_e aniont/ ^3H	Vyhodnocení
TIV1_68C	0,26	6,0 ± 0,3		2,2 ± 0,3	0,36 ± 0,05	analytické řeš.
		6,0 ± 0,3		2,2 ± 0,1	0,36 ± 0,03	<i>time-lag</i>
TIV1_68A	0,25	6,6 ± 0,3	3,5 ± 0,3		0,53 ± 0,05	analytické řeš.
		6,5 ± 0,2	3,3 ± 0,2		0,51 ± 0,04	<i>time-lag</i>

Lokalita 140 Horka – Pozdátky (vrtné jádro PZV1)

Vzorky byly odebrány z jádra vrtné dokumentace z hloubky 90 m. Převládajícím typem horniny je syenit.

Tab. 22 Vyhodnocení efektivních difúzních koeficientů pro vzorky z jádra PZV1

Označení vzorku	ε %	D_e (^3H) $\cdot 10^{-13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	D_e (^{36}Cl) $\cdot 10^{-13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	D_e (^{125}I) $\cdot 10^{-13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	Poměr D_e aniont/ ^3H	Vyhodnocení
PZV1_90C	0,38	7,1 ± 0,4		3,1 ± 0,4	0,44 ± 0,06	analytické řeš.
		7,1 ± 0,4		3,1 ± 0,1	0,43 ± 0,03	<i>time-lag</i>
PZV1_90B	0,34	6,0 ± 0,3	2,7 ± 0,3		0,46 ± 0,05	analytické řeš.
		6,0 ± 0,4	2,5 ± 0,2		0,42 ± 0,05	<i>time-lag</i>

Lokalita Panské Dubenky (vrtné jádro PDV1)

Vzorky byly odebrány z jádra vrtné dokumentace z hloubek 89, resp. 97 m. Převládajícím typem horniny je granit.

Tab. 23 Vyhodnocení efektivních difúzních koeficientů pro vzorky z jádra PDV1

Označení vzorku	ε %	D_e (^3H) $\cdot 10^{-13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	D_e (^{36}Cl) $\cdot 10^{-13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	D_e (^{125}I) $\cdot 10^{-13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	Poměr D_e aniont/ ^3H	Vyhodnocení
PDV1_97A	0,42	9,9 ± 0,5		3,0 ± 0,4	0,30 ± 0,04	analytické řeš.
		9,9 ± 0,2		3,0 ± 0,1	0,30 ± 0,01	<i>time-lag</i>
PDV1_89C	0,41	9,2 ± 0,3	4,5 ± 0,3		0,51 ± 0,04	analytické řeš.
		8,4 ± 1,1	3,9 ± 0,4		0,46 ± 0,08	<i>time-lag</i>

 SÚRAO	Migrační procesy hornin Českého masivu	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 333/2018

Lokalita 170 Kraví hora – Horní Bory (vrtná jádra GRB 1 a GRB 3)

Vzorky pocházejí z povrchového odběru čerstvého lomového kamene. Převládajícím typem horniny je felsický granulit. Vzorky GRB_1 byly odvrtny paralelně s foliací, vzorky GRB_3 jsou pak orientovány kolmo k foliaci. Jak je patrné z výsledků v Tab. 24, usměrnění vzorků nemělo statisticky významný vliv na velikost difúzních efektivních koeficientů všech stopovačů.

Tab. 24 Vyhodnocení efektivních difúzních koeficientů pro vzorky z jader GRB

Označení vzorku	ε %	D_e (^3H) $\cdot 10^{-13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	D_e (^{36}Cl) $\cdot 10^{-13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	D_e (^{125}I) $\cdot 10^{-13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	Poměr D_e aniont/ ^3H	Vyhodnocení
GRB_1_2	0,35	7,9 ± 0,3		3,2 ± 0,3	0,40 ± 0,04	analytické řeš.
		7,6 ± 0,9		3,1 ± 0,1	0,41 ± 0,05	<i>time-lag</i>
GRB_1_1	0,33	7,0 ± 0,3	3,5 ± 0,3		0,49 ± 0,05	analytické řeš.
		6,7 ± 0,4	3,1 ± 0,2		0,48 ± 0,09	<i>time-lag</i>
GRB_3_2	0,36	7,8 ± 0,3		2,8 ± 0,3	0,36 ± 0,04	analytické řeš.
		7,7 ± 0,5		2,9 ± 0,1	0,38 ± 0,03	<i>time-lag</i>
GRB_3_1	0,35	7,3 ± 0,3	3,3 ± 0,3		0,45 ± 0,05	analytické řeš.
		7,3 ± 0,9	3,0 ± 0,3		0,41 ± 0,07	<i>time-lag</i>


Lokalita Kraví hora – Bukov (vrtné jádro 2S3)

Vzorky byly odebrány z jádra vrtné dokumentace z hloubky 78 m (BZ-XIIJ). Převládajícím typem horniny je migmatit.

Z důvodů nestandardního vývoje aktivity v cílových rezervoárech (konkávní tvar průnikové křivky) obou vzorků z vrtu 2S3 nebylo možné smysluplně vyhodnotit difúzní experiment s ^{36}Cl analytickým řešením. Difúzní koeficienty byly vypočteny přes stanovení difúzního toku mezi jednotlivými odběry (experimentálními body).

Oproti vzorkům z jiných lokalit byly v tomto případě zkušebně provedeny difúzní experimenty s ^{125}I na vzorcích po experimentech se směsí stopovačů $^3\text{H} + ^{36}\text{Cl}$ (tj. na obou vzorcích byly použity všechny tři stopovače). Výsledné hodnoty D_e pro ^{125}I jsou v obou případech srovnatelné.

Vzorky 2S3_2_1 a 2S3_2_3 vykazovaly značně rozdílné hodnoty difúzních efektivních koeficientů, přestože pocházejí z jednoho jádra a jedná se o takřka sousední vzorky. Při bližším ohledání disků byla na vzorku 2S3_2_3 (u kterého byly vyhodnoceny vyšší hodnoty D_e) nalezena oblast, kde byla hornina viditelně více rozrušená než na zbytku vzorku. Navíc byl v této oblasti kousek okraje vzorku odštipnutý. Tím vznikla preferenční cesta pro difúzi, což je pravděpodobná příčina vyšších hodnot difúzních koeficientů. Porovnání aktuálních výsledků s dřívějšími výsledky ze sousedního vrtu S3 (podrobnosti viz závěrečná zpráva, Bukovská et al. 2017) tuto hypotézu potvrzují. Hodnoty difúzního efektivního koeficientu pro ^3H se pohybovaly v rozmezí 1,6–3,0 · 10⁻¹³ m² s⁻¹, pro ^{36}Cl pak 0,4–0,8 · 10⁻¹³ m² s⁻¹.

 SÚRAO	Migrační procesy hornin Českého masivu	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 333/2018

Tab. 25 Vyhodnocení efektivních difúzních koeficientů pro vzorky z jádra 2S3

Označení vzorku	ε %	D_e (^3H) $\cdot 10^{-13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	D_e (^{36}Cl) $\cdot 10^{-13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	D_e (^{125}I) $\cdot 10^{-13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	Poměr D_e aniont/ ^3H	Vyhodnocení
2S3_2_1	0,53	$3,8 \pm 0,3$	X*	$0,5 \pm 0,3$	$0,12 \pm 0,07$	analytické řeš.
		$3,5 \pm 0,1$		$0,4 \pm 0,1$	$0,10 \pm 0,03$	<i>time-lag</i>
			$1,0 \pm 0,8$		$0,29 \pm 0,24$	<i>time-lag</i>
2S3_2_3	0,50	$9,6 \pm 0,4$	X*	$2,2 \pm 0,3$	$0,23 \pm 0,03$	analytické řeš.
		$8,7 \pm 0,5$		$1,8 \pm 0,1$	$0,21 \pm 0,02$	<i>time-lag</i>
			$3,7 \pm 1,3$		$0,43 \pm 0,15$	<i>time-lag</i>

*) Vzorky nebylo možné vyhodnotit analytickým řešením

Lokalita Březový potok – Defurovy Lažany (vrtná jádra BT8 a BT3)

Tab. 26 Vyhodnocení efektivních difúzních koeficientů pro vzorky z jader BT

Označení vzorku	ε %	D_e (^3H) $\cdot 10^{-13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	D_e (^{36}Cl) $\cdot 10^{-13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	D_e (^{125}I) $\cdot 10^{-13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	Poměr D_e aniont/ ^3H	Vyhodnocení
BT8_1	0,58	$4,6 \pm 0,5$		$2,5 \pm 0,5$	$0,55 \pm 0,12$	analytické řeš.
		$3,8 \pm 1,7$		$2,6 \pm 0,2$	$0,67 \pm 0,20$	<i>time-lag</i>
BT8_2	0,61	$4,9 \pm 0,5$	$1,9 \pm 0,5$		$0,38 \pm 0,10$	analytické řeš.
		$4,8 \pm 1,1$	$1,5 \pm 0,1$		$0,31 \pm 0,08$	<i>time-lag</i>
BT3_2	0,62	$5,4 \pm 0,5$		$1,6 \pm 0,5$	$0,29 \pm 0,10$	analytické řeš.
		$5,5 \pm 0,2$		$1,4 \pm 0,2$	$0,25 \pm 0,03$	<i>time-lag</i>
BT3_3	0,60	$6,0 \pm 0,6$	$2,1 \pm 0,5$		$0,35 \pm 0,09$	analytické řeš.
		$5,8 \pm 1,1$	$1,7 \pm 0,6$		$0,30 \pm 0,11$	<i>time-lag</i>

 SÚRAO	Migrační procesy hornin Českého masivu	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 333/2018


Lokalita Hrádek – Boršov (vrtná jádra GB2 a GB4) a Bromberg (vrtné jádro GC3)

Tab. 27 Vyhodnocení efektivních difúzních koeficientů pro vzorky z jader GB a GC

Označení vzorku	ε %	D_e (^3H) $\cdot 10^{-13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	D_e (^{36}Cl) $\cdot 10^{-13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	D_e (^{125}I) $\cdot 10^{-13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	Poměr D_e aniont/ ^3H	Vyhodnocení
GB2_1	0,90	$13,8 \pm 0,8$		$10,7 \pm 1,4$	$0,77 \pm 0,11$	analytické řeš.
		$12,5 \pm 1,3$		$10,6 \pm 0,4$	$0,84 \pm 0,08$	<i>time-lag</i>
GB2_2	0,91	$15,1 \pm 0,9$	$9,4 \pm 0,8$		$0,62 \pm 0,07$	analytické řeš.
		$14,0 \pm 1,0$	$9,1 \pm 0,4$		$0,65 \pm 0,05$	<i>time-lag</i>
GB4_1	0,85	$11,4 \pm 0,6$		$17,3 \pm 0,7$	$1,52 \pm 0,10$	analytické řeš.
		$10,7 \pm 0,8$		$13,5 \pm 2,4$	$1,41 \pm 0,16$	<i>time-lag</i>
GB4_3	0,91	$10,7 \pm 0,8$	$6,7 \pm 0,8$		$0,63 \pm 0,09$	analytické řeš.
		$10,8 \pm 0,6$	$6,7 \pm 0,4$		$0,62 \pm 0,05$	<i>time-lag</i>
GC3_2	0,82	$18,3 \pm 0,6$		$15,5 \pm 0,8$	$0,84 \pm 0,05$	analytické řeš.
		$17,0 \pm 1,7$		$13,8 \pm 1,5$	$0,81 \pm 0,11$	<i>time-lag</i>

6.6 Diskuze

Přestože zkoumané vzorky pochází z různých lokalit napříč ČR, jedná se o různé horninové typy, část vzorků byla odebrána z povrchových lomů, jiná část pochází z vrtných jader, získané difúzní efektivní koeficienty se pohybují v poměrně úzkém rozmezí: pro ^3H ($4-10$) $\cdot 10^{-13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, pro ^{36}Cl ($1-10$) $\cdot 10^{-13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ a pro ^{125}I ($1-4$) $\cdot 10^{-13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, přičemž hodnoty jdoucí pod $2 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ jsou pouhým odhadem pohybujícím se v mezi stanovitelnosti vycházející z mezí detekce. Směrem k vyšším hodnotám D_e pro všechny tři testované stopovače se vymykají pouze vzorky z lokality Hrádek, které také vykazují vyšší hodnoty celkové porozity.

 SÚRAO	Migrační procesy hornin Českého masivu	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 333/2018

6.7 Složení vod v horninovém masivu granitických hornin

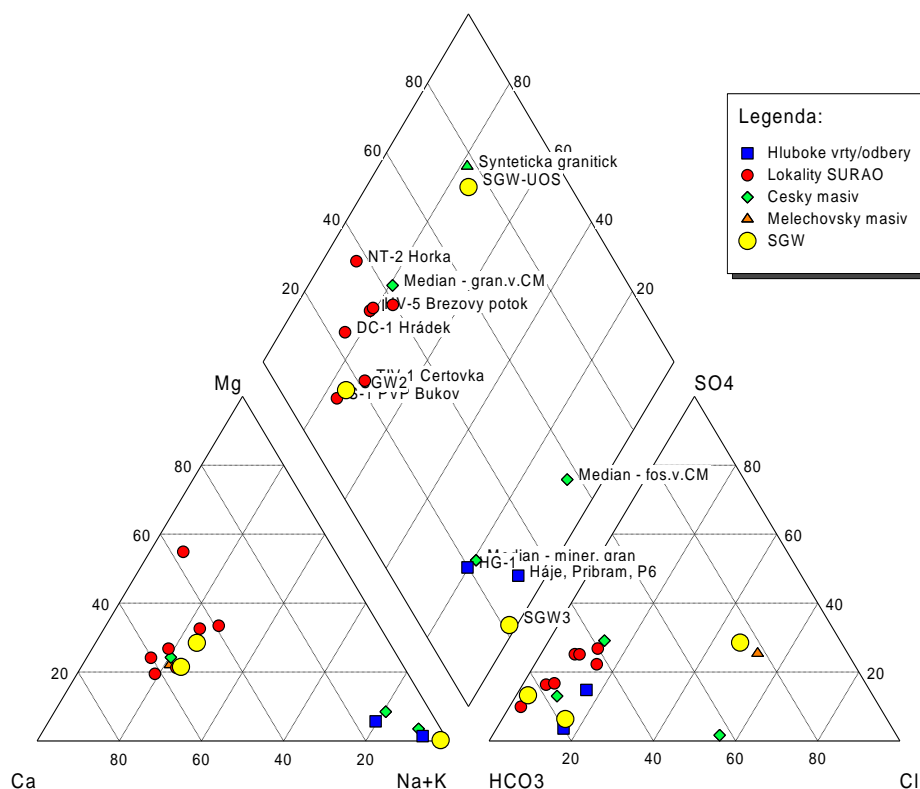
Základní vlastnosti vod granitických masivů a potenciálních lokalit byly vyhodnoceny ve zprávách Havlová et al. (2015) a Červinka et al. (2016).

Znalost složení podzemní vody je elementárním vstupem pro mnoho oblastí bezpečnosti HÚ. V prvních českých experimentálních pracích se vycházelo z průměrného složení podzemní vody z Melechovského masivu (Buňatová et al. 1995) nebo referenční podzemní vody z lokality Příbram (Háje, podzemní zásobník plynu). Komplexnější zhodnocení a přehled složení podzemních vod Českého masivu provedla Rukavičková et al. (2009). Dle dostupných analýz byly vody rozděleny na tři typy, jednak podzemní vody z granitů z hloubek větších než 30 m, dále na vody fosilní a vody minerální ovlivněné přiroum hlubinného CO₂. Chemickým složením podzemních vod na konkrétních potenciálních lokalitách se zabývala Havlová et al. (2015a). Základní chemické složení vybraných podzemních vod, které se používají pro přípravu syntetické podzemní vody, nebo jsou doporučeny jako referenční vody, jsou uvedeny v Tab. 28.

Tab. 28 Základní chemické složení podzemních vod 1) Melechovský masiv – průměr, příprava SGW (Buňatová et al. 1995), 2) Lokalita Háje u Příbrami, podzemní zásobník plynu, vývěr P-6, roky 1990-1996 – průměr, 3) Český masiv - medián (Rukavičková et al. 2009), 4) Český masiv, minerální vody - medián (Rukavičková et al. 2009), 5) Český masiv, fosilní vody - medián (Rukavičková et al. 2009), 6) Jáchymov, pramen Běhounek, vrt HG-1, 7) Lokalita Čertovka, vrt TIV-1 (Havlová et al. 2015), 8) Lokalita Magdaléna, vrt N-2 (Havlová et al. 2015), 9) Lokalita Horka, vrt NT-2 (Havlová et al. 2015), 10) Lokalita Čihadlo, vrt DE-2 (Havlová et al. 2015), 11) Lokalita Březový potok, vrt HV-5 (Havlová et al. 2015), 12) Lokalita Hrádek, vrt DC-1 (Havlová et al. 2015), 13) Lokalita Kraví Hora, vrt S-1, PVP Bukov (Havlová et al. 2015), 14) PVP Bukov (600 m) – průměr, příprava SGW2 , 15) Důl Rožná (1000 m) – průměr, příprava SGW3


č.	Hloubka (m)	pH	I (mol l ⁻¹)	Na (mg l ⁻¹)	K (mg l ⁻¹)	Ca (mg l ⁻¹)	Mg (mg l ⁻¹)	Cl (mg l ⁻¹)	HCO ₃ (mg l ⁻¹)	SO ₄ (mg l ⁻¹)	TDS (mg l ⁻¹)	Bilance kat/an %
1	-	8,3	0,003	10,6	1,8	27,0	6,4	42,4	30,4	27,7	152,8	0,0
2	900	9,1	0,002	75,9	0,5	3,9	0,6	14,9	137,6	18,3	114,1	0,1
3	-	-	0,003	11,4	2,3	30,1	8,0	11,7	85,4	34,1	183,0	5,3
4	-	-	0,020	501,5	25,5	60,9	28,7	92,6	1220,5	162,5	2092,2	3,5
5	-	-	0,020	1050,0	52,5	55,9	22,0	644,0	863,0	26,3	2713,7	22,2
6	-	-	0,006	141,0	8,5	23,6	5,5	52,4	442,0	15,6	690,0	-6,3
7	100	6,7	0,003	7,2	9,2	15,6	8,1	4,3	100,7	16,6	161,8	-3,1
8	70	7,5	0,004	12,5	3,6	24,1	10,8	12,1	95,8	33,6	203,7	2,1
9	80	7,9	0,006	5,1	4,2	30,0	27,0	20,0	143,0	40,0	286,0	0,3
10	80	6,9	0,004	10,7	1,5	29,6	8,8	8,2	112,9	33,6	213,0	-1,5
11	60	7	0,005	14,0	2,5	43,8	8,4	13,6	162,0	49,0	293,6	-6,8
12	90	7	0,003	6,5	1,7	25,1	6,1	5,3	91,5	15,9	170,4	0,6
13	600	8,6	0,004	14,7	2,5	33,6	7,8	2,9	155,6	13,9	264,8	1,4
14	600	8,2	0,004	16,5	2,1	34,6	8,3	3,3	168,7	21,0	287,5	-1,7
15	1000	9,2	0,004	89,4	0,7	1,3	0,1	18,7	163,5	10,5	319,3	0,4

Základní chemické složení podzemních vod z Tab. 28 bylo vyneseno do Piperova diagramu (viz Obr. 27). Zjednodušeně lze říci, že pro podzemní vody z potenciálních lokalit HÚ (hloubky odběru do 100 m, výjimka je PVP Bukov s hloubkou odběru 600 m) je dominantní složení Ca-Mg-HCO₃. Velmi dobře tomu odpovídá i medián podzemní vody z granitů Českého masivu obdobné hloubky. Průměrné složení vod Melechovského masivu, které je používáno pro přípravu syntetické granitické vody (ÚJV), se odlišuje zvýšeným obsahem chloridů. Generickým zástupcem je průměrné složení podzemní vody z PVP Bukov (600 m) označené jako SGW2. Hlubší podzemní vody, které jsou reprezentované souborem analýz z podzemního zásobníku plynu Háje (Příbram), analýzou pramene Běhounek (vrt HG-1, Jáchymov) a mediánem fosilních a minerálních vod z Českého masivu, se odlišují výrazným obsahem Na s dominantním aniontem HCO₃⁻ či Cl⁻. Je pravděpodobné, že s narůstající hloubkou se bude obsah sodíku v podzemních vodách zvyšovat, nicméně tomuto trendu například neodpovídá analýza z PVP Bukov z hloubek okolo 600 m. Generickým zástupcem je průměrné složení podzemní vody z dolu Rožná (1000 m), označené jako SGW3.



Obr. 27 Piperův diagram složení podzemních vod podle Tab. 28

Hloubkový interval přechodu podzemní vody z typu Ca-HCO₃ na Na-HCO₃ není přesně znám a to zejména proto, že není dostatek analýz podzemních vod z hlubších horizontů odpovídající plánované hloubce HÚ (500 m) jak z uvažovaných lokalit, tak z uvažovaných krystalických hornin (zejména granitické plutony). Vysvětlení nedostatku analýz podzemních vod je vcelku prosté, granitické plutony jsou homogenní horniny s velkým hloubkovým dosahem, které jsou všeobecně pro geologický výzkum málo zajímavé. Při současném stavu znalostí a dostupnosti dat se jeví jako velmi praktické připravit dvě generické syntetické podzemní vody. Jednu odpovídající typu Ca-HCO₃ a druhou Na-HCO₃ tak, aby byly pokryty oba zásadní typy vod. Tyto vody by byly reprezentativní pro všechny lokality, přestože drobné odchylky v chemickém

 SÚRAO	Migrační procesy hornin Českého masivu	Evidenční označení:	
		SÚRAO TZ 333/2018	

složení najít mezi lokalitami můžeme. Např. lokalita Horka se vyznačuje vyšším obsahem hořčíku. Nicméně tyto odlišnosti v chemickém složení jednotlivých lokalit by neměly mít podstatný vliv na sledované procesy a získané hodnoty pro bezpečnostní rozbor. Na základě odborné diskuse (proběhla 2. 3. 2016 na SÚRAO) byly pro přípravu obou základních typů vod vybrány analýzy z PVP Bukov a dolu Rožná, které se nacházejí v blízkosti lokality Kraví hora. Tyto vody byly zvoleny jako referenční vody pro další experimentální a modelové práce.

SGW2 – vychází z analýz podzemní vody na podzemním výzkumném pracovišti Bukov (PVP Bukov, jižní křídlo uranového dolu Rožná, 12p. cca 600 m pod povrchem). Svým složením reprezentuje mělký oběh podzemních vod v puklinovém prostředí krystalických hornin Českého masivu, typ Ca-HCO₃ (Červinka et al. 2016), viz Tab. 29.

SGW3 – vychází z analýz podzemní vody na dole Rožná (22-24p. cca 1000 m pod povrchem). Svým složením reprezentuje hluboký oběh podzemních vod v puklinovém prostředí krystalických hornin Českého masivu, typ Na-HCO₃ (Červinka et al. 2016), viz Tab. 29.

Tab. 29 Navržené chemické složení podzemní vody SGW2 a SGW3 na základě reálných analýz podzemních vod z PVP Bukov a dolu Rožná

Voda	pH	Koncentrace (mg l ⁻¹)								TYP	meq l ⁻¹		Bilance
		Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	F ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻		Kat.	An.	
SGW2	8,2	16,5	2,1	34,6	8,3	-	3,3	21,0	168,7	Ca-HCO ₃	3,18	3,32	-2,10 %
SGW3	9,2	89,4	0,7	1,3	0,1	9,9	18,7	10,5	163,5	Na-HCO ₃	3,98	3,95	0,40 %

Poznámka: u SGW2 je možné rozdíl bilance kompenzovat snížením koncentrace síranů, u SGW3 snížením koncentrace sodíku

 SÚRAO	Migrační procesy hornin Českého masivu	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 333/2018

7 Závěr

Tato zpráva shrnuje výsledky stanovení transportních parametrů granitických a metamorfovaných hornin z Českého masivu v rámci ZL Transport 1 a Charakterizace PVP Bukov. Zaměřila se především na stanovení sorpčních a difúzních vlastností, významných pro migraci radionuklidů, nedílnou součástí jsou však i stanovení souvisejících vlastností, jako je mineralogické složení, porozita, hustota, kationová výměnná kapacita, bez nichž tato stanovení nemají odpovídající výpovědní hodnotu.

Pro difúzní charakteristiky (efektivní difúzní koeficient D_e) lze říci, přestože zkoumané vzorky pochází z různých lokalit napříč ČR a jedná se o různé horninové typy, že získané difúzní efektivní koeficienty se pohybují v poměrně úzkém rozmezí: pro ^3H $(4-10) \cdot 10^{-13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, pro ^{36}Cl $(1-10) \cdot 10^{-13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ a pro ^{125}I $(1-4) \cdot 10^{-13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, přičemž hodnoty jdoucí pod $2 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ jsou pouhým odhadem pohybujícím se v mezi stanovitelnosti vycházející z mezí detekce. Hodnoty porozity se pohybují pod 1 %. Z hlediska sorpčního chování radionuklidů lze konstatovat, že na horninové materiály se silně sorbuje cesium, stroncium vykazuje mírný sorbční charakter, seleničitan a uran U(VI) lze zařadit mezi nesorbující se radionuklidy. Významným faktorem, který ovlivňuje chování radionuklidů, je mineralogické složení horninových vzorků. V případě kationtových radionuklidů Cs(I) a Sr(II) jsou významnými sorbenty vrstevnaté minerály (zde slídy).

Laboratorní práce v případě daného ZL pokračují dalším detailním studiem, jež bude výše uvedené výsledky doplňovat. Půjde zejména o studium sorpce radionuklidů na vybrané puklinové výplně, sledování vývoje Eh v prostředí odpovídajícímu prostředí HÚ a kvantifikace popisu pórové sítě (vizualizace pomocí metody C-14 PMMA a mikroskopického studia ve výbrusech). Všechny tyto informace budou shromážděny v závěrečné zprávě tohoto zadávacího listu a v revizi zprávy, definující transportní parametry pro horniny Českého masivu (Havlová et al. 2017).


 SÚRAO	Migrační procesy hornin Českého masivu	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 333/2018

8 Literatura

- ANDERSSON K., ALLARD B. (1983): Sorption of radionuclides on geologic media – A literature survey. I: Fission Products. Report 83-07. – SKB, Stockholm, Sweden.
- BISH, D. L., POST, J. E. (1989): QUANTITATIVE ANALYSIS, IN MODERN POWDER DIFFRACTION, REVIEW IN MINERALOGY, VOL. 20, BISH, D. L., POST, J. E. (EDS), Mineralogical Society of America, Washington, USA.
- BRUKER AXS (2015): Diffrac.Eva, 4.1.Karlsruhe, Germany.
- BRUKER AXS (2015): Topas 5.Karlsruhe, Germany.
- BUKOVSKÁ Z, VERNER K, BRÁZDA L., BURIÁNEK D., DOBEŠ P., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ P., ERBAN V., FRANĚK J., HALODOVÁ P., HANÁK J., HAVLOVÁ V., HOLEČEK J., JAČKOVÁ I., JELÉNEK J., KAŠPAR V., KOLOMÁ K., KOPAČKOVÁ V., KOUČKÁ L., KUČERA P., LAUFEK F., LNĚNIČKOVÁ Z., KOČERGINA J., MYŠKA O., NAHODILOVÁ R., NOVOTNÁ I., PERTOLDOVÁ J., RUKAVIČKOVÁ L., SOEJONO I., ŠVAGERA O., TOMEK F., VESELOVSKÝ F., ZUNA M. (2017): Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov, závěrečná zpráva. Technická zpráva č. 191/2017, SÚRAO, Praha, 2017.
- BUŇATOVÁ V., JELÍNEK E., KUČERA J., ŘANDA Z. (1995): Interakce štěpných produktů s horninami. - Zpráva grantu GA ČR 205/93/0702. PřF UK Praha.
- CARBOL P., ENGVIST I. (1997): Compilation of radionuclide sorption coefficients for performance assessment. SKB rapport R-97-13. – SKB, Stockholm, Sweden.
- CRANK J. (1975): The Mathematics of diffusion. Second edition. Oxford university press. ISBN 0198533446.
- CRAWFORD J., NERETNIEKS I., MALMSTRÖM M. (2006): Data and uncertainty assessment for radionuclide K_d partitioning coefficients in granitic rock for use in SR-Can calculations. Report R-06-75. – SKB, Stockholm, Sweden.
- ČERNÝ P., DOMEČKA K., MAREK K., KŘÍŽOVÁ H., RŮŽIČKA J. (1998). Závěrečná zpráva geologického průzkumu lokality Panské Dubenky, okr. Jihlava. Stavební geologie geotechnika, Praha.
- ČERVINKA R. (2014): Stanovení kationtové výměnné kapacity (CEC) a výměnných kationtů pomocí metody s Cu(II)triethylentetraminem. Certifikovaná metodika. Č.j. SÚJB/ONRV/15452/2014.
- ČERVINKA R. A GONDOLLI (2016): Výběr reprezentativních podzemních vod a příprava jejich syntetických ekvivalentů. - TZ 41/2016. SÚRAO Praha, 122 str
- ČERVINKA R., HAVLOVÁ V., VIDENSKÁ K., PALÁGYI Š., VECERNÍK P., ŠTAMBERG K., VOPÁLKA D., HOFFMANOVÁ E., VAŠÍNOVÁ GALIOVÁ M., HAVRÁNEK V. (2012): Výzkum a vývoj metodik hodnocení interakce radionuklidu s horninovým prostředím (FR-T11/362) – Zpráva ÚJV Řež, a. s., ÚJV 13819, 143 str.
- ČERVINKA R., VEČERNÍK P., KAŠPAR V., VAŠÍČEK R. (2018): Kompletní charakterizace bentonitu BCV 2017. Samostatná příloha 3. průběžné zprávy. TZ pro SÚRAO, v procesu schvalování. SÚRAO, Praha, 2018.
- ČERVINKA R., VOPÁLKA D., ADAM R., BRÁZDA L., DRTINOVÁ B., HOFMANOVÁ E., KITNEROVÁ J., RAMEŠOVÁ L., REIMITZ D., ŠIMÚTHOVÁ Z., ŠTAMBERG K., VETEŠNÍK A. (2015): Transport radionuklidů z úložiště / vstupní parametry a procesní modely pro hodnocení transportu radionuklidů přes inženýrské bariéry, 1. průběžná zpráva. Technická zpráva č. 2015/18, SÚRAO, Praha, 2015.
- EBONG F. S., EVANS N. (2011): Sorption of Ni And Eu in a Multi-element System. – J. Mat. Sci. Engin., B1, 504–515.


 SÚRAO	Migrační procesy hornin Českého masivu	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 333/2018

- FIZ (2015): ICSD Database, Karlsruhe, Germany.
- FR-TI1/367 - Výzkum vlivu mezizrnné propustnosti granitů na bezpečnost hlubinného ukládání do geologických formací a vývoj metodiky a měřicí aparatury (2009-2015)
- GARCÍA-GUTIÉRREZ, M., CORMENZANA, J. L., MISSANA, T., MINGARRO, M., MOLINERO, J. (2003): Overview of laboratory methods employed for obtaining diffusion coefficients in FEBEX compacted bentonite. – J. of Iberian Geology 32, 37-53.
- GONDOLLI J., BRYNYCH V., DRTINOVÁ B., HOFMANOVÁ E., VEČERNÍK P., VIDENSKÁ K., VOPÁLKA D. (2013) Výzkum interakčních procesů vybraných radionuklidů s materiály inženýrských bariér, Zpráva 14270, projekt TIP FR-TI1/362, SÚRAO, Praha, 2013.
- HAKANEN M., ERVANNE H., PUUKKO E. (2014): Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto. POSIVA 2012-41. – Posiva Oy, Eurajoki, Finland.
- HANÁK J., CHLUPÁČOVÁ M., ONDRA P., HROUDA F., SOSNA K., ŽIŽKA J., KAŠPAREC I., DĚDEČEK P. (2017). Stanovení petrofyzikálních charakteristik horninového prostředí pro území potenciálních lokalit HÚ. Závěrečná zpráva číslo 103/2017, SÚRAO, Praha, 2017.
- HAVLOVÁ V. (2017): Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov. Závěrečná zpráva, SÚRAO, Praha, 2017.
- HAVLOVÁ V., KOLOMÁ K., BRÁZDA L., RUKAVIČKOVÁ L. (2017): Odhad hodnot transportní charakteristiky krystalinických hornin Českého masivu. - TZ 102/2017. SÚRAO Praha.
- HAVLOVÁ V., MILICKÝ M., UHLÍK J., KRÁLOVCOVÁ J. (2015b): Modely a výpočetní kódy pro určení transportních cest a hodnocení transportu radionuklidů přes horninové prostředí. - TZ 16/2015. SÚRAO Praha.
- HAVLOVÁ V., VIDENSKÁ K., GONDOLLI J., MILICKÝ M., GVOŽDÍK L., KRÁLOVCOVÁ J., RUKAVIČKOVÁ L. (2015a): MIGRAČNÍ PROCESY RADIONUKLIDŮ V PROSTŘEDÍ KRYSTALICKÝCH HORNIN A MIGRAČNÍ PARAMETRY HORNIN ČESKÉHO MASIVU. TZ 13/2015. SÚRAO PRAHA, 122 STR
- HAVLOVÁ V., VIDENSKÁ K., HOFMANOVÁ E., PALÁGYI Š., ŠTAMBERG K., VEČERNÍK P., VOPÁLKA D. (2013) Laboratorní výzkum vybraných vzorků horninového prostředí, Zpráva 14060, projekt TIP FR-TI1/362, SÚRAO, Praha, 2013.
- JAKOB, A. (2004): Matrix diffusion for performance assessment - experimental evidence, modelling assumptions and open issues. PSI Report Nr. 04-08.
- KLAJMON M., ČERVINKA R., HAVLOVÁ V., KOLOMÁ K., RUKAVIČKOVÁ L. (2017). Migrační procesy radionuklidů v prostředí krystalických hornin a migrační parametry hornin českého masivu. Tz 104/2017. Súrao praha
- MELNYK T. W., SKEET A. (1986): An improved technique for determination of rock porosity. – Can. J. Earth Sci. 23, 1068 - 1074.
- MÍSAŘ Z. (1983). Geologie ČSSR I. Český masív. Praha, 333 str.
- MUURI E., IKONEN J., MATARA-AHO M., LINDBERG A., HOLGERSSON S., VOUTILAINEN M., SIITARI-KAUPPI M., MARTIN A. (2016): Behavior of Cs in Grimsel granodiorite: sorption on main minerals and crushed rock. – Radiochim. Acta, 104, 575–582.
- POST J.E., BISH D.L. (1989): Rietveld refinement of crystal structures using powder X-ray diffraction data. In: Bish, D.L. and Post, J.E. (Eds), Reviews in Mineralogy - Modern Powder Diffraction, Mineralogical Society of America, 20, 277-308.
- RUKAVIČKOVÁ L., BREITER K., HOLEČEK J., PAČES T., PROCHÁZKA J., HANÁK J., DOBEŠ P., HAVLOVÁ V., VEČERNÍK P., HERCÍK M. (2009): Výzkum vlivu mezizrnné propustnosti granitů na bezpečnost hlubinného ukládání do geologických formací a vývoj metodiky a měřicí aparatury. Etapová zpráva o řešení projektu v roce 2009. Archív společnosti ISATech s.r.o.
- RUKAVIČKOVÁ L., HOLEČEK J., BREITER K., MAŇÁK L., DOBEŠ P., PACHEROVÁ P., PAČES T., HANÁK J., HANŽL P., NAJSER J., HAVLOVÁ V., ZÁRUBA J., BLÁHA V., MYŠKA O., ROJOVSKÝ M. (2011): Výzkum vlivu mezizrnné propustnosti granitů na bezpečnost hlubinného ukládání

 SÚRAO	Migrační procesy hornin Českého masivu	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 333/2018

do geologických formací a vývoj metodiky a měřicí aparatury. Vývoj metodiky terénního výzkumu hydrochemických parametrů na srovnávacích vrtech. – Závěrečná zpráva, 193 s. MS ČGS Praha

- SKAGIUS, K., NERETNIEKS, I. (1986). Porosities and diffusivities of some non-sorbing species in crystalline rocks. *Water Resour. Res.* 22, 389–397.
- SÖDERLUND M., LUSA M., VIRTANEN S., VÄLIMAA I., HAKANEN M., LEHTO J., LAHDENPERÄ A-M. (2014): Distribution Coefficients of Caesium, Chlorine, Iodine, Niobium, Selenium and Technetium on Olkiluoto Soils. Working Report 2013-68. – Posiva Oy, Eurajoki, Finland.
- SÖDERLUND M., VIRKANEN J., HOLGERSSON S., LEHTO J. (2016): Sorption and speciation of selenium in boreal forest soil. – *J. Environ. Radioact.*, 164, 220–231.
- STUMPF S., STUMPF T., WALTHER C., BOSBACH D., FANGHÄNEL T. (2006): Sorption of Cm(III) onto different Feldspar surfaces: a TRLFS study. – *Radiochim. Acta*, 94, 243–248.
- ŠTAMBERG K. (1998): Modelování migračních procesů v životním prostředí. – Vydavatelství ČVUT, Praha.
- TICKNOR K. V., VANDERGRAAF T. T. (1989): Radionuclide sorption on primary and fracture-filling minerals from the East Bull Lake pluton, Massey, Ontario, Canada. – *Appl. Geochem.*, 4, 163–176.
- VAN LOON L. R., SOLER J. M, JAKOB A., BRADBURY M. H. (2003): Effect of confining pressure on the diffusion of HTO, ³⁶Cl⁻ and ¹²⁵I⁻ in a layered argillaceous rock (Opalinus Clay): diffusion perpendicular to the fabric. *Applied Geogemistry* 18, 1653-1662.
- VOKÁL A., HAVLOVÁ V., HERCÍK M., LANDA J., LUKIN D., VEJDASA J. (2009): Aktualizace referenčního projektu hlubinného úložiště radioaktivních odpadů v hypotetické lokalitě. I. etapa - Analýza vstupních předpokladů řešení. 2.dílčí zpráva – Bezpečnostní aspekty a screeningové výpočty. - ÚJV Řež, a.s. pro SÚRAO.

 SÚRAO	Migrační procesy hornin Českého masivu	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 333/2018

9 Přílohy

Přehled výsledků stanovení pórovitosti a hustoty metodou nasycení vodou vzorků z lokalit (Tab. 30).

Tab. 30 Výsledky stanovení pórovitosti (%) a hustoty vzorků z lokalit

Kód vzorku	Pórovitost (%)	Objemová hustota (kg m ⁻³)	Mineralogická hustota (kg m ⁻³)	Lokalita	Hornina	Odběrový bod
BT8-1	0,58	2646	2661	110 Březový potok	amf. - biot. granodiorit	Defurovy Lažany
BT8-2	0,61	2649	2665	110 Březový potok	amf. - biot. granodiorit	Defurovy Lažany
BT8-3	0,59	2647	2663	110 Březový potok	amf. - biot. granodiorit	Defurovy Lažany
BT3-1	0,62	2653	2670	110 Březový potok	amf. - biot. granodiorit	Defurovy Lažany
BT3-2	0,62	2647	2663	110 Březový potok	amf. - biot. granodiorit	Defurovy Lažany
BT3-3	0,60	2651	2667	110 Březový potok	amf. - biot. granodiorit	Defurovy Lažany
TIV1_68A	0,25	2624	2631	120 Čertovka	hrubozrný biotitický granit	Tis u Blatna
TIV1_68C	0,26	2634	2641	120 Čertovka	hrubozrný biotitický granit	Tis u Blatna
TIV_90A	0,24	2616	2622	120 Čertovka	hrubozrný biotitický granit	Tis u Blatna
TIV_90B	0,27	2614	2621	120 Čertovka	hrubozrný biotitický granit	Tis u Blatna
TIV_90C	0,26	2617	2624	120 Čertovka	hrubozrný biotitický granit	Tis u Blatna
TG3-1	0,38	2634	2644	120 Čertovka	hrubozrný biotitický granit	Tis u Blatna
TG3-2	0,44	2628	2640	120 Čertovka	hrubozrný biotitický granit	Tis u Blatna
TG3-3	0,49	2623	2636	120 Čertovka	hrubozrný biotitický granit	Tis u Blatna
D2-2-1	0,59	2605	2620	130 Čihadlo	granit	Deštná
D2-2-2	0,59	2609	2624	130 Čihadlo	granit	Deštná
D2-2-3	0,59	2595	2611	130 Čihadlo	granit	Deštná
D2-1-4	0,60	2607	2622	130 Čihadlo	granit	Deštná
D2-1-5	0,60	2605	2620	130 Čihadlo	granit	Deštná
PZV1_97A	0,39	2743	2754	140 Horka	amf - biot melasyenit	Pozdátky
PZV1_90A	0,37	2774	2784	140 Horka	amf - biot melasyenit	Pozdátky
PZV1_90B	0,34	2749	2759	140 Horka	amf - biot melasyenit	Pozdátky
PZV1_90C	0,38	2752	2762	140 Horka	amf - biot melasyenit	Pozdátky
S6-1	0,51	2791	2805	140 Horka	amF--+BIOT granit - syenit	Oslavička
S6-2	0,57	2790	2806	140 Horka	amF--+BIOT granit - syenit	Oslavička

S6-3	0,62	2754	2771	140 Horka	amF-+BIOT granit - syenit	Oslavička
GC3-1	0,87	2610	2633	150 Hrádek	granit Čeřínek	Bromberg
GC3-2	0,82	2613	2634	150 Hrádek	granit Čeřínek	Bromberg
GC3-3	0,83	2601	2623	150 Hrádek	granit Čeřínek	Bromberg
GB2-1	0,90	2596	2619	150 Hrádek	muskovit-biotitický granit /granodiorit	Boršov
GB2-2	0,91	2599	2623	150 Hrádek	muskovit-biotitický granit /granodiorit	Boršov
GB2-3	0,87	2604	2627	150 Hrádek	muskovit-biotitický granit /granodiorit	Boršov
GB4-1	0,85	2593	2615	150 Hrádek	muskovit-biotitický granit /granodiorit	Boršov
GB4-2	0,89	2598	2622	150 Hrádek	muskovit-biotitický granit /granodiorit	Boršov
GB4-3	0,91	2586	2610	150 Hrádek	muskovit-biotitický granit /granodiorit	Boršov
TT6-1	0,73	2738	2758	160 Magdaléna	syenit	Klokoty -tábor
TT6-2	0,67	2743	2761	160 Magdaléna	syenit_	Klokoty -tábor
TT6-3	0,70	2744	2763	160 Magdaléna	syenit_	Klokoty -tábor
GRB-1-1	0,33	2635	2644	170 Kraví hora	granulit	Dolní Bory
GRB-1-2	0,35	2632	2632	170 Kraví hora	granulit	Dolní Bory
GRB-2-1	0,36	2636	2646	170 Kraví hora	granulit	Dolní Bory
GRB-2-2	0,36	2636	2646	170 Kraví hora	granulit	Dolní Bory
GRB-3-1	0,35	2637	2646	170 Kraví hora	granulit	Dolní Bory
GRB-3-2	0,36	2628	2638	170 Kraví hora	granulit	Dolní Bory
GRB-3-3	0,34	2630	2639	170 Kraví hora	granulit	Dolní Bory
G5-1	0,60	2641	2657	170 Kraví hora	biotitický granulit	Moravské Pavlovice
G5-2	0,46	2650	2662	170 Kraví hora	biotitický granulit	Moravské Pavlovice
G5-3	0,45	2646	2658	170 Kraví hora	biotitický granulit	Moravské Pavlovice
PDV1_89A	0,41	2620	2631	Panské Dubenky	porfyrický dvojslídny granit	Panské Dubenky
PDV1_89B	0,4	2620	2630	Panské Dubenky	porfyrický dvojslídny granit	Panské Dubenky
PDV1_89C	0,41	2609	2620	Panské Dubenky	porfyrický dvojslídny granit	Panské Dubenky
PDV1_97A	0,42	2617	2628	Panské Dubenky	porfyrický dvojslídny granit	Panské Dubenky
PDV1_30A	0,84	2601	2623	Panské Dubenky	porfyrický dvojslídny granit	Panské Dubenky
PDV1_30B	0,83	2605	2627	Panské Dubenky	porfyrický dvojslídny granit	Panské Dubenky
PDV1_51A	0,76	2601	2620	Panské Dubenky	porfyrický dvojslídny granit	Panské Dubenky
PDV1_51B	0,81	2601	2621	Panské Dubenky	porfyrický dvojslídny granit	Panské Dubenky
PDV1_72A	0,52	2616	2630	Panské Dubenky	porfyrický dvojslídny granit	Panské Dubenky
PDV1_79A	0,46	2624	2636	Panské Dubenky	porfyrický dvojslídny granit	Panské Dubenky

 SÚRAO	Migrační procesy hornin Českého masivu	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 333/2018

Přehled výsledků stanovení pórovitosti a hustoty metodou nasycení vodou vzorků z lokality PVP Bukov – 170 Kraví Hora (Tab. 31).

Tab. 31 Výsledky stanovení pórovitosti (%) a hustoty vzorků z lokality PVP Bukov – 170 Kraví Hora

Kód vzorku	Pórovitost %	Objemová hustota (kg m ⁻³)	Mineralogická hustota (kg m ⁻³)	Hornina
S3-3/1	0,29	2895	2904	Migmatizovaný amfibolický amfibolit
S3-3/2	0,26	2894	2902	Migmatizovaný amfibolický amfibolit
S3-3/3	0,31	2893	2902	Migmatizovaný amfibolický amfibolit
S3-4/1	0,42	2866	2878	páskovaná amfibolická rula s biotitem
S3-4/2	0,33	2810	2819	páskovaná amfibolická rula s biotitem
S3-4/3	0,39	2788	2799	páskovaná amfibolická rula s biotitem
S4-3/1	0,30	2809	2818	Amf. Rula, rekrystalovaná
S4-3/2	0,23	2799	2805	Amf. Rula, rekrystalovaná
S4-3/3	0,28	2794	2801	Amf. Rula, rekrystalovaná
S4-2/1	0,18	2722	2727	Migmatit, Leukosom
S4-2/3	0,14	2716	2720	Migmatit, Leukosom
S4-2/4	0,18	2726	2731	Migmatit, Leukosom
S4-4/2	0,45	2937	2950	Amfibolit
S4-4/3	0,58	2889	2906	Amfibolit

NAŠE BEZPEČNÁ BUDOUCNOST



SÚRAO

Správa úložišť radioaktivních odpadů
Dlážděná 6, 110 00 Praha 1
Tel.: 221 421 511, E-mail: info@surao.cz
www.surao.cz