

Analýza FEPs horninového prostředí

Autoři: Nahodilová R. a kolektiv

Praha, 2022

Tato zpráva byla zpracována v projektu financovaném SÚRAO. Presentovaná stanoviska a dosažené odborné závěry jsou názory autora (autorů) a nemusí nutně představovat odborné názory SÚRAO

NÁZEV ZPRÁVY: Analýza FEPs horninového prostředí

NÁZEV PROJEKTU: Výzkumná podpora pro bezpečnostní hodnocení technického řešení hlubinného úložiště – Analýza FEPs

IDENTIFIKACE V RÁMCI PROJEKTU:

Průběžná zpráva

ČÍSLO SMLOUVY: SO 2021-007-03

Bibliografický zápis: Nahodilová R., Havlová V., Polák M., Pospíšková I., Franěk J., Aue M., Buriánek D., Holeček J., Hroch T., Kryl J., Mysliveček J., Nývlt D., Švagera O., Štědrá V., Vacek F., Žáček V., Zuna M., Večerník P., Gvoždík L., Milický M., Jankovec J., Černý M., Vozár M. (2022): Analýza FEPs horninového prostředí, MS SÚRAO TZ 619/2022, Praha.

ŘEŠITELÉ:

Česká geologická služba¹, AFRY CZ², ÚJV Řež a.s.³, PROGEO s.r.o.⁴,

AUTORSKÝ KOLEKTIV:

Nahodilová R.¹, Franěk J.¹, Aue M.¹, Buriánek D.¹, Holeček J.¹, Hroch T.¹, Kryl J.¹, Mysliveček J.¹, Nývlt D.¹, Švagera O.¹, Štědrá V.¹, Vacek F.¹, Žáček V.¹

Pospíšková I.², Vozár M.²

Havlová V.³, Zuna M.³, Večerník P.³

Polák M.⁴, Gvoždík L.⁴, Milický M.⁴, Jankovec J.⁴, Černý M.⁴

Horní Indexy u jmen autorů odkazují na výčet institucí výše.

Antonín Vokál

Manažer projektu SÚRAO

30.9.2022

Ilona Pospíšková

Manažer projektu AFRY CZ s.r.o.

30.9.2022

Obsah

| | | |
|----------|-------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1 | Úvod | 14 |
| 2 | Přístup k popisu a nalezení FEP | 15 |
| 3 | Bezpečnostní funkce horninového prostředí | 18 |
| 3.1 | Legislativní požadavky a mezinárodní doporučení | 18 |
| 3.2 | Bezpečnostní funkce komponent úložiště | 19 |
| 4 | Obecný popis potenciálních lokalit | 21 |
| 4.1 | Březový potok | 21 |
| 4.1.1 | Charakteristika lokality | 21 |
| 4.1.2 | Regionálně geologický přehled | 21 |
| 4.1.3 | Regionálně geologická stavba | 21 |
| 4.1.4 | Regionální klimatické, hydrologické a hydrogeologické poměry | 22 |
| 4.2 | Horka | 23 |
| 4.2.1 | Charakteristika lokality | 23 |
| 4.2.2 | Regionálně geologický přehled | 24 |
| 4.2.3 | Regionálně geologická stavba | 24 |
| 4.2.4 | Regionální klimatické, hydrologické a hydrogeologické poměry | 25 |
| 4.3 | Hrádek | 26 |
| 4.3.1 | Charakteristika lokality | 26 |
| 4.3.2 | Regionálně geologický přehled | 27 |
| 4.3.3 | Regionálně geologická stavba | 27 |
| 4.3.4 | Regionální klimatické, hydrologické a hydrogeologické poměry | 28 |
| 4.4 | Janoch (ETE-Jih) | 29 |
| 4.4.1 | Charakteristika lokality | 29 |
| 4.4.2 | Regionálně geologický přehled | 30 |
| 4.4.3 | Regionálně geologická stavba | 30 |
| 4.4.4 | Regionální klimatické, hydrologické a hydrogeologické poměry | 31 |
| 5 | Vstupní podmínky pro specifikaci FEPs | 33 |
| 5.1 | Specifikace okrajových podmínek | 33 |
| 5.2 | Externí faktory, které mohou ovlivnit nastavené okrajové podmínky | 33 |
| 6 | Vlastnosti potenciálních lokalit – počáteční stav | 34 |
| 6.1 | Vlastnosti horninového masivu | 34 |
| 6.1.1 | Petrologický popis jednotlivých litologických typů | 34 |
| 6.1.2 | Prostorová distribuce litologických typů | 37 |

| | | |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 6.2 | Charakteristika křehkých struktur | 41 |
| 6.2.1 | Zlomy | 41 |
| 6.2.2 | Puklinové systémy | 44 |
| 6.3 | Geotermální charakteristika horninového prostředí | 48 |
| 6.3.1 | Tepelné parametry významné pro přenos tepla v horninovém prostředí..... | 48 |
| 6.3.2 | Tepelné parametry horninového masivu významné pro odvod tepla z HÚ | 52 |
| 6.4 | Geomechanická charakteristika | 55 |
| 6.4.1 | Geomechanické vlastnosti | 55 |
| 6.5 | Geochemická charakteristika | 58 |
| 6.5.1 | Geochemické složení litologických typů | 58 |
| 6.5.2 | Přítomnost akcesorických minerálů nestabilních v libovolném okamžiku sledovaného vývoje prostředí HÚ | 62 |
| 6.5.3 | Charakter horninového prostředí vlivem exogenních jevů (charakter regolitu).65 | |
| 6.5.4 | Alterace hornin vlivem endogenního původu (hydrotermální a pneumatolitická alterace minerálů a hornin, včetně okolí křehkých struktur)..... | 69 |
| 6.6 | Hydrogeologické vlastnosti..... | 72 |
| 6.6.1 | Tlakové poměry proudění..... | 72 |
| 6.6.2 | Propustnost horninového prostředí..... | 75 |
| 6.6.3 | Velikost proudění | 80 |
| 6.6.4 | Charakter drenážní báze..... | 83 |
| 6.7 | Transportní charakteristiky | 86 |
| 6.7.1 | Geometrie pukliny | 86 |
| 6.7.2 | Vlastnosti povrchu pukliny | 89 |
| 6.7.3 | Vlastnosti horninové matrice | 93 |
| 6.7.4 | Složení podzemní vody | 96 |
| 6.7.5 | Složení plynu | 101 |
| 7 | Procesy probíhající v různých fázích vývoje úložiště..... | 104 |
| 7.1 | Termální procesy | 104 |
| 7.1.1 | Procesy přenosu tepla v horninovém prostředí..... | 104 |
| 7.2 | Hydraulické procesy..... | 107 |
| 7.2.1 | Pukliny (rozpuštění a precipitace minerálů na puklinách, hydrotermální alterace na puklině)..... | 107 |
| 7.2.2 | Změna proudění podzemní vody v puklinách vlivem geologických procesů .. | 111 |
| 7.2.3 | Změna proudění vlivem klimatických změn | 112 |
| 7.2.4 | Změna proudění podzemní vody vlivem činnosti člověka | 114 |
| 7.3 | Mechanické procesy..... | 116 |

| | | |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 7.3.1 | Tektonika (reaktivace křehkých struktur – pohyby na zlomech)..... | 116 |
| 7.3.2 | Pomalé plastické deformace | 121 |
| 7.3.3 | Napětový stav horninového masivu a jeho změny (diferenciální a litostatické napětí) 124 | |
| 7.3.4 | Seismická stabilita území a její vývoj..... | 127 |
| 7.4 | Chemické procesy..... | 130 |
| 7.4.1 | Metamorfóza | 130 |
| 7.4.2 | Zvětrávání, eroze, zpětná eroze, denudace | 133 |
| 7.4.3 | Chemické a mineralogické změny | 136 |
| 7.4.4 | Chemické rovnováhy a kinetiky | 141 |
| 7.4.5 | Mikrobiální činnost | 145 |
| 7.5 | Transportní procesy | 147 |
| 7.5.1 | Transport v kapalně fázi | 147 |
| 7.5.2 | Transport v pevné fázi..... | 164 |
| 7.5.3 | Transport v plynné fázi | 166 |
| 7.6 | Procesy způsobené výstavbou a provozem úložiště..... | 167 |
| 7.6.1 | Tepelné ovlivnění prostředí provozem úložiště..... | 167 |
| 7.6.2 | Mechanické ovlivnění horninového prostředí výstavbou úložiště (vznik zón EDZ) 170 | |
| 7.6.3 | Ovlivnění hydraulických poměrů výstavbou úložiště (proudění v EDZ)..... | 173 |
| 7.6.4 | Ovlivnění chemických poměrů výstavbou, provozem a uzavřením HÚ..... | 176 |
| 8 | Externí vlivy | 179 |
| 8.1 | Geologické události..... | 179 |
| 8.1.1 | Svahové pohyby..... | 179 |
| 8.1.2 | Krasové jevy | 181 |
| 8.1.3 | Vulkanismus a doprovodné jevy vč. postvulkanických jevů | 183 |
| 8.1.4 | Seismické události | 186 |
| 8.2 | Klimatické události | 188 |
| 8.2.1 | Vliv chladného klimatu..... | 188 |
| 8.2.2 | Vliv teplého klimatu | 193 |
| 8.3 | Události v důsledku činnosti člověka | 201 |
| 8.3.1 | Realizace hlubokého vrtu | 201 |
| 8.3.2 | Antropogenní propady a deformace povrchu území | 202 |
| 9 | Zastoupení procesů v různých obdobích vývoje úložiště..... | 205 |
| 10 | Dostupnost a relevance stávajících modelů využívaných pro predikci a modelování procesů v HÚ..... | 208 |

Seznam příloh:

-

Seznam obrázků:

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Obr. 1 Schéma regionálně geologického členění lokality Březový potok. Červený úhelník vyznačuje detailní polygon pro potenciální umístění HÚ..... | 22 |
| Obr. 2 Schéma regionálně geologického členění lokality Horka. Červený úhelník vyznačuje detailní polygon pro potenciální umístění HÚ. | 25 |
| Obr. 3 Schéma regionálně geologického členění lokality Hrádek. Červený úhelník vyznačuje detailní polygon pro potenciální umístění HÚ. | 28 |
| Obr. 4 Schéma regionálně geologického členění lokality Janoch (ETE-J). Červený úhelník vyznačuje detailní polygon pro potenciální umístění HÚ..... | 31 |
| Obr. 5 Tepelná vodivost různých typů granitů a závislost změn tepelné vodivosti na teplotě. (in: Myslík a kol., 2011)..... | 53 |
| Obr. 6 Idealizovaný model konceptualizace prostředí hydrogeologického masivu | 76 |
| Obr. 7 Základní definice rozevření pukliny (Konzuk & Kueper, 2004) | 87 |
| Obr. 8 Schématické znázornění tortuozity (vlevo) a konstiktivity póru (vpravo)..... | 94 |
| Obr. 9 Příklad termálního konvektivního proudu v zemském plášti. Obdobný mechanismus se projevuje i v mnohem menším měřítku v dostatečně širokých puklinách v horninovém prostředí. (H. Schmeling, 2002)..... | 105 |
| Obr. 10 Procesy transportu radionuklidů v puklinovém prostředí krystalinických hornin (Poteri et al. 2002); červená šipka advektivní transport; zelená šipka difúze..... | 148 |
| Obr. 11 Difúze radionuklidu z pukliny (advektivní tok) do horniny (převzato od M. Siitari-Kauppi)..... | 151 |
| Obr. 12 Konceptní model retenčních procesů v puklině krystalických hornin (David Arcos, Amphos21)..... | 156 |
| Obr. 13 Schematické znázornění procesu hydrodynamické disperze: a), b) mechanická disperze, c) molekulární difúze (podle Beara, 1988)..... | 158 |
| Obr. 14 Procesy řídící mobilitu koloidů ve vodou nasycených porézních médiích: (1) uvolňování koloidů, (2) agregace koloidů, (3) imobilizace gravitačním usazováním agregátů, (4) imobilizace vlivem filtrace, (5) imobilizace depozicí nanočástic na rozhraní pevná fáze-voda, (6) transport rozptýlených nanočástic na velké vzdálenosti proudící vodou. (B) V nenасыčených porézních médiích mohou nastat další mechanismy retardace nanočástic: (7) imobilizace vlivem povrchového napětí a (8) imobilizace depozicí na rozhraní vzduch-voda (obrázek převzatý z Kretschmar a Schäfer (2005). | 161 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Obr. 15 Korelace mezi koncentrací koloidů a iontovou silou podzemní vody. Ruprechtov – prostředí jílu v nadloží granitických hornin; Grimsel (CH), Aspo (SE) – podzemní výzkumné laboratoře v krystalických horninách (Wold 2010)..... | 162 |
| Obr. 16 Konceptní příklad vývoj teploty a relativní vlhkosti (RH) s časem (Landolt et al. 2009). | 168 |
| Obr. 17 Procesy změn vlastností hornin s narušením masivu ražbou (Saiang 2008)..... | 171 |
| Obr. 18 Ilustrační neproporcionální časová osa významných událostí v geochemickém vývoji HÚ (Červinka et al. 2017)..... | 177 |

Seznam tabulek:

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tab. 1 Požadavky na horninové prostředí k zajištění vrcholových bezpečnostních funkcí | 20 |
| Tab. 2 Radiogenní produkce vybraných hornin v Českém Masivu dle Myslík a kol. 2011 | 49 |
| Tab. 3 Termofyzikální vlastnosti kandidátních lokalit (Zdroj: Kobyłka 2019)..... | 169 |
| Tab. 4 Zastoupení procesů v jednotlivých fázích vývoje úložiště | 206 |
| Tab. 5 Modelování procesů v horninovém prostředí – dostupnost modelovacích nástrojů.. | 209 |
| Tab. 6 Modelování vývoje událostí v horninovém prostředí – dostupnost modelovacích nástrojů | 215 |

Seznam použitých zkratk:

| | |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------|
| AV ČR | Akademie věd české republiky |
| CEC | Kationtová výměnná kapacita |
| CMIP5 | The Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 |
| ČGS | Česká Geologická Služba |
| ČR | Česká republika |
| DFN | Discrete Fracture Network |
| DPZ | dálkový průzkum země |
| EdZ | Excavation Disturbed Zone |
| EDZ | Excavation Damaged Zone |
| EDU | elektrárna Dukovany |
| ETE | elektrárna Temelín |
| FEP | Feature, Event, Process |
| FMV | fyzikálně – mechanické vlastnosti |
| GFÚ | Geofyzikální ústav Akademie věd České republiky |
| GCM | Globální Climate Model |
| GPS | Global Positioning System |
| HDZ | Highly Damaged Zone |
| HP | high pressure (vysokotlaký) |
| HT | high temperature (vysokoteplotní) |
| HÚ | hlubinné úložiště |
| IAEA | International Atomic Energy Agency |
| JE | jaderná elektrárna |
| LCL | Local Cubic Law |
| LGM | Last Glacial Maximum |
| MIS | Marine Isotope Stages |
| MP | medium pressure (střednětlaký) |
| NEA/OECD | Nuclear Energy Agency / Organisation for Economic Co-operation and Development |
| NRC | Nuclear Regulatory Commission |
| PGA | Peak Ground Acceleration |
| PGD | Peak Ground Displacement |
| PGV | Peak Ground Velocity |
| PSHA | Probabilistic Seismic Hazard Assessment |
| PVP | podzemní výzkumné pracoviště |
| RAO | radioaktivní odpad |
| RCM | Regional Climate Model |
| RCP | Representative Concentration Pathways |
| rDNA | ribozomální DNA |
| SKB | Svensk Kärnbränslehantering (Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co) |
| SSA | Specific Surface Area |
| SSP | Shared Socioeconomic Pathways |
| SÚRAO | Správa úložišť radioaktivních odpadů |
| TBM | Tunnel Boring Machine |
| TZ | technická zpráva |
| UOS | ukládací obalový soubor |
| ÚRAO | úložiště radioaktivního odpadu |

| | |
|-------|-------------------------------------------------|
| VJP | vyhořelé jaderné palivo |
| VVER | vodo-vodní energetický reaktor |
| WENRA | Western European Nuclear Regulators Association |

Vysvětlení pojmů:

Analýza FEP

Identifikace a posouzení FEP (Feature/vlastnost, Event/událost, Process/proces), které mohou ovlivnit bezpečnost úložiště, a to jak v období jeho provozu, tak po uzavření úložiště.

Bezpečnostní funkce

Bezpečnostní funkce je činnost systému, konstrukce, komponenty nebo jiné součásti jaderného zařízení, která je významná pro zajišťování jaderné bezpečnosti jaderného zařízení.

Hlubinné úložiště

Úložiště radioaktivního odpadu umístěné stovky metrů pod zemským povrchem a určené pro ukládání vysokoaktivního odpadu (vyhl. 378/2016 Sb., § 2).

Inženýrská bariéra

Člověkem vytvořená bariéra bránící transportu radionuklidů. Inženýrskou bariérou jsou například ukládací obalové soubory, na bázi bentonitu těsnící materiály, aj.

Jaderná bezpečnost

Stav a schopnost jaderného zařízení a fyzických osob obsluhujících jaderné zařízení zabránit nekontrolovatelnému rozvoji štěpné řetězové reakce nebo úniku radioaktivních látek anebo ionizujícího záření do životního prostředí a omezit následky nehod.

Komponenta

Část systému tvořená obvykle fyzickými prvky se stejnými, nebo velmi blízkými vlastnostmi (fyzikálními, chemickými, konstrukčními aj.), které je zároveň odlišují od jiných částí systému. Jedná se např. o konstrukční prvky úložiště nebo o horninové prostředí.

Proces (Process)

Přírodní nebo člověkem způsobený dlouhodobý vliv, který způsobuje postupnou změnu vlastností komponent a/nebo úložného systému. Jedná se např. o chemické procesy v materiálech inženýrských bariér.

Radioaktivní odpad

Věc, která je radioaktivní látkou nebo předmětem nebo zařízením ji obsahujícím nebo jí kontaminovaným, pro kterou se nepředpokládá další využití a která nesplňuje podmínky stanovené zákonem č. 263/2016 Sb. pro uvolňování radioaktivní látky z pracoviště.

Událost (Event)

Přírodní nebo člověkem způsobený krátkodobý vliv nebo jev, který může ovlivnit vlastnosti komponent a/nebo úložného systému. Jedná se např. o zemětřesení nebo pád obalového souboru.

Ukládání RAO

Trvalé umístění RAO do prostorů, objektů nebo zařízení bez úmyslu jejich dalšího přemístění.

Vlastnost (Feature)

Část úložného systému, její stav nebo charakteristika, která má potenciál ovlivnit chování systému z pohledu zajištění bezpečnostních funkcí. Jedná se např. konstrukční prvky úložiště, jejich materiálové složení nebo horninové prostředí a charakteristické vlastnosti, teplotu horninového prostředí.

Abstrakt

Práce je zaměřena na specifikaci FEPs hlubinného úložiště. Pro hlubší pochopení vlastností, událostí a procesů byl systém úložiště rozdělen na čtyři dílčí celky, rozpracované v samostatných zprávách:

- UOS s VJP;
- Úložiště VJP (důlní dílo a systém inženýrských bariér bez UOS s VJP);
- Horninové prostředí;
- Biosféra.

Tento dokument je zaměřen na identifikaci a popsání vlastností horninového prostředí, a událostí a procesů v něm probíhajících. Počátečním stavem pro popis vlastností je okamžik před zásahem člověka do horninového masivu.

Hodnocení vlivu procesů a událostí na bezpečnost je provedeno v čase, v období před zásahem člověka a po jeho zásahu, v období realizace, provozu a po uzavření úložiště.

Nalezené vlastnosti, události a procesy (FEP) a jejich znalost budou využity pro specifikaci scénáře normálního vývoje úložiště a možné alternativní scénáře. Tyto scénáře budou využity pro hodnocení dlouhodobé bezpečnosti.

Analýza je provedena pro období vývoje úložiště do 1 miliónu let.

Specifikace FEPs v horninovém prostředí má obecný charakter s přímým zaměřením na čtyři potenciální lokality pro vybudování hlubinného úložiště RAO a to: Březový potok, Horka, Hrádek a Janoch (ETE-Jih).

Klíčová slova

Hlubinné úložiště, FEP, vlastnost, událost proces, horninové prostředí

Abstract

FEPs of the DGR system are specified and developed. For a deeper understanding of features, events and processes, the repository system was divided into four sub-units, developed in separate reports:

- disposal waste package with SNF;
- SNF repository (mining work and engineering barrier system excluding waste package with SNF);
- Rock environment;
- Biosphere.

This document is focused on the identification and description the properties of the rock environment; events and processes taking place in it. The initial state for the description of the properties is the moment before human intervention in the rock massif.

The assessment of the impact of processes and events on safety is carried out over time, in the period before and after human intervention, in the period of implementation, operation and after the closure of the repository.

The features, events, and processes (FEP) identified, and their knowledge will be used to specify the normal scenarios and possible alternative scenarios of the DGR evolution in time. These scenarios will be used for long-term safety assessment.

The specification of FEPs in the rock environment is of a general nature with a direct focus on four potential sites for the DGR construction, namely: Březový potok, Horka, Hrádek and Janoch (ETE-Jih).

Keywords

Deep geological repository, FEP, feature, event, process, rock environment.

1 Úvod

Uzavření hlubinného úložiště a jeho stav v době uzavření je důležitým mezníkem pro hodnocení dlouhodobé bezpečnosti. Budoucí stav úložiště závisí na

- počátečním stavu inženýrských i přírodních bariér,
- procesech probíhajících v úložišti v závislosti na podmínkách, a jejich vývoji v čase,
- externích vlivech, které mohou ovlivnit normální (předpokládaný) vývoj úložiště.

Proto je důležité nalézt vlastnosti, které jsou důležité pro zajištění bezpečnostních funkcí úložiště, popsat jejich vstupní charakteristiky a jejich vývoj v čase; nalézt procesy, které mohou iniciovat změny vlastností nebo být jejich důsledkem; a identifikovat události, které jsou příčinou nebo následkem změny podmínek v úložišti.

Vlastnosti, události a procesy je třeba nalézt pro celý systém úložiště. Nicméně k jejich hlubšímu pochopení je účelné rozdělit systém na části, které budou tvořit logické celky. Následně je možné tyto celky sesadit a vyhodnotit chování celého systému.

Systém úložiště rozdělen na čtyři dílčí celky, rozpracované v samostatných zprávách:

- UOS s VJP (TZ 617/2022)
- Úložiště VJP – důlní dílo a systém inženýrských bariér bez UOS s VJP (TZ 618/2022);
- Horninové prostředí (TZ 619/2022);
- Biosféra (TZ 620/2022).

Specifikace a popis vlastností, událostí a procesů se v této zprávě týká horninového prostředí, popisu počátečních vlastností před zásahem člověka (výstavbou hlubinného úložiště) a procesů a událostí, které mohou mít vliv na hodnocení bezpečnosti úložiště.

S ohledem na to, že informace jsou zpracovány v samostatných zprávách, může dojít k přesahu informací. Zprávy jsou zpracovány tak, aby pro danou oblast byly samonosné. Až budou informace kompilovány do jedné zprávy, musí být tato okolnost při práci zohledněna.

Nalezené vlastnosti, události a procesy (FEP) a jejich znalost budou využity pro specifikaci scénáře normálního vývoje úložiště a možné alternativní scénáře. Tyto scénáře budou využity pro hodnocení dlouhodobé bezpečnosti.

Analýza je provedena pro FEP relevantní pro úložiště VJP pro období vývoje úložiště do 1 miliónu let.

Specifikace FEPs v horninovém prostředí má obecný charakter s přímým zaměřením na čtyři potenciální lokality pro vybudování hlubinného úložiště RAO a to: Březový potok, Horka, Hrádek a Janoch (ETE-Jih).

2 Přístup k popisu a nalezení FEP

Vyhláška č. 377/2016 Sb., § 9, odst.6 říká, že pro zpracování bezpečnostního hodnocení je třeba identifikovat vlastnosti, události a procesy, které mohou narušit normální vývoj úložiště radioaktivního odpadu a mohou mít vliv na jeho bezpečnost.

Pro definici pojmů vlastností, událostí a procesů lze využít dokumenty OECD/NEA (2019), případně NRC (2003).

V souladu s definicemi z těchto dokumentů se

- **vlastností (Feature)** rozumí komponenta nebo její část, stav nebo charakteristika, která má potenciál ovlivnit chování systému z pohledu zajištění bezpečnostních funkcí. Jedná se např. konstrukční prvky úložiště, jejich materiálové složení nebo horninové prostředí a charakteristické vlastnosti;
- **událostí (Event)** rozumí přírodní nebo člověkem způsobený krátkodobý vliv nebo jev, který může ovlivnit vlastnosti komponent a/nebo úložného systému. Jedná se např. o zemětřesení nebo pád obalového souboru;
- **procesem (Process)** rozumí přírodní nebo člověkem způsobený dlouhodobý vliv, který způsobuje postupnou změnu vlastností komponent a/nebo úložného systému. Jedná se např. o chemické procesy v materiálech inženýrských bariér.

Pro nalezení a specifikaci možných FEP je tedy třeba postupovat v několika krocích:

- Definovat bezpečnostní funkce a specifikovat způsob, jak jsou plněny.
- Definovat komponenty úložiště důležité z pohledu zajištění bezpečnostních funkcí.
- Identifikovat a specifikovat množinu všech možných FEP:
 - Vlastnosti komponent úložiště důležitých z pohledu zajištění bezpečnostních funkcí.
 - Iniciační vlivy (procesy, události).
 - Změny vlastností vlivem působících iniciačních vlivů a procesů v úložišti (události, procesy).
 - Mechanismus uvolnění radionuklidů a transport radionuklidů do životního prostředí (procesy).
- Screening – posouzení úplnosti.

Tímto postupem jsou nalezeny všechny možné FEP, které je třeba vzít v úvahu pro hodnocení bezpečnosti úložiště, ale které samy o sobě ještě nevytvírají o hodnocení bezpečnosti úložiště.

FEP jsou základem pro definici a popis scénářů pro hodnocení bezpečnosti. Pro nalezení a specifikaci scénářů je třeba s FEP ještě dále pracovat:

- Je třeba vyhodnotit relevanci FEP pro bezpečnostní hodnocení HÚ, tedy zda FEP může vstupovat do hodnocení úložiště; především zda v místních podmínkách může dojít k posuzované události (např. zalednění v České republice v časovém horizontu bezpečnostního hodnocení). Nerelevantní FEP je možné pro další práci vyloučit.
- Existuje-li možnost, že FEP může nastat, je třeba zhodnotit pravděpodobnost, s jakou FEP nastane. Důležité je předběžně posoudit i možný důsledek FEP.

Kritériem pro vyloučení FEP ze sestavování scénářů pro bezpečnostní hodnocení může být například velmi nízká pravděpodobnost výskytu jevu během sledovaného období, nebo velmi malý (podlimitní) důsledek při nastalém jevu.

- Vyhodnotit vzájemné vazby relevantních FEP a na jejich základě popsat možné scénáře pro bezpečnostní hodnocení.

Velmi důležitým krokem je screening a posouzení úplnosti, a to především s pracemi zahraničních organizací, které jsou v procesu přípravy hlubinného úložiště dále než Česká republika. Jde především o práce OECD/NEA (2019), SKB nebo Posiva, především (SKB 2010a, b, c, 2014 a, b, 2015 a 2019 a, b, c), (Posiva 2014, 2017a, b).

Ačkoliv byla provedena poměrně podrobná rešerše zahraničního přístupu a identifikovaných FEP, vždy byla hodnocena i jejich relevance pro český koncept. Konečný výčet FEP a jejich popis v této zprávě je vztažen na technické řešení a podmínky českého referenčního projektu (Holub a kol 1999, Pospíšková a kol. 2011), který je založen na několika základních předpokladech:

- Úložiště bude vybudováno v krystalinických horninách;
- Ukládací horizont bude umístěn cca 500 m pod úroveň terénu;
- Úložiště bude důlní dílo se systémem přístupových chodeb a úložných vrtů;
- Tlumicí materiál (buffer) i výplňový materiál (backfill) bude bentonit české provenience;
- Ukládací obalový soubor pro VJP bude dvouplášťový, s vnějším obalem z uhlíkové oceli a vnitřním z nerezové oceli;
- Uložený inventář bude nepřepracované VJP.

Reference:

HOLUB J. A KOL (1999): Referenční projekt povrchových i podzemních systémů HÚ v hostitelském prostředí granitových hornin v dohodnuté skladbě úvodního projektu a hloubce projektové studie, EGP Invest spol. s r.o., Praha.

NRC (2003): Yucca Mountain Review Plan, Final Report. NUREG-1804, Revision 2. Washington, D.C.: U.S. Nuclear Regulatory Commission, 2003.

OECD/NEA (2019): International Features, Events and Processes (IFEP) List for the Geological Disposal of Radioactive Waste. Version 3.0. NEA/RWM/R(2019)1. OECD Nuclear Energy Agency, Paris, France, 2019.

POSIVA (2014): Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto – FEP Screening and Processing. Posiva 2014-03. Posiva Oy. Finland.

POSIVA (2017A): Safety Evaluation for a KBS-3H Spent Nuclear Fuel Repository at Olkiluoto – Description of the Disposal System. Posiva 2016-04. Posiva Oy. Finland. ISBN: 978-951-652-251-0, ISSN: 2343-4740

POSIVA (2017B): Safety Evaluation for a KBS-3H Spent Nuclear Fuel Repository at Olkiluoto – Features, Events, Processes. Posiva 2016-03. Posiva Oy. Finland.

POSPÍŠKOVÁ, I. A KOL. (2011): Aktualizace referenčního projektu hlubinného úložiště radioaktivních odpadů v hypotetické lokalitě, Závěrečná zpráva. ÚJV Řež a.s. -Divize Energoprojekt. Praha.

SKB (2010A): FEP report for the safety assessment SR-Site, SKB TR-10-45, Svensk Kärnbränslehantering AB. Sweden.

SKB (2010B): Geosphere Process Report for the Safety Assessment SR-Site, SKB TR-10-48 Svensk Kärnbränslehantering AB. Sweden.

SKB (2010C): Data report for the safety assessment SR-Site, SKB TR-10-52, Svensk Kärnbränslehantering AB. Sweden.

SKB (2014A): Geosphere Process Report for the Safety Assessment SR-PSU, SKB TR-14-05 Svensk Kärnbränslehantering AB. Sweden.

SKB (2014B): FEP report for the safety assessment SR-PSU, SKB TR-14-07, Svensk Kärnbränslehantering AB. Sweden.

SKB (2015): Safety analysis for SFR Long-term safety. Main report for the safety assessment SR-PSU, SKB TR-14-01, Svensk Kärnbränslehantering AB. Sweden.

SKB (2019A): FEP report for the safety assessment SE-FSL, SKB TR-19-02, Svensk Kärnbränslehantering AB. Sweden.

SKB (2019B): Climate and climate-related issues for the safety evaluation SE_SFL, SKB TR-19-04, Svensk Kärnbränslehantering AB. Sweden

SKB (2019C): Initial state for the repository for the safety evaluation SE-SFL, SKB TR-19-03, Svensk Kärnbränslehantering AB. Sweden.

3 Bezpečnostní funkce horninového prostředí

3.1 Legislativní požadavky a mezinárodní doporučení

Úložiště radioaktivního odpadu podléhá dikci zákona č.263/2016 Sb. V § 5, odst. 1 je uvedeno, že *Každý, kdo využívá jadernou energii nebo vykonává činnosti v rámci expozičních situací, je povinen a) předcházet radiační mimořádné události, a nastane-li, zajistit dodržení postupů pro zvládnutí radiační mimořádné události a omezit její následky, b) zajistit bezpečné vykonávání těchto činností a ochranu fyzické osoby a životního prostředí před účinky ionizujícího záření a c) postupovat tak, aby riziko ohrožení fyzické osoby a životního prostředí bylo tak nízké, jakého lze rozumně dosáhnout při zohlednění současné úrovně vědy a techniky a všech hospodářských a společenských hledisek.*

Paragraf 45, bod (3) zákona č.263/2016 Sb. říká, že: *Jaderné zařízení bez jaderného reaktoru musí od zahájení výstavby až do vyřazení z provozu nebo do doby stanovené v dokumentaci pro povolenou činnost v případě úložiště radioaktivního odpadu: a) fyzikálně znemožnit vznik kritického a nadkritického stavu, b) zajišťovat odvod vytvářeného tepla a c) zajistit stínění a zabránit úniku radioaktivní látky a šíření ionizujícího záření do životního prostředí.*

Bezpečnostní funkce úložiště a jeho jednotlivých komponent pro zajištění dlouhodobé bezpečnosti po uzavření úložiště vychází z požadavku § 18, odst. 1 vyhlášky č. 378/2016 Sb.: *Izolační a zadržné vlastnosti horninového prostředí v kombinaci s uměle vytvořenými překážkami zajišťují, že uložený radioaktivní odpad nezpůsobí při očekávaném vývoji hlubinného úložiště větší ozáření reprezentativní osoby, než je dáno dávkovou optimalizační mezí. Pro obyvatelstvo je optimalizační mez specifikována v § 82 odst. 1) atomového zákona na 0,25 mSv za rok.*

Definici uměle vytvořených překážek pak lze nalézt v § 5, bodu (3) vyhl. č. 329/2017 Sb.: *Funkci fyzických bezpečnostních bariér musí v případě jaderných zařízení bez jaderného reaktoru zajišťovat a) obalové soubory, nebo b) jiné systémy, konstrukce a komponenty pro 1. výrobu, zpracování a skladování jaderného materiálu nebo jiné radioaktivní látky a manipulaci s nimi, nebo 2. zpracování a ukládání radioaktivního odpadu.*

Z výše uvedeného lze vyvodit, že základní bezpečnostní funkce úložiště radioaktivního odpadu jsou definovány následujícími požadavky:

- fyzikálně znemožnit vznik kritického a nadkritického stavu;
- zajišťovat odvod vytvářeného tepla;
- zajistit stínění a zabránit úniku radioaktivní látky a šíření ionizujícího záření do životního prostředí;
- izolovat a zadržet radioaktivní odpad tak, aby nezpůsobil větší ozáření reprezentativní osoby, než je dáno optimalizační mezí.

Bezpečnostní funkce byly rovněž formulovány v dokumentech WENRA a IAEA, ze kterých vychází evropská i česká legislativa. Bezpečnostní funkce určené přímo pro úložiště radioaktivních odpadů byly formulovány v dokumentu (WENRA 2014):

- Control of the exposure of people and the environment (Kontrola expozice osob a životního prostředí);

- Containment and isolation of the radioactive material (Zadržení a izolace radioaktivního materiálu);
- Control of subcriticality (Kontrola podkritičnosti);
- Heat or gas removal, if applicable (Odvod tepla nebo plynu, pokud je to relevantní).

V dokumentu (IAEA 2011) jsou bezpečnostní funkce pro úložiště formulovány následovně:

- To contain the waste (Zadržet odpad);
- To isolate the waste from the accessible biosphere and to reduce substantially the likelihood of, and all possible consequences of, inadvertent human intrusion into the waste (Izolovat odpad od okolního životního prostředí a podstatně snížit pravděpodobnost a důsledky neúmyslného vniknutí člověka k radioaktivnímu odpadu);
- To inhibit, reduce and delay the migration of radionuclide at any time from the waste to the accessible biosphere (Zabránit, omezit a zpomalit migraci radionuklidů z odpadu do okolního životního prostředí);
- To ensure that the amounts of radionuclides reaching the accessible biosphere due to any migration from the disposal facility are such that possible radiological consequences are acceptably low at all times. (Zajistit, aby množství radionuklidů, které se dostanou do okolního životního prostředí, bylo vždy přijatelně malé).

Na základě této analýzy českých legislativních předpisů a mezinárodních doporučení (WENRA, IAEA) je možno vrcholové bezpečnostní funkce a požadavky pro úložiště radioaktivního odpadu shrnout následovně:

- 1) Fyzikálně znemožnit vznik kritického a nadkritického stavu;
- 2) Zajišťovat odvod vytvářeného tepla;
- 3) Zajišťovat odvod vytvářených plynů;
- 4) Zadržet radioaktivní odpad v obalovém souboru;
- 5) Zpomalit migraci radionuklidů od radioaktivního odpadu do životního prostředí;
- 6) Izolovat odpad od okolního životního prostředí, událostí a procesů probíhajících na povrchu, a podstatně snížit pravděpodobnost a důsledky neúmyslného vniknutí člověka k radioaktivnímu odpadu;
- 7) Kontrolovat expozici člověka a životního prostředí.

3.2 Bezpečnostní funkce komponent úložiště

Zajistit bezpečnost (tedy plnění výše definovaných bezpečnostních funkcí) musí celý systém úložiště, tedy celý soubor přírodních a inženýrských bariér (obalové soubory, tlumící a výplňový materiál, konstrukční prvky a horninové prostředí).

Ačkoliv bezpečnostní funkci plní celý systém, je dobré si pro jednotlivé komponenty definovat požadavky, kterými má komponenta přispět k zajištění bezpečnostních funkcí. Tyto požadavky jsou vodítkem pro specifikaci technických parametrů jednotlivých komponent.

V následující tabulce jsou uvedeny předběžné podpůrné požadavky k zajištění vrcholových bezpečnostních funkcí. Tyto požadavky jsou uvedeny pouze pro horninové prostředí, neboť jen to je předmětem zprávy.

V daný moment nemusí být výčet požadavků úplný, neboť z popisu FEP mohou vyplynout další, které mohou být po zvážení doplněny nebo přeformulovány.

Tab. 1 Požadavky na horninové prostředí k zajištění vrcholových bezpečnostních funkcí

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. Fyzikálně znemožnit vznik kritického a nadkritického stavu | |
| | - |
| 2. Zajišťovat odvod vytvářeného tepla | |
| | Vhodné vlastnosti horninového masivu umožní zajistit odvod generovaného tepla z VJP. Heterogenita horninového prostředí může negativně ovlivnit přenos tepla. |
| 3. Zajišťovat odvod vytvářených plynů | |
| | - |
| 4. Zadržet radioaktivní odpad v obalovém souboru | |
| | - |
| 5. Zpomalit migraci radionuklidů od radioaktivního odpadu do životního prostředí | |
| | Zvolit horninový masiv s co nejnižší mírou variability a co nejnižším stupněm křehkého porušení. |
| | Zvolit horninový masiv s nízkou hydraulickou vodivostí. |
| | Zvolit horninové prostředí s vhodnými vlastnostmi pro retenci radionuklidů |
| | Zamezit velkému poškození horniny v zóně EDZ využitím vhodné metody ražby |
| | Zajistit dostatečnou velikost neporušeného horninového masivu (tj. vzdálenost mezi úložištěm a hranicí horninového bloku) |
| 6. Izolovat odpad od okolního životního prostředí, událostí a procesů probíhajících na povrchu, a podstatně snížit pravděpodobnost a důsledky neúmyslného vniknutí člověka k radioaktivnímu odpadu | |
| | Vhodným umístěním a hloubkou omezit/zmírnit vliv externích přírodních událostí a lidské činnosti na úložiště a jeho inženýrské bariéry. |
| 7. Kontrolovat expozici člověka a životního prostředí | |
| | <i>Uvedená funkce je kontrolou zajištění vrcholových bezpečnostních funkcí 1-6.</i> |

Reference:

IAEA (2011): Disposal of radioactive waste, specific safety requirements, SSR-5, Vienna 2011.

WENRA (2014): WGWD Report: Waste And Spent Fuel Storage Safety Reference Levels, SRL DI-38, 28 April 2014.

4 Obecný popis potenciálních lokalit

4.1 Březový potok

4.1.1 Charakteristika lokality

Lokalita Březový potok se nachází v západních Čechách, v Plzeňském kraji, v okrese Klatovy, a to na území zhruba ohraničené obcemi Svěradice, Nezdřev, Oselce, Nekvasovy, Kovčín, Strážovice, Neprochovy, Smrkovec a Babín. (bližší charakteristika např. ve Franěk et al. 2018). Uvnitř detailního polygonu pro potenciální umístění hlubinného úložiště radioaktivního odpadu Březový potok (Obr. 1) se vyskytuje pouze 6 obcí, převážně malých vesnic s několika desítkami obyvatel. Tyto obce jsou spojeny relativně hustou sítí komunikací II. a III. třídy. V jihozápadní části se také nachází železniční trať vedoucí z Nepomuku do Horažďovic. Celé území lokality Březový potok se vyznačuje střídáním lesů (30 %) s ornou půdou (42 %), loukami (10 %) a pastvinami (10 %). Zbytek zaujímají vodní plochy, obytné plochy, průmyslové a obchodní zóny a dopravní plochy. Orná půda je využívána na pěstování obilnin, píce, brambor a zeleniny. Poměrně hojný a rozvinutý je chov dobytka a ryb. Oblast je celkově málo průmyslová, s výjimkou dřevozpracujícího a nábytkářského průmyslu. Průmyslová těžba se v oblasti nevyskytuje, v okolí Nažovských hor jsou pouze netěžená ložiska polymetalických rud (Pb, Zn, Ag, Cu). Území je proto využíváno převážně k zemědělství, lesnictví, pastevectví a chovu ryb.

Vymezená lokalita Březový potok zaujímá rozlohu 37,874 km². Umístění hlubinného úložiště RAO je navrženo v severní části detailního polygonu (Obr. 1), kde v rámci bezpečnostní funkce je izolační část hlubinného úložiště umístěna do stabilního podloží tvořeného magmatickými horninami středočeského plutonického komplexu (Mixa et al. 2019, Pertoldová et al. 2019, Havlová et al. 2018 aj.).

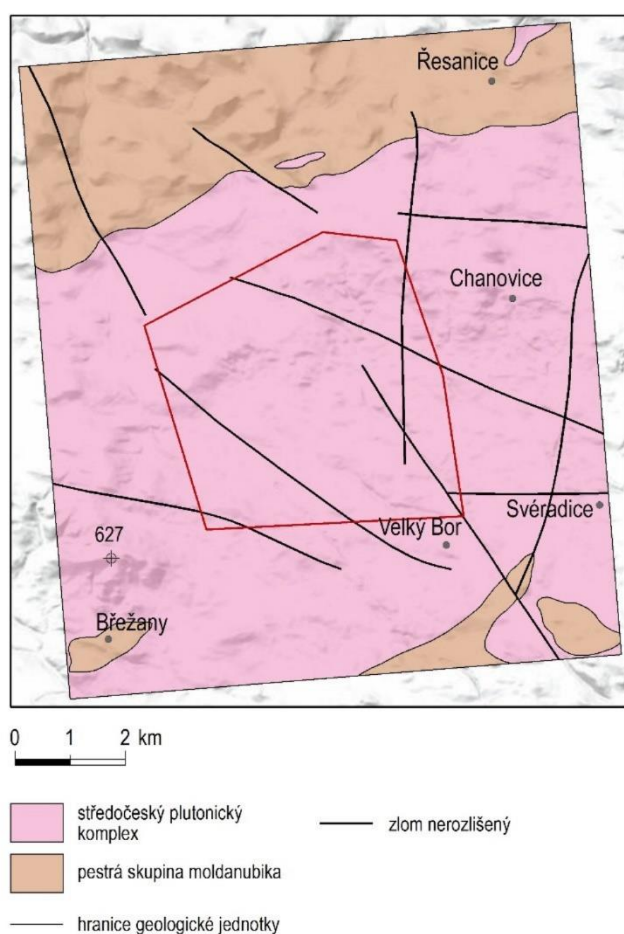
4.1.2 Regionálně geologický přehled

Horniny vyskytující se na území lokality Březový potok patří, podle platného regionálně geologického členění Českého masívu (Mísař et al. 1983; Chlupáč a Štorch eds. 1992), k regionálním celkům moldanubika a středočeského plutonického komplexu (Obr. 1). V rámci těchto jednotek se zde nacházejí horniny patřící k pestré skupině jednotky moldanubika (pararuly, migmatizované pararuly a migmatity) a magmatické horniny patřící k středočeskému plutonickému komplexu (chanovická apofýza v centrální části území a klatovská apofýza v jeho sz. rohu, Obr. 1). Na těchto horninách jsou uloženy horniny pokryvných útvarů, zastoupené svahovými a říčními sedimentárními horninami kvartérního stáří.

4.1.3 Regionálně geologická stavba

Hlavním horninovým tělesem pro umístění hlubinného úložiště na lokalitě Březový potok je blatenský a červenský granodiorit. Jde o hluboce založená tělesa s hloubkovým dosahem minimálně 2,5 km. Vzájemné kontakty těchto dvou typů granodioritů jsou intruzivní, stejně jako kontakty s okolními metamorfovanými horninami moldanubika. Přítomné žilné horniny V-Z orientace tvoří málo mocná tělesa o délce až několik set metrů. Z hlediska variability

horninového prostředí je petrologická a geochemická variabilita přítomných horninových těles a jednotlivých litologií nevýznamná. V horninových tělesech byly dostatečně věrohodně identifikovány jak magmatické, tak metamorfní duktilní deformační stavby (Franěk et al. 2018), (Mixa et al. 2019). Z hlediska křehké tektoniky byly na území lokality Březový potok identifikovány čtyři zlomy první kategorie a 26 zlomů druhé kategorie (Mixa et al. 2019). Nejvýznamnější zlomové struktury se vyskytují především ve V a JV části lokality a mají převážně zsz.–vjv. průběh. Další významnou skupinou zlomů jsou struktury sz.–jv. průběhu a s.–j. průběhu (Obr. 1). Dle prostorové orientace byly identifikovány jednotlivé puklinové systémy. Nejčastěji se vyskytují relativně strmé (sklon 70–90°) pukliny probíhající směrem SV–JZ, SZ–JV a SSZ–JJV. Běžně pozorované alterace u minerálů a přípovrchové zvětrání hornin nemají na homogenitu horninových bloků vliv.



Obr. 1 Schéma regionálně geologického členění lokality Březový potok. Červený úhelník vyznačuje detailní polygon pro potenciální umístění HÚ.

4.1.4 Regionální klimatické, hydrologické a hydrogeologické poměry

Západní část území lokality Březový potok náleží do hydrogeologického rajonu 6510 Krystalinikum v povodí Horní Vltavy a Úhlavy, východní část lokality spadá do hydrogeologického rajonu 6320 Krystalinikum v povodí Střední Vltavy. Klimatické charakteristiky (Quitt 1971) v lokalitě Březový potok odpovídají z větší části mírně teplé oblasti

MT7. Perspektivní území pro geologické charakterizační práce protíná rozvodnice mezi povodími 1-10-05 Úslava po ústí do Berounky a 1-08-01 Vydra a Otava po Volyňku. Severní část tohoto území odvodňuje Myslívský potok s přítoky, jižní část území odvodňuje především Březový potok s přítoky.

Pro širší zájmovou oblast granodioritového masivu jsou k dispozici pouze omezené bodové hydrogeologické informace do hloubky max. prvních desítek metrů. Hladina podzemní vody ve většině vrtů je blízko pod terénem, hydraulické vodivosti se pohybují v rozmezí řádu 10^{-5} m.s⁻¹ do řádu 10^{-7} m.s⁻¹. Vrtky jsou situovány v připovrchové zóně rozvolnění puklin s aktivním oběhem podzemních vod a s výrazně vyšší hydraulickou vodivostí (ve srovnání s horninovým prostředím v hloubce HÚ).

Připovrchovou zónu svahových sedimentů a zvětralinového pláště granodioritů lze obecně označit jako prostředí se slabou průlinově–puklinovou propustností. Na tuto nejsvrchnější zónu, mocnou řádově jednotky až první desítky metrů, navazuje připovrchová část intenzivního rozpukání a rozpojení puklin hydrogeologického masivu charakteristická relativně nízkou puklinovou propustností. Tyto dvě části horninového profilu tvoří hlavní kolektor krystalinika. V tomto kolektoru se vytváří několik dílčích zvodní.

Svrchní zvodeň rychlého mělkého lokálního proudění vzniká v prostředí kvartérních sedimentů a zvětralinového pláště. Hloubkový dosah zvodně je řádově do 10 až 20 metrů.

Akumulační možnosti svrchního kolektoru jsou vzhledem ke své geologické stavbě a mocnosti značně omezené a nedochází zde k tvorbě významnějších zdrojů podzemní vody.

Spodní, hlubší zvodeň je vázaná na puklinové prostředí pevných hornin. Její dosah je u migmatitů a rul do 40–50 m, u masivů granodioritových hornin může dosahovat do hloubek 100 až 120 m.

V hlubších částech krystalinika dochází k postupnému svírání puklin tíhou nadložních hornin a hydraulická vodivost se snižuje. Pomalý oběh podzemních vod probíhá výhradně po puklinách, zlomových pásmech a poruchových zónách.

Zdrojem podzemní vody na lokalitě je srážková infiltrace, ke které dochází v celé ploše území. Rozložení efektivní infiltrace je prostorově variabilní, průměrná velikost je $3,0 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^{-2}$ (Krásný et al. 1982). Do hlubších oblastí masivu, vzhledem k malé propustnosti, přetéka z připovrchové vrstvy pouze první jednotky procent celkového množství vody infiltrovaného ze srážek. Infiltrační oblasti pro plochu podzemní části HÚ (stanovené modelem) se nachází západně od hranice podzemní části HÚ v prostoru vrcholu Baba a na východě v oblasti hřebene nad obcí Maňovice.

4.2 Horka

4.2.1 Charakteristika lokality

Lokalita Horka se nachází v kraji Vysočina v okresech Třebíč a Žďár nad Sázavou (bližší charakteristika např. Franěk et al. 2018), a to na území zhruba ohraničené obcemi Kojatín, Horní Heřmanice, Břežejov, Martinice, Lavičky, Uhřínov, Horní Vilémovice a Trnava. Uvnitř detailního polygonu pro potenciálního umístění hlubinného úložiště radioaktivního odpadu Horka (Obr. 2) se vyskytují pouze 4 obce – Oslavička, Rohy, Hodov a Vlčatín, převážně malé

vesnice s několika desítkami obyvatel. Celé území lokality Horka se vyznačuje nepravidelným střídáním lesů (20 %) s ornou půdou (50 %), loukami a pastvinami (20 %). Zbytek tvoří vodní plochy, obytné plochy a dopravní infrastruktura. Orná půda je využívána na pěstování obilnin, píce, brambor a zeleniny. Poměrně rozvinutý je chov dobytka. Oblast je celkově málo průmyslová a to i vzhledem k absenci rudních i nerudných surovin v celé zájmové oblasti. Území je proto využíváno převážně k zemědělství, lesnictví a pastevectví.

Vymezená lokalita Horka zaujímá rozlohu 28,268 km². Umístění hlubinného úložiště RAO je navrženo v severozápadní části detailního polygonu (Obr. 2), kde v rámci bezpečnostní funkce je izolační část hlubinného úložiště umístěna do stabilního podloží tvořeného magmatickými horninami třebíčského durbachitového masívu (Mixa et al. 2019, Pertoldová et al. 2019, Havlová et al. 2018 aj.).

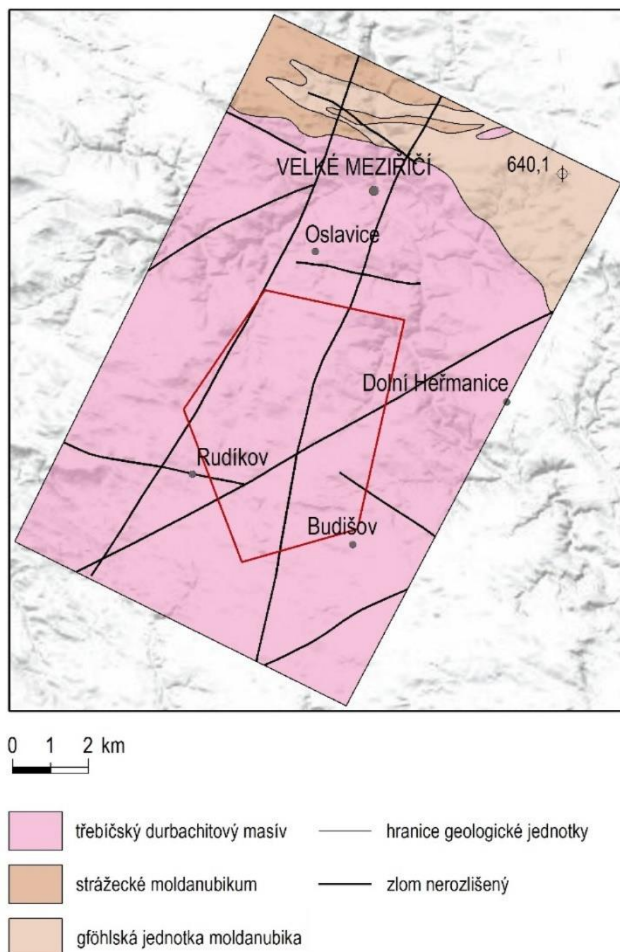
4.2.2 Regionálně geologický přehled

Z pohledu regionální geologie náleží území lokality Horka k moldanubiku (Misař et al. 1983), přesněji je situováno v severovýchodní části třebíčského masívu (Obr. 2). Dominantním litologickým typem popisované části třebíčského plutonu jsou amfibol-biotitické až biotitické melasyenity až melagranity (durbachity). Tyto horniny se mohou členit na strukturní podtypy podle zrnitosti a procentuálního zastoupením porfyrických vyrostlic živců, což ale nijak významně neovlivňuje jejich chemické složení a reologické vlastnosti. Běžně se vyskytují drobné žíly granitoidních hornin (aplitů, pegmatitů a leukogranitů, často s turmalínem). Leukogranity rovněž místy vystupují jako drobné intruze velikosti stovek metrů. Lokálně jsou na popisovaném území přítomny křemenné žíly o mocnosti do půl metru. Metamorfované horniny budují severní část popisovaného území lokality Horka a jsou reprezentovány MP-HT (střednětlakými a vysokoteplotními) metamorfovanými horninami drosendorfské jednotky moldanubika a HT-HP (vysokotlakými a vysokoteplotními) horninami gřöhlské jednotky. Krystalinický podklad je místy pokryt tenkou, maximálně několik m mocnou vrstvou kvartérních uloženin ve formě svahových a fluvialních sedimentů. Geologická charakteristika lokality je podrobně uvedena ve zprávách Fraňka et al. (2018) a Havlové et al. (2018).

4.2.3 Regionálně geologická stavba

Hlavním horninovým tělesem pro umístění hlubinného úložiště na lokalitě Horka je těleso třebíčského plutonu tvořené melasyenity až melagranity s porfyrickou texturou o variabilní zrnitosti (středně až hrubě zrnité). Z pohledu petrologických vlastností však jde o relativně homogenní prostředí s nevýraznou magmatickou a deformační foliací. V durbachitech byly zjištěny oblasti s variabilním zastoupením živcových vyrostlic (kumulátové stavby), xenolitů migmatitů a mikrogranulárních enkláv. Třebíčský pluton intruduje do okolních hornin moldanubika, kontakty jsou intruzivní. Jeho hloubkový dosah je odhadován na několik km. Třebíčský pluton je intrudován drobnými tělesy granitů o velikosti do několika stovek m². Tyto litologické nehomogenity však mají pouze lokální význam a s ohledem na reologickou podobnost nezhoršují kvalitu homogenity horninového prostředí. Zjištěné údaje potvrzují nízkou variabilitu fyzikálních vlastností horninového prostředí. Z pohledu křehké tektoniky bylo identifikováno sedm zlomů první kategorie a sedmáct zlomů druhé kategorie (Mixa et al. 2019). Na území lokality Horka dominují zlomové struktury ve směru: a) SSV–JJZ (vlčatínský zlom a velkomeziříčský zlom), b) SV–JZ (vidonínský zlom a valdíkovská mylonitová zóna), c) SSZ–JJV (heřmanický zlom), d) ZSZ–JVJ (pyšelský zlom aj.; vše Obr. 2). Dominantní

soubor puklin nelze jednoznačně určit, v území se nejčastěji vyskytují strmé pukliny (sklon 70-90°) upadající k S, J, SZ, JV, SV, JZ, V a Z. Dále pak pukliny se středními sklony (sklon 60-40°), které upadají k V, SZ a JV. Běžně pozorované hydrotermální alterace a přípovrchové zvětrání hornin nemají na homogenitu horninových bloků významný vliv.



Obr. 2 Schéma regionálně geologického členění lokality Horka. Červený úhelník vyznačuje detailní polygon pro potenciální umístění HÚ.

4.2.4 Regionální klimatické, hydrologické a hydrogeologické poměry

Podle hydrogeologické rajonizace (vyhláška č. 5/2011 Sb.) území lokality Horka spadá do hydrogeologického rajonu 6550 Krystalinikum v povodí Jihlavy. Z hlediska klimatické charakteristiky (Quitt 1971) leží lokalita Horka v mírně teplé oblasti MT5 (zcela minoritně klimatická oblast MT9). Perspektivním územím pro geologické charakterizační práce prochází rozvodnice mezi povodími 4-16-01 Jihlava po Oslavu a 4-16-02 Oslava a Jihlava od Oslavy po Rokytou. JZ oblast území (povodí 4-16-01) odvodňuje Mlýnský potok, který se do Jihlavy vlévá poblíž Třebíče. Zbylou oblast (povodí 4-16-02) odvodňují Balinka, Oslavička, Mařek a Kundelovský potok – pravostranné přítoky Oslavy.

Hydrogeologická prozkoumanost území je nízká a značně nerovnoměrná, pro širší zájmovou oblast třebíčského masivu jsou k dispozici pouze omezené bodové informace do hloubky max. prvních desítek metrů. Přípovrchovou zónu svahových sedimentů a zvětralinového pláště

durbachitů lze obecně označit jako prostředí se slabou průlinově-puklinovou propustností. Na tuto nejsvrchnější zónu, mocnou řádově jednotky až první desítky metrů, navazuje přípovrchová část intenzivního rozpukání a rozpojení puklin hydrogeologického masivu charakteristická relativně nízkou puklinovou propustností. Tyto dvě části horninového profilu tvoří hlavní kolektor krystalinika. V tomto kolektoru se vytváří několik dílčích zvodní. Svrchní zvoď rychlého mělkého lokálního oběhu vzniká v prostředí kvartérních sedimentů a zvětralinového pláště. Hlubkový dosah zvodně je řádově do 10 až 20 metrů. Hydraulická vodivost hornin se zde pohybuje v rozsahu tří řádů od 10^{-6} po 10^{-4} m.s⁻¹.

Spodní hlubší zvoď je vázaná na puklinové prostředí pevných hornin. Její dosah může být u durbachitových masivů přibližně 80 až 120 m p. ter. K odvodnění hlubší zvodně dochází v úrovni hlavních erozních bází lokality (řeky Oslava a Jihlava), většinou skrytě do kvartérních sedimentů. Častá je také drenáž prostřednictvím vodivých tektonických poruch. Hydraulická vodivost puklinového prostředí tohoto kolektoru je v rozmezí 3 řádů od 10^{-8} po 10^{-5} m.s⁻¹.

V hlubších částech krystalinika probíhá pomalé proudění podzemní vody výhradně po výrazných puklinách, zlomových pásmech a poruchových zónách.

Zdrojem podzemní vody na lokalitě je srážková infiltrace, ke které dochází v celé ploše území. Rozložení efektivní infiltrace je prostorově variabilní, průměrná velikost je $2,5 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^{-2}$ (Krásný et al. 1982). Do hlubších oblastí masivu, vzhledem k malé propustnosti, přetéka z přípovrchové vrstvy pouze první jednotky procent celkového množství vody infiltrovaného ze srážek. Hlavní infiltrační oblast (stanovená modelem) pro plochu podzemní části HÚ se nachází v oblasti rozvodí mezi Oslavičkou a Oslavou v prostoru Vičatínského vrchu a Hodovské horky), menší infiltrační oblast se vyskytuje v širší oblasti elevace Babí hora.

4.3 Hrádek

4.3.1 Charakteristika lokality

Lokalita Hrádek se nachází v kraji Vysočina v okresech Jihlava a Pelhřimov (bližší charakteristika např. Franěk et al. 2018), a to na území zhruba ohraničené obcemi Jezdovice, Dolní Cerekev, Cejle, Hubenov, Ježená, Jankov, Křemešník, Cejkov, Horní Cerekev a Batelov. Uvnitř detailního polygonu pro potenciálního umístění hlubinného úložiště radioaktivního odpadu Hrádek (Obr. 3) se vyskytují pouze 4 obce – Rohozná, Nový Rychnov, Milíčov a Hojkov, pouze Nový Rychnov je větší obec, jinak jsou to převážně malé vesnice s několika desítkami obyvatel. Celé území lokality Hrádek se vyznačuje převahou orné půdy (cca 50 %) nad lesy (30 %). Míra zalesnění mírně stoupá směrem k jihu. Tyto druhy krajinného pokryvu jsou prokládány mozaikou polí, luk a trvalých kultur (10 %), méně pak loukami a pastvinami (5 %). 3 % z celkové plochy území zaujímají obytné plochy a 2 % připadají na vodní plochy. Orná půda je využívána na pěstování obilnin, píce, brambor a zeleniny. Oblast je celkově málo průmyslová, s výjimkou obce Batelov na jižním okraji území, kde se nachází menší strojírenský závod. Průmyslová těžba se zde vyskytuje sporadicky, v zájmové oblasti je těžebna kamene pro hrubou stavbu a ušlechtilou kamenickou výrobu a několik prognózních zdrojů stavebního kamene. Rudní suroviny se v oblasti nevyskytují. Území je proto využíváno převážně k zemědělství a lesnictví.

Vymezená lokalita Hrádek zaujímá rozlohu 35,077 km². Umístění hlubinného úložiště RAO je navrženo v jihovýchodní části detailního polygonu (Obr. 3), kde v rámci bezpečnostní funkce

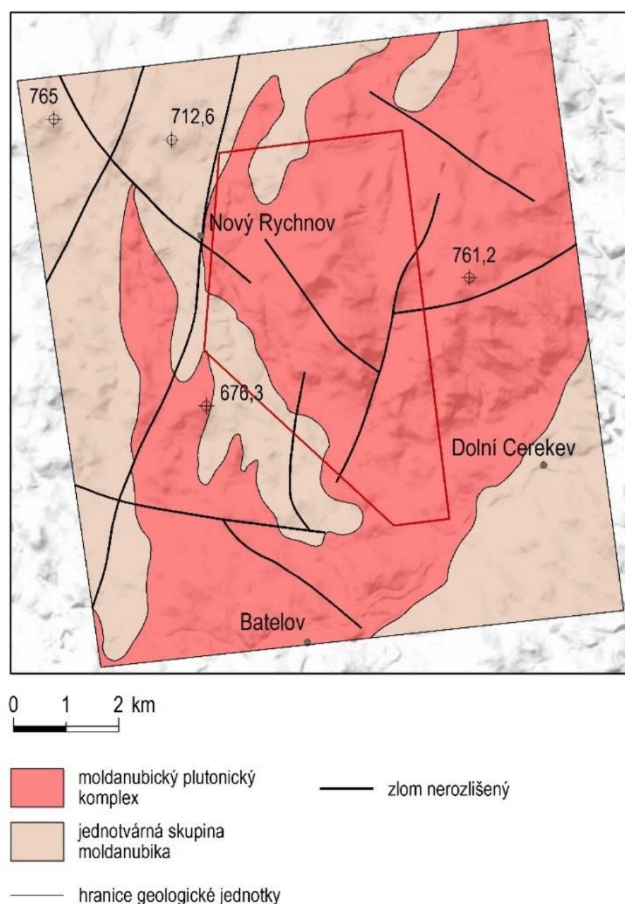
je izolační část hlubinného úložiště umístěna do stabilního podloží tvořeného magmatickými horninami moldanubického plutonického komplexu (Mixa et al. 2019, Pertoldová et al. 2019, Havlová et al. 2018 aj.).

4.3.2 Regionálně geologický přehled

Na základě platného regionálně geologického členění Českého masivu (Mísař et al. 1983) patří horninové komplexy této oblasti k regionálnímu celku moldanubika, respektive k jednotkám moldanubika jižních Čech (Chlupáč a Štorch 1992, Obr. 3). Na území lokality Hrádek byly identifikovány horniny monotónní skupiny moldanubika (migmatity, migmatizované pararuly a pararuly), granitoidy moldanubického plutonického komplexu (zejména těleso plutonu Čeříнку) a sedimenty pokryvných útvarů, mezi které patří kvartérní uloženiny ve formě zejména svahových a říčních sedimentů.

4.3.3 Regionálně geologická stavba

Hlavním horninovým tělesem pro umístění hlubinného úložiště na lokalitě Hrádek je těleso moldanubického plutonu, resp. dílčí intruze Čeřínek a Eisgarn. Tyto intruze jsou reprezentované různými varietami granitů s nevýraznou magmatickou foliací, které mají strmé intruzivní kontakty, a tak lze předpokládat jejich relativní mechanickou homogenitu. Petrologická variabilita granitů je z hlediska popsání a predikovatelnosti nevýznamná. V zájmovém polygonu je možné na základě expertního odhadu předpokládat mocnosti granitů zřejmě okolo 20 km. Žíly křemene a aplitů o mocnostech několika desítek metrů se vyskytují zejména v jihozápadní části masivu Čeříнку, z hlediska hodnocení mohou být významné z důvodu přítomnosti polymetalického zrudnění. Z pohledu křehké tektoniky byl na lokalitě ověřen jeden zlom první kategorie a 14 zlomů druhé kategorie (Mixa et al. 2019). Tyto zlomy mají převážně strmou orientaci a probíhají ve směru SSV–JJZ (paralelní s přibyslavskou mylonitovou zónou a jihlavskou brázdou) až S–J a v přibližně kolmé orientaci (ZSZ–VJV až V–Z) a nesou záznam polyfázové reaktivace (Obr. 3). Puklinové systémy se nejčastěji vyskytují ve formě strmých puklin (sklon 80–90°) probíhající zejména ve směrech V–Z, SV–JZ a SSV–JJZ a V–Z. Pukliny se středními sklony (sklon 60–40°) probíhající S–J směrem upadají generelně k V a Z. Pukliny subhorizontální (sklon 0–30°) se mimo zvětráváním vzniklých exfoliačních puklin, které byly z měření vyloučeny, na lokalitě vyskytují minimálně a kopírují trend puklin se středními sklony. Běžně pozorované alterace u minerálů a přípovrchové zvětrání hornin nemají na homogenitu horninových bloků zřejmě vliv.



Obr. 3 Schéma regionálně geologického členění lokality Hrádek. Červený úhelník vyznačuje detailní polygon pro potenciální umístění HÚ.

4.3.4 Regionální klimatické, hydrologické a hydrogeologické poměry

Území lokality Hrádek spadá do hydrogeologického rajonu 6550 Krystalinikum v povodí Jihlavy. Krystalinikum zde tvoří dvě hlavní hydrogeologické jednotky, granity typu Mrákotín a Čeřínek a metamorfované komplexy hornin jednotvárné skupiny moldanubika – pararulami a migmatity. Klimatické charakteristiky (Quitt et al. 1971) pro lokalitu Hrádek odpovídají z části mírně teplé (i když chladnější) oblasti MT3. Severovýchodní a jižní část území pak spadá do chladné klimatické oblasti CH7. Území lokality Hrádek je součástí povodí 4-16-01 Jihlava od Rokytne po ústí a Svatka od Jihlavy po ústí. Zájmové území je odvodňováno především do levostranných přítoků Jihlavy, Jedlovského potoka a Rohozné a jejich přítoků.

Širší oblast zájmového území je charakteristická nízkou mírou hydrogeologické prozkoumanosti území. Připovrchovou zónu svahových sedimentů a zvětralinového pláště granitů a migmatitů lze obecně označit jako prostředí se slabou průlinově-puklinovou propustností. Na tuto nejsvrchnější zónu, mocnou řádově jednotky až první desítky metrů, navazuje připovrchová část intenzivního rozpukání a rozpojení puklin hydrogeologického masivu charakteristická relativně nízkou puklinovou propustností. Tyto dvě části horninového profilu tvoří hlavní kolektor krystalinika.

Svrchní zvrstvení rychlého mělkého lokálního proudění vzniká v prostředí kvartérních sedimentů a zvětralinového pláště. Hloubkový dosah zvrstvení je řádově do 10 až 20 metrů.

Akumulační možnosti svrchního kolektoru jsou vzhledem ke své geologické stavbě a mocnosti značně omezené a nedochází zde k tvorbě významnějších zdrojů podzemní vody.

Spodní, hlubší zvodeň je vázaná na puklinové prostředí pevných hornin. Její dosah je u migmatitů a rul do 40–50 m, u granitových masivů může dosahovat do hloubek 100 až 120 m.

V hlubších částech krystalinika (pod 100 m) dochází k postupnému svírání puklin tíhou nadložních hornin a hydraulická vodivost se snižuje. Pomalý oběh podzemních vod probíhá výhradně po puklinách, zlomových pásmech a poruchových zónách. K odvodnění hlubších částí zvodně dochází na bázi hlavních vodotečí, většinou skrytě do kvartérních sedimentů.

Zdrojem podzemní vody na lokalitě je srážková infiltrace, ke které dochází v celé ploše území. Rozložení efektivní infiltrace je prostorově variabilní, průměrná velikost je $4,0 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^{-2}$ (Krásný et al. 1982). Do hlubších oblastí masivu, vzhledem k malé propustnosti, přetékají z přepovrchové vrstvy pouze první jednotky procent celkového množství vody infiltrovaného ze srážek. Modelem stanovené infiltrační oblasti pro plochu podzemní části HÚ se nachází v linii hřebene Přední skála – Čeřínek a na hřebeni směřující od vrcholu Čeřínek východním směrem na Cejle.

4.4 Janoch (ETE-Jih)

4.4.1 Charakteristika lokality

Lokalita Janoch se nachází v Jihočeském kraji v okrese České Budějovice (bližší charakteristika např. Navrátilová et al. 2018), a to na území zhruba ohraničené obcemi Chotýčany, Vlkov, Zimutice, Bečice, Týn nad Vltavou, Bohutice, Krč, Záboří, Hlavatce a Zliv. Uvnitř detailního polygonu pro potenciálního umístění hlubinného úložiště radioaktivního odpadu Janoch (Obr. 4) se vyskytuje pouze 1 obec – Nová Ves, malá vesnice s několika desítkami obyvatel. Na celém území lokality Janoch převažuje zemědělská půda (50 %), která je prokládána mozaikou polí (orná půda 30 %), luk a trvalých kultur (8 %), které se střídají s pastvinami (7 %). Zbytek z celkového území tvoří obytné plochy, průmyslové a obchodní zóny a dopravní plochy. Orná půda je využívána na pěstování obilnin, píce, řepky, brambor a zeleniny. Poměrně hojný a rozvinutý je chov dobytka a ryb. Zájmová oblast je celkově málo průmyslová, s výjimkou dřevozpracujícího, nábytkářského a drobného strojírenského průmyslu ve městě Týn nad Vltavou a chemické průmyslové výroby ve Zlivu. Významným zaměstnavatelem ve vymezeném území je společnost ČEZ, a. s., v Jaderné elektrárně Temelín. Její výstavba, která započala v roce 1980, v regionu vytvořila velké množství nových pracovních míst a znamenala nárůst počtu obyvatel, především ve městě Týn nad Vltavou, kde bylo pro zaměstnance elektrárny vybudováno nové sídliště. Průmyslová těžba se v oblasti téměř nevyskytuje, pouze západně od Týna nad Vltavou se aktuálně těží cihlářská surovina a stavební kámen. V okolí obce Záblatí je schválený prognózní zdroj na těžbu žáruvzdorných jíílů (dosud netěženo) a v okolí Záboří a Čičenic je ložisko nevyhrazeného nerostu na těžbu cihlářské suroviny, které ale zatím nebylo těženo. Území je proto využíváno převážně k zemědělství, lesnictví, pastevectví a chovu ryb.

Vymezená lokalita Janoch zaujímá rozlohu 22,742 km². Umístění hlubinného úložiště RAO je navrženo ve východní části detailního polygonu (Obr. 4), kde v rámci bezpečnostní funkce je izolační část hlubinného úložiště umístěna do stabilního podloží tvořeného metamorfovanými

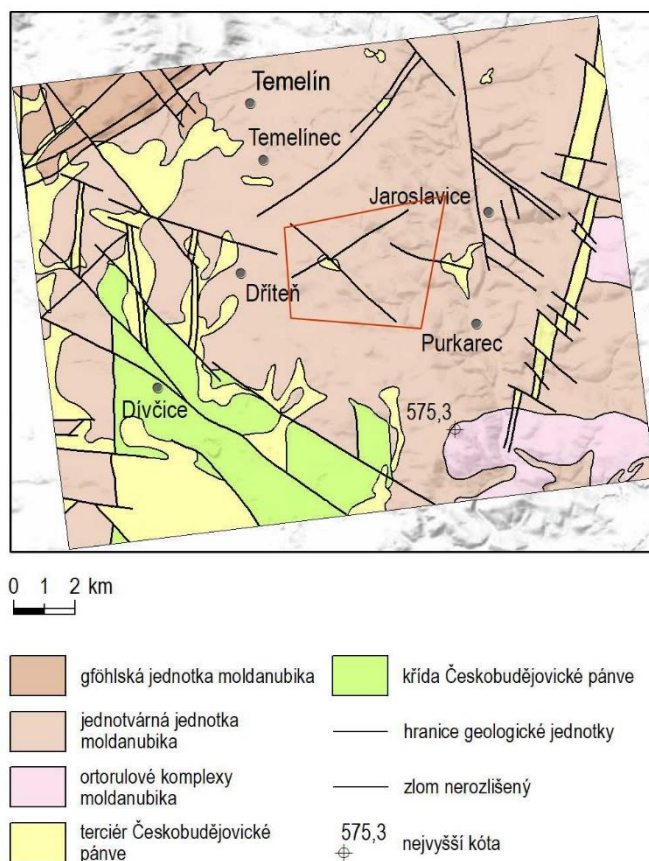
horninami (převážně migmatitizovanými pararulami) jednotvárné jednotky moldanubika (Mixa et al. 2019, Pertoldová et al. 2019, Havlová et al. 2018 aj.).

4.4.2 Regionálně geologický přehled

Na základě platného regionálně geologického členění Českého masivu náleží horninové komplexy lokality Janoch k regionálnímu celku moldanubika, respektive k jednotkám moldanubika jižních Čech (Chlupáč a Štorch 1992; Obr. 4). Horninový krystalinický podklad zájmového území je převážně budován metamorfovanými horninami jednotvárné jednotky (biotitické a silimanit–biotitické pararuly v různém stupni migmatitizace). Tento komplex je nerovnoměrně pronikán malými žilnými tělesy křemene, leukokratních granitů a pegmatitů, které jsou spojené nejspíše s projevy pozdní fáze variského plutonismu. Severozápadní hranice tohoto krystalinika je lemována několik desítek kilometrů dlouhou linií vltavotýnské střížné zóny, podle které došlo během variských orogenních pochodů k jihovýchodnímu násunu severně ležícího podolského komplexu přes jednotvárnou a pestrou sérii moldanubika (Lobkowicz et al. 1996). Vysoce metamorfované horniny podolského komplexu tvoří nejsvrchnější strukturní úroveň gfölské jednotky (Kotková et al. 1997). Na jihu je moldanubikum omezeno okrajovými zlomovými liniemi třeboňské a českobudějovické pánve. V západní a jihozápadní části území se v prostoru původních erozivních koryt zachovaly také neogenní uloženiny českobudějovické pánve v podobě sedimentů mydlovarského a ledenického souvrství. Dále se zde vyskytují jednotky pokryvných útvarů zastoupené svahovými a říčními sedimentárními horninami kvartérního stáří.

4.4.3 Regionálně geologická stavba

Hlavním horninovým tělesem pro umístění hlubinného úložiště na lokalitě Janoch (ETE-jih) je těleso jednotvárné skupiny moldanubika. Z pohledu litologické náplně a geologické stavby je území lokality Janoch (ETE-jih) poměrně jednoduché tvořené silimanit–biotitickými pararulami v různém stupni migmatitizace s výraznou duktilní metamorfní stavbou jedné generace. Petrologická a geochemická variabilita pararul je z hlediska popsání a predikovatelnosti nevýznamná. Přítomné žíly mikrogranitů a pegmatitů o mocnostech několika desítek metrů se vyskytují zejména v jihovýchodní polovině lokality stejně jako prostorově omezené pestré vločky erlanů a kvarcitů. Z pohledu křehké tektoniky byl na lokalitě identifikováno pět zlomů první kategorie a dvacet dva zlomů druhé kategorie (Mixa et al. 2019). Dominantní stavba SV–JZ, příp. V–Z směru se sklonem upadání k SZ je paralelní s významnou duktilní střížnou vltavotýnskou zónou na SZ území a potažmo i se směrem a sklonem dominantní foliace v pararulách. Jižní okraj území je tektonicky ovlivněn systémem hlubockého zlomu se směrem SZ–JV až ZSZ–VJV a sklonem upadání k JJZ (Obr. 4). Tyto dva dominantní SZ–JV a SV–JZ směry řadíme k předvariským nebo variským zlomovým aktivitám. Vznik mladších zlomových struktur je pak především vázán na aktivnější tektonické okraje pánví na J a JZ a Z zájmového území ve směru VJV–ZSZ se sklonem upadání k JJZ, a také na zlomová pásma severojižní blanické brázdy za východním okrajem území (Štědrá et al. 2015). Subrecentní křehká tektonika se uplatňuje zejména přítomností rozsáhlých přípovrchových puklinových systémů. Populace puklin byly identifikovány v průběhu SSV–JJZ až S–J se strmým úklonem k ZSZ až Z; v průběhu SZ–JV se strmým úklonem k JZ i SV; v průběhu SV–JZ se středním sklonem k SZ; a v průběhu Z–V se strmým sklonem k J.



Obr. 4 Schéma regionálně geologického členění lokality Janoch (ETE-J). Červený úhelník vyznačuje detailní polygon pro potenciální umístění HÚ.

4.4.4 Regionální klimatické, hydrologické a hydrogeologické poměry

Severní část území lokality Janoch náleží do hydrogeologického rajonu 6320 Krystalinikum v povodí Střední Vltavy, jižní část území spadá do hydrogeologického rajonu 2160 Budějovická pánev. Území lokality zasahuje do dvou klimatických, mírně teplých, oblastí MT10 a MT11 (Quitt 1971). Perspektivní území pro projektové práce rozdělují rozvodnice povodí III. řádu na západní část (povodí Blanice a Otavy od Blanice po Lomnici (1-08-03)) a na východní část (povodí Vltavy od Malše po Lužnici (1-06-03)).

V širší zájmové oblasti, tvořené jednotvárnou jednotkou metamorfovaných hornin, jsou k dispozici především údaje popisující hladinu podzemní vody v objektech s hloubkou maximálně prvních desítek metrů. Vrtky s údaji o hydrogeologii jsou situovány převážně v přípoверхové zóně rozvolnění puklin s aktivním oběhem podzemních vod a výrazně vyšší hydraulickou vodivostí (ve srovnání s horninovým prostředím v hloubce HÚ), poblíž vodních toků nebo v lokálních sníženinách. Hladina podzemní vody se ve většině vrtů nachází mělce (jednotky m) pod terénem, hydraulické vodivosti v blízkém okolí lokality Janoch se pohybují v řádovém rozmezí od $10^{-7} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ do $10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Přípovrchovou zónu svahových sedimentů a zvětralých metamorfitů lze obecně označit jako prostředí se slabou průlinově–puklinovou propustností. Na tuto nejsvrchnější zónu, mocnou řádově jednotky až první desítky metrů, navazuje přípovrchová část intenzivního rozpukání a rozpojení puklin hydrogeologického masivu, charakteristická relativně nízkou puklinovou propustností. Tyto dvě části horninového profilu tvoří hlavní kolektor v metamorfovaných horninách. Sedimentární horniny budějovické pánve s průlinovou propustností se vyskytují pouze při jižním okraji širšího okolí zájmového území.

Svrchní zvodeň rychlého mělkého lokálního proudění vzniká v prostředí kvartérních sedimentů a zvětralinového pláště. Hlubkový dosah této zvodně je řádově do 10 až 20 m.

Spodní, hlubší zvodeň je vázaná na puklinové prostředí pevných hornin. Její dosah je u migmatitů a rul do 40–50 m, u granitových masivů může dosahovat do hloubek 100 až 120 m.

V hlubších částech krystalinika se hydraulická vodivost s ohledem na svírání puklin s hloubkou snižuje. Pomalé proudění podzemní vody probíhá výhradně po puklinách, zlomových pásmech a poruchových zónách. K odvodnění hlubších částí zvodně dochází na bázi hlavních vodotečí, většinou skrytě do kvartérních sedimentů.

Zdrojem podzemní vody na lokalitě Janoch je srážková infiltrace, ke které dochází v celé ploše území. Distribuce efektivní infiltrace je prostorově variabilní s průměrnou hodnotou $1,5 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^{-2}$ (Krásný et al. 1982). Do hlubších oblastí masivu, vzhledem k malé propustnosti, přetékají z přípovrchové vrstvy pouze jednotky procent celkového množství vody infiltrovaného ze srážek. Infiltrační oblasti plochy podzemní části HÚ, stanovené modelem, se nachází přímo v nadloží HÚ na vyvýšených oblastech okolo hřebene při vrchu Pakostov (529 m n.m.).

5 Vstupní podmínky pro specifikaci FEPs

5.1 Specifikace okrajových podmínek

Hlubinné úložiště tvoří systém inženýrských a přírodních bariér přírodních a inženýrských bariér (obalové soubory, tlumící a výplňový materiál, konstrukční prvky a horninové prostředí), jejichž vlastnosti ve vzájemné kombinaci zajistí izolaci uloženého odpadu od okolního životního prostředí a omezí i v dlouhodobém horizontu riziko ovlivnění okolního životního prostředí na akceptovatelnou úroveň.

Tento systém prochází vývojem, který je ovlivněn především lokalizací úložiště a prováděnými činnostmi, jako je například ovlivnění přírodních bariér průzkumnými pracemi, výstavbou úložiště a délkou provozního období nebo předprovozními a provozními činnostmi.

Český referenční projekt (Holub a kol 1999, Pospíšková a kol. 2011) je založen na několika základních předpokladech:

- Hostitelskou horninou budou krystalinické horniny, sledovanými lokalitami jsou Březový potok, Horka, Hrádek, Janoch (Vondrovic et al. 2020);
- Ukládací horizont je umístěn cca 500 m pod úroveň terénu;
- Úložiště bude důlní dílo se systémem přístupových chodeb a úložných vrtů;
- Tlumící materiál (buffer) i výplňový materiál (backfill) bude bentonit;
- Ukládací obalový soubor pro VJP bude dvouplášťový, s vnějším obalem z uhlíkové oceli a vnitřním z nerezové oceli, případně s vnějším obalem z uhlíkové oceli a nerezovými pouzdry pro samostatné palivové soubory z nerezové oceli;
- Uložený inventář bude nepřepracované VJP.

5.2 Externí faktory, které mohou ovlivnit nastavené okrajové podmínky

Výchozím stavem pro specifikaci FEP je důležitý počáteční stav (Initial state), ke kterému je možné vztáhnout vlastnosti jednotlivých komponent a vůči kterému pak mohou být popsány nastalé změny.

Pro popis vlastností horninového masivu je počátečním stavem období před realizací hlubinného úložiště, tedy před zásahem člověka.

Zásahem člověka dojde ke změně probíhajících procesů, ať už v důsledku razících prací při budování úložiště nebo ovlivnění v důsledku ukládání VJP a s tím spojenými souvisejícími činnostmi.

Dalším důležitým faktorem je předpokládaná doba pro hodnocení dlouhodobé bezpečnosti, tj. 1 mil. let. Ačkoliv lze, na základě dostupných dat, predikovat dlouhodobý vývoj lokalit, nelze s určitostí vyloučit jakoukoliv externí přírodní událost – klimatickou nebo geologickou.

6 Vlastnosti potenciálních lokalit – počáteční stav

6.1 Vlastnosti horninového masivu

6.1.1 Petrologický popis jednotlivých litologických typů

Popis:

Petrologický popis sumarizuje mineralogické, texturní a strukturní vlastnosti jednotlivých horninových typů, ale i variabilitu ve složení jednoho horninového typu, které lze dostatečně věrohodně stanovit ze znalosti dat z jednotlivých hodnocených lokalit (Franěk et al. 2018 a Mixa et al. 2019). Posuzování petrologických vlastností jednotlivých litologických typů je dáno vyhl. 378/2016 Sb. § 18 bod 4b. jako jeden z nezávislých parametrů při hodnocení reologických vlastností a homogenity horninového prostředí. Tento parametr ukazuje na stupeň homogenity horninového prostředí v rámci základní litostratigrafické jednotky (položky v geologické mapě).

Podrobný petrologický popis (makro i mikro) jednotlivých hornin posuzuje a srovnává především míru rozdílnosti v obsahu hlavních, vedlejších a akcesorických minerálů, v zrnitosti a v texturních znacích, a to v rámci jedné litologie. Vysokou petrologickou variabilitou se rozumí, že se tyto parametry v rámci jedné litologie výrazně liší. Výrazná různorodost uvedených atributů jednoho litologického druhu může mít vliv na teplotní vodivost a produkci radiogenního tepla, popř. migraci fluid.

Návrh HÚ předpokládá umístění v horninovém prostředí s co nejnižší mírou odlišností v petrologickém složení jednotlivých litologií. Velmi vhodné se jeví magmatické horniny, ideálně zastoupené jedním litologickým typem jako je např. granit, granodiorit nebo melasyenit. Skutečností ovšem je, že tento dominantní typ se v prostorovém rozsahu jedné lokality může lišit např. zrnitostí nebo v procentuálním zastoupení vyrostlic živců apod. Tyto petrologické, kompoziční či texturní variace však významně nezhoršují kvalitu homogenity horninového prostředí díky reologické podobnosti. Běžným fenoménem je také, že v rámci jedné lokality můžeme zaznamenat různé variety jednoho litologického druhu magmatitu, jejich přechody mají většinou magmatický difúzní charakter a postupně do sebe přechází. Je předpoklad, že difúzní kontakty mezi jednotlivými typy magmatitů výrazně nesnižují mechanickou homogenitu horninového prostředí. Určité snížení homogenity horninového prostředí způsobují kontakty různých druhů magmatitů, které mají většinou ostrý intruzivní charakter nebo kontakty magmatitu s jiným litologickým horninovým druhem např. metamorfitem. Díky odlišné reologii mohou tyto kontakty na sebe vázat i tektonické poruchy.

Určitou míru nehomogenity způsobují v rozsáhlých magmatických intruzích i reologicky odlišná žilná tělesa, jako jsou aplity, pegmatity, granitové žíly, ale i různé druhy porfyrů, lamprofyrů a v neposlední řadě i křemenné žíly. V některých případech jsou tyto žilné útvary vázány na tektonické zóny, někdy např. křemenná žilovina vyplňuje extenzní pukliny. Žíly křemene o mocnostech jednotek až několika desítek metrů mohou být z hlediska hodnocení významné z důvodu přítomnosti sulfidického zrudnění.

Z hlediska soudržnosti horninového prostředí se pro umístění hlubinného úložiště RAO jeví vhodný i masiv jednoho litologického typu metamorfitu ve vyšším stupni metamorfni přeměny. Sem patří např. granulity, granulitové ruly, ale i migmatity nebo např. migmatitizované pararuly.

Předpokladem vysoké homogenity horninového prostředí je penetrativní planární stavba, upadající jedním směrem. Různé petrologické variety jednoho litologického druhu metamorfitu nesnižují nutně soudržnost prostředí, jejich hranice jsou často neostré a volně do sebe přechází. Významnější míru nehomogenity horninového prostředí způsobují reologicky odlišné vložky pestrých hornin (např. erlanů, kvarcitů a mramorů), hlavně pokud dosahují vyšších mocností. I když probíhají paralelně s foliací okolních metamorfitů, jejich ostré kontakty a odlišná reologie dávají predispozici ke vzniku lokálních zlomových struktur nebo střížných zón. Stejně tak nižší míru homogenity horninového prostředí metamorfitů zvyšují žíly pozdně magmatických hornin.

Vliv na bezpečnost:

Míra proměnlivosti v petrologickém složení jednotlivých litologických typů v horninovém prostředí ovlivňuje bezpečnost HÚ v době výstavby, během provozu i po jeho uzavření jen velmi omezeně. Obecně platí, že vyšší petrologická variabilita znamená vyšší množství negativních vlastností horninového masívu a zároveň vyšší nejistoty v odhadu složení a chování horninového masívu. Petrologická variabilita má v daných podmínkách vliv na mechanické vlastnosti hornin (včetně reologických, teplotní vodivosti a roztažnosti, a na produkci radiogenního tepla, popř. migraci fluid). Na bezpečnost je její přímý vliv nicméně relativně malý, komplikace může způsobovat hlavně v době výstavby kvůli variacím geotechnických parametrů hornin v průběhu ražby.

Dostupná data:

Rozsáhlý soubor archivních geovědních zpráv a map je přehledně shrnutý ve zprávách, které doprovázejí detailní 3D geologické modely 7 lokalit (Franěk et al., 2018, z vybraných 4 lokalit se toto týká Horky, Hrádku a Březového potoka), a 3D geologický model ETE-Jih (Navrátilová a Noll, 2017). Data získaná v letech 2017-2019 díky novým geofyzikálním a geologickým výzkumům jsou pak pro všechny tyto 4 lokality shrnuta v rozsáhlé práci Mixy et al. (2019).

Zároveň jsou všechny tyto podklady přehlednou a stručnější formou shrnuty ve zprávách týkajících se hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti (Havlová et al., 2020 a, e, f, g), a to včetně jejich interpretace z hlediska petrologického popisu složení jednotlivých litologických druhů v rámci daného horninového masívu.

Nejistoty:

Posouzení bezpečnosti HÚ představuje komplexní úlohu, která vyžaduje celou řadu vstupních dat zatížených různou mírou nejistoty. Při hodnocení lokalit je důležité identifikovat a kvantifikovat různé zdroje nejistot. V prostorovém kontextu horninového prostředí lze nejistotu interpretovat s ohledem na posuzovanou oblast, jako množství chybějící informace (Wellmann a Regenauer-Lieb 2012). Za současného stavu omezeného poznání horninového prostředí zájmových lokalit nelze nejistotu ve vztahu k jednotlivým geologickým indikátorům zodpovědně kvantifikovat. Proto byly nejistoty dosud popisovány expertním odhadem.

Ohledně proměnlivých petrologických atributů je nejistota spojená s lokalizací litologických přechodů, a s texturními a strukturními změnami shodných litologií v hloubce. Konkrétně v magmatických horninách jsou nejistoty dány především z neznalosti četnosti a mocnosti žilných hornin, tzn., jak často se střídají různé litologie v hloubce, a zároveň z neznalosti variability obsahů hlavních, vedlejších a akcesorických minerálů, zrnitosti a texturní stavby

v rámci jedné litologie v hlubších partiích horninového masívu. Nejistota ve vztahu k homogenitě prostředí tvořeného metamorfovanými horninami spočívá hlavně v neznalosti výskytu pestrých horninových vložek v hloubce, resp. neznalosti litologických přechodů a jejich charakteru v hlubších partiích horninového masívu. V případě metamorfovaných hornin je významnější nejistota, vyplývající z neznalosti eventuálních texturních a strukturních změn jedné litologie v hloubce.

Doporučení:

Pro významné snížení popsaných nejistot doporučujeme realizaci rozsáhlejších průzkumných prací včetně podrobného geologického mapování povrchu, realizace hlubokých vrtů a hluboké geofyziky.

Reference:

- FRANĚK J., BUKOVSKÁ Z., BURIÁNEK D., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ B., GRUNDLOCH J., HOLEČEK J., JELÉNEK J., JELÍNEK J., KLOMÍNSKÝ J., KRYŠTOFOVÁ E., KUČERA R., KUNCEOVÁ E., KŮRKOVÁ I., NAHODILOVÁ R., PACHEROVÁ P., PERTOLDOVÁ J., PEŘESTÝ V., RUKAVIČKOVÁ L., SOEJONO I., ŠVAGERA O., VERNER K., ŽÁČEK V. (2018): Závěrečná zpráva 3D strukturně – geologické modely potenciálních lokalit HÚ. MS SÚRAO, TZ 229/2018, Praha, 594 str.
- FRANĚK J., BUKOVSKÁ Z., ČEJCHANOVÁ A., JELÉNEK J., MLČOCH B., PERTOLDOVÁ J., SKÁCELOVÁ Z., SOEJONO I., ŠVAGERA O., VERNER K., MILICKÝ M., BARTÁŠKOVÁ L. (2015): Regionální 3D strukturně geologický model lokality Horka. Technická zpráva MS SÚRAO Praha.
- HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., BAIER, J., MILICKÝ, M., POLÁK, M., BUKOVSKÁ, Z., ČERNÝ, M., DUŠEK, K., FIFERNOVÁ, M., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., HOLEČEK J., JELÉNEK, J., JANKOVEC, J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., KUNCEOVÁ, E., PETYNYIAK, O., RAPPRIK, V., RUKAVIČKOVÁ, L., SOEJONO, I., ŠVAGERA, O., UHLÍK, J., VOJTĚCHOVÁ, H., ŽÁČKOVÁ, E. (2020a): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Březový potok. MS SÚRAO, TZ 447/2020, 62 str.
- HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., JANKOVEC, J., UHLÍK, J., ČERNÝ, M., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., BAIER, J., DUŠEK, K., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., HEJTMÁNKOVÁ, P., HOLEČEK J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., MILICKÝ, M., NAHODILOVÁ, R., PACHEROVÁ, P., PETYNYIAK, O., PEŘESTÝ, V., RAPPRIK, V., ŘIHOŠEK, J., RUKAVIČKOVÁ, L., ŠVAGERA, O., POLÁK, M., VOJTĚCHOVÁ, H., ŽÁČKOVÁ, E. (2020e): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Janoch (ETE-jih). MS SÚRAO, TZ 451/2020, 63 str.
- HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., UHLÍK, J., JANKOVEC, J., MILICKÝ, M., BAIER, J., BURIÁNEK, D., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ, B., DUŠEK, K., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., GRUNDLOCH, J., HOLEČEK J., JELÉNEK, J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., KUNCEOVÁ, E., PETYNYIAK, O., POLÁK, M., RAPPRIK, V., RUKAVIČKOVÁ, L., ŠVAGERA, O., VOJTĚCHOVÁ, H. (2020f): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Horka. MS SÚRAO, TZ 452/2020, 63 str.
- HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., BAIER, J., MILICKÝ, M., BUKOVSKÁ, Z., ČERNÝ, M., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ, B., DUŠEK, K., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., HOLEČEK J., JANKOVEC, J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., KUNCEOVÁ, E., PETYNYIAK, O., POLÁK, M., RAPPRIK, V., RUKAVIČKOVÁ, L., ŠVAGERA, O., URÍK, J.,

- VOJTĚCHOVÁ, H., ŽÁČKOVÁ, E. (2020g): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Hrádek. MS SÚRAO, 453/2020, 63 str.
- MIXA P., SKÁCELOVÁ Z., PERTOLDOVÁ J., BUKOVSKÁ Z., BURIÁNEK D., DUDÍKOVÁ B., FRANĚK J., HRDLIČKOVÁ K., JELÍNEK J., NAHODILOVÁ R., SOEJONO I., VERNER K., ŽÁČEK V. (2019): Shrnutí výsledků geologických a geofyzikálních výzkumných prací provedených v období 9/2017–6/2019 pro aktualizaci hodnocení potenciálních lokalit hlubinného úložiště RAO. MS SÚRAO, TZ 412/2019, Praha, 427 str.
- NAVRÁTILOVÁ V., NOL O., KAŠPAR R., LANČA D., MIŠUREC J., NEDVĚD J., RAJCHL M., SOSNA K., ŠINDELÁŘ M., TLAMSA J., VOJTĚCHOVSKÁ A. (2017): Zpráva o provedení geologicko-výzkumných prací na lokalitě ETE-jih. Závěrečná zpráva, MS SÚRAO, 280 str.
- ŠVAGERA O., BUKOVSKÁ Z., ČEJCHANOVÁ A., FRANĚK J., JELÍNEK J., MLČOCH B., PERTOLDOVÁ J., SKÁCELOVÁ Z., SOEJONO I., VERNER K., MILICKÝ M., BARTÁŠKOVÁ L. (2016): Regionální 3D strukturně geologický model lokality Březový potok. Technická zpráva MS SÚRAO, Praha.
- WELLMANN F., REGENAUER-LIEB K. (2012): Uncertainties have a meaning: Information entropy as a quality measure for 3-D geological models. *Tectonophysics*. 526-529. 207-216. 10.1016/j.tecto.2011.05.001.

Vyhláška č. 378/2016 Sb., o umístění jaderného zařízení, ve znění pozdějších předpisů.

6.1.2 Prostorová distribuce litologických typů

Popis:

Prostorová distribuce litologických typů udává množství a charakter horninových těles, které lze dostatečně věrohodně stanovit ze znalosti dat z jednotlivých hodnocených lokalit (Franěk et al. 2018 a Mixa et al. 2019). Posuzování prostorové distribuce litologických typů je dáno vyhl. 378/2016 Sb. § 18 bod 4b. jako jeden z nezávislých parametrů při hodnocení reologických vlastností a homogenity horninového prostředí. Obecně lze říci, že prostorová distribuce litologických typů analyzuje uspořádání horninových těles, geometrické vztahy a tvary jednotlivých těles. Za jeden litologický typ je považováno trojrozměrné těleso horniny, které je budováno jediným horninovým typem nebo ve kterém je zcela dominantně zastoupen jeden horninový typ. Prostorové uspořádání litologických typů dále popisuje charakter a četnost střídání jednotlivých horninových těles, obvykle v měřítku jednotek až stovek m, a to jak v horizontálním rozsahu, tak i vertikálním dosahu. Například oblast, kde se budou opakovaně a v malých mocnostech střídát dva kontrastní horninové typy, bude mít sice malou petrografickou variabilitu, ale vysoká prostorová různorodost může být komplikací z hlediska projektování HÚ. Popis prostorové distribuce zahrnuje také posouzení charakteru kontaktů jednotlivých horninových těles (např. rovný, nerovný, laločnatý, tektonický, petrografický přechod).

Umístění HÚ v horninovém prostředí s co nejnižší mírou variability v litologickém složení se jeví jako žádoucí. Velmi vhodné jsou magmatické horniny, ideálně zastoupené jedním litologickým typem jako je např. granit, granodiorit nebo melasyenit. Skutečností ovšem je, že tento dominantní typ se v rámci jedné lokality může lišit např. zrnitostí nebo v procentuálním zastoupení vyrostlic živců apod. Tyto spíše petrologické, kompoziční či texturní variace však mají pouze lokální význam a s ohledem na reologickou podobnost nezhoršují kvalitu

homogenity horninového prostředí. Běžným fenoménem je také, že v rámci jedné lokality můžeme zaznamenat různé variety jednoho litologického druhu magmatitu nebo různé druhy magmatitů, které mají vůči sobě většinou magmatické intruzivní kontakty a často jsou různého stáří. Intruzivní kontakty jsou většinou poměrně strmé, místy s prstovitým charakterem, někdy subparalelní s orientací regionální metamorfní foliace. Někdy mohou kontakty různých typů např. granitu do sebe přecházet a mít i difúzní charakter. Je předpoklad, že intruzivní i difúzní kontakty mezi jednotlivými typy magmatitů výrazně nesnižují relativní mechanickou homogenitu horninového prostředí. Určitou míru nehomogenity způsobují kontakty magmatitů s jiným litologickým druhem např. metamorfitem. Tyto kontakty na sebe mohou vázat i tektonické poruchy. Blízko těchto kontaktů byly zaznamenány i asimilované xenolity metamorfity v magmatitech, které mohou snižovat soudržnost prostředí. Kontakty mechanicky odlišných litologií mohou také lokalizovat vznik vyššího počtu křehkých struktur, které pak mohou sloužit jako preferenční cesty pro migraci podzemní vody.

Ve výběru lokality pro umístění hlubinného úložiště RAO figurují magmatity moldanubického plutonického komplexu (granity typu Čeřínek a Eisgarn – lokalita Hrádek; melasyenity až melagranity třebíčského plutonu – lokality Horka) a středočeského plutonického komplexu (granodiority červenského a blatenského typu – lokalita Březový potok). Hloubkový dosah granodioritů na lokalitě Březový potok podle gravimetrického modelu (Švagera et al. 2016) pravděpodobně dosahuje hloubky minimálně cca 2,5 km. Na lokalitě Hrádek je možné na základě gravimetrického měření předpokládat mocnost granitů až okolo 20 km (Beneš, et al. 2019). Těleso třebíčského masivu dosahuje v centrální části modelovanou hloubku až 4 km, na okrajích změlčuje v rozsahu 0,5–0,8 km (Franěk et al., 2015).

Určitou míru nehomogenity způsobují v rozsáhlých magmatických intruzích drobná žilná tělesa, jako jsou aplity, pegmatity, granitové žíly, ale i různé druhy porfyrů, lamprofyrů a v neposlední řadě i křemenné žíly. V některých případech jsou tyto žilné útvary vázány na tektonické zóny, někdy např. křemenná žilovina vyplňuje extenzní pukliny. Žíly křemene a aplitů o mocnostech několika desítek metrů mohou být z hlediska hodnocení významné z důvodu přítomnosti polymetalického zrudnění.

Z hlediska soudržnosti horninového prostředí se pro umístění hlubinného úložiště RAO jeví vhodný i masiv jednoho litologického typu metamorfitu ve vyšším stupni metamorfní přeměny. Sem patří např. granulity, granulitové ruly, ale i migmatity nebo např. migmatizované pararuly. Předpokladem vysoké homogenity horninového prostředí je penetrativní stavba, upadající jedním směrem. Různé petrologické variety jednoho litologického druhu metamorfitu nesnižují nutně soudržnost prostředí, jejich hranice jsou většinou neostré a volně do sebe přechází. Významnější míru nehomogenity horninového prostředí způsobují čočky pestrých hornin (např. erlanů, kvarcitů a mramorů), pokud dosahují vyšších mocností. Všechna tělesa těchto hornin probíhají paralelně s foliací okolních metamorfitů, jejich kontakty jsou relativně ostré a dávají predispozici ke vzniku lokálních zlomových struktur. Jejich hloubkový dosah není znám. Stejně tak nižší míru homogenity horninového prostředí zvyšují žíly pozdně magmatických hornin.

Vliv na bezpečnost:

Prostorová distribuce litologických typů ovlivňuje bezpečnost HÚ v době výstavby, během provozu i po jeho uzavření. Obecně platí, že vyšší prostorová variabilita znamená vyšší nejistoty v odhadu složení, struktury a chování horninového masivu. Prostorové uspořádání horninových těles vyjadřuje vertikální i horizontální distribuci litologických hranic, na základě

kterých, lze uvažovat o nehomogenitě horninového prostředí a jejich vlastností. Časté střídání litologií a nepravidelné tvary horninových těles jsou méně vhodné, jak z geotechnického hlediska budování úložiště, tak pro výpočty spojené s dlouhodobou bezpečností úložiště. Dále zvyšují nejistotu 3D geologického modelu (Franěk et al. 2018) a v neposlední řadě přispívají k lokalizaci křehkých struktur na takovýchto rozhraních. V případě nehomogenit v podobě vápenato-silikátových hornin mohou být v horninovém masivu přítomny kaverny. Z těchto důvodů má prostorové uspořádání horninových těles významný vliv na bezpečnost.

Dostupná data:

Rozsáhlý soubor archivních geovědních zpráv a map je přehledně shrnutý ve zprávách, které doprovázejí detailní 3D geologické modely 7 lokalit (Franěk et al., 2018, z vybraných 4 lokalit se toto týká Horky, Hrádku a Březového potoka), a 3D geologický model ETE-Jih (Navrátilová a Noll, 2017). Data získaná v letech 2017-2019 díky novým geofyzikálním a geologickým výzkumům jsou pak pro všechny tyto 4 lokality shrnuta v rozsáhlé práci Mixy et al. (2019).

Zároveň jsou všechny tyto podklady přehlednou a stručnější formou shrnuty ve zprávách týkajících se hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti (Havlová et al., 2020 a, e, f, g), a to včetně jejich interpretace ve smyslu prostorové distribuce litologických typů v horninovém masívu.

Nejistoty:

Posouzení bezpečnosti HÚ představuje komplexní úlohu, která vyžaduje celou řadu vstupní dat zatížených různou mírou nejistoty. V prostorovém kontextu horninového prostředí lze nejistotu interpretovat s ohledem na posuzovanou oblast, jako množství chybějící informace (Wellmann a Regenauer-Lieb 2012). Při hodnocení lokalit je důležité identifikovat a kvantifikovat různé zdroje nejistot. Za současného stavu omezeného poznání horninového prostředí zájmových lokalit nelze nejistotu ve vztahu k jednotlivým geologickým indikátorům zodpovědně kvantifikovat. Proto jsou nejistoty popsány expertním odhadem.

V magmatických horninách jsou nejistoty dány především z neznalosti četnosti a mocnosti žilných hornin v hloubce, event. v hloubkovém dosahu žil vymapovaných na povrchu. Při geologickém mapování byly zaznamenány i částečně asimilované xenolity metamorfovaných hornin v magmatických horninách. Nejistota ve vztahu k homogenitě magmatického masívu je dána neznalostí možného výskytu těchto xenolitů v hloubce. Určitá nejistota vyplývá i z metodiky gravimetrického modelování hloubkového dosahu zájmových horninových masívů. Míru pravdivosti tohoto odhadu je nutno ověřit dalšími podrobnými geofyzikálními a vrtnými pracemi. Určitým problémem lokálního charakteru se zdá přítomnost žilného křemene a polymetalické mineralizace, jejíž rozšíření a charakter s hloubkou není znám. Nejistota ve vztahu k homogenitě prostředí tvořeného metamorfovanými horninami spočívá v neznalosti výskytu pestrých horninových vložek v hloubce. Pokud byly tyto horniny zaznamenány na povrchu, jsou nejistoty dány eventuálními změnami směru a sklonu upadání těchto vložkových hornin v hloubce, jakožto i v hloubkového dosahu vymapovaných čoček těchto hornin.

Doporučení:

Pro významné snížení popsanych nejistot doporučujeme realizaci rozsáhlejších průzkumných prací včetně realizace hlubokých vrtů a hluboké geofyziky.

Reference:

- BENEŠ V., BELOV T., JIRKŮ J., BUNEŠ J., BÁRTA J. (2019): Ověření geologických struktur lokality Hrádek geofyzikálními metodami. Závěrečná zpráva. MS SÚRAO, TZ 435/2019, 76 str.
- FRANĚK J., BUKOVSKÁ Z., BURIÁNEK D., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ B., GRUNDLOCH J., HOLEČEK J., JELÉNEK J., JELÍNEK J., KLOMÍNSKÝ J., KRYŠTOFOVÁ E., KUČERA R., KUNCEOVÁ E., KŮRKOVÁ I., NAHODILOVÁ R., PACHEROVÁ P., PERTOLDOVÁ J., PEŘESTÝ V., RUKAVIČKOVÁ L., SOEJONO I., ŠVAGERA O., VERNER K., ŽÁČEK V. (2018): Závěrečná zpráva 3D strukturně – geologické modely potenciálních lokalit HÚ. MS SÚRAO, TZ 229/2018, Praha, 594 str.
- FRANĚK J., BUKOVSKÁ Z., ČEJCHANOVÁ A., JELÉNEK J., MLČOCH B., PERTOLDOVÁ J., SKÁCELOVÁ Z., SOEJONO I., ŠVAGERA O., VERNER K., MILICKÝ M., BARTÁŠKOVÁ L. (2015): Regionální 3D strukturně geologický model lokality Horka. Technická zpráva MS SÚRAO Praha.
- HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., BAIER, J., MILICKÝ, M., POLÁK, M., BUKOVSKÁ, Z., ČERNÝ, M., DUŠEK, K., FIFERNOVÁ, M., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., HOLEČEK J., JELÉNEK, J., JANKOVEC, J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., KUNCEOVÁ, E., PETYNYIAK, O., RAPPRIK, V., RUKAVIČKOVÁ, L., SOEJONO, I., ŠVAGERA, O., UHLÍK, J., VOJTĚCHOVÁ, H., ŽÁČKOVÁ, E. (2020a): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Březový potok. MS SÚRAO, TZ 447/2020, 62 str.
- HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., JANKOVEC, J., UHLÍK, J., ČERNÝ, M., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., BAIER, J., DUŠEK, K., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., HEJTMÁNKOVÁ, P., HOLEČEK J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., MILICKÝ, M., NAHODILOVÁ, R., PACHEROVÁ, P., PETYNYIAK, O., PEŘESTÝ, V., RAPPRIK, V., ŘIHOŠEK, J., RUKAVIČKOVÁ, L., ŠVAGERA, O., POLÁK, M., VOJTĚCHOVÁ, H., ŽÁČKOVÁ, E. (2020e): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Janoch (ETE-jih). MS SÚRAO, TZ 451/2020, 63 str.
- HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., UHLÍK, J., JANKOVEC, J., MILICKÝ, M., BAIER, J., BURIÁNEK, D., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ, B., DUŠEK, K., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., GRUNDLOCH, J., HOLEČEK J., JELÉNEK, J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., KUNCEOVÁ, E., PETYNYIAK, O., POLÁK, M., RAPPRIK, V., RUKAVIČKOVÁ, L., ŠVAGERA, O., VOJTĚCHOVÁ, H. (2020f): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Horka. MS SÚRAO, TZ 452/2020, 63 str.
- HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., BAIER, J., MILICKÝ, M., BUKOVSKÁ, Z., ČERNÝ, M., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ, B., DUŠEK, K., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., HOLEČEK J., JANKOVEC, J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., KUNCEOVÁ, E., PETYNYIAK, O., POLÁK, M., RAPPRIK, V., RUKAVIČKOVÁ, L., ŠVAGERA, O., URÍK, J., VOJTĚCHOVÁ, H., ŽÁČKOVÁ, E. (2020g): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Hrádek. MS SÚRAO, 453/2020, 63 str.
- MIXA P., SKÁCELOVÁ Z., PERTOLDOVÁ J., BUKOVSKÁ Z., BURIÁNEK D., DUDÍKOVÁ B., FRANĚK J., HRDLIČKOVÁ K., JELÍNEK J., NAHODILOVÁ R., SOEJONO I., VERNER K., ŽÁČEK V. (2019): Shrnutí výsledků geologických a geofyzikálních výzkumných prací provedených v období 9/2017–6/2019 pro aktualizaci hodnocení potenciálních lokalit hlubinného úložiště RAO. MS SÚRAO, TZ 412/2019, Praha, 427 str.

NAVRÁTILOVÁ V., NOL O., KAŠPAR R., LANČA D., MIŠUREC J., NEDVĚD J., RAJCHL M., SOSNA K., ŠINDELÁŘ M., TLAMSA J., VOJTĚCHOVSKÁ A. (2017): Zpráva o provedení geologicko-výzkumných prací na lokalitě ETE-jih. Závěrečná zpráva, MS SÚRAO, 280 str.

ŠVAGERA O., BUKOVSKÁ Z., ČEJCHANOVÁ A., FRANĚK J., JELÉNEK J., MLČOCH B., PERTOLDOVÁ J., SKÁCELOVÁ Z., SOEJONO I., VERNER K., MILICKÝ M., BARTÁŠKOVÁ L. (2016): Regionální 3D strukturně geologický model lokality Březový potok. Technická zpráva MS SÚRAO, Praha.

WELLMANN F., REGENAUER-LIEB K. (2012): Uncertainties have a meaning: Information entropy as a quality measure for 3-D geological models. *Tectonophysics*. 526-529. 207-216. 10.1016/j.tecto.2011.05.001.

Vyhláška č. 378/2016 Sb., o umístění jaderného zařízení, ve znění pozdějších předpisů.

6.2 Charakteristika křehkých struktur

6.2.1 Zlomy

Posuzování porušení území k umístění jaderného zařízení zlomem je dáno vyhl. č. 378/2016 Sb. §6. Ta mimo jiné stanoví, že hodnocení zlomové sítě je prováděno do vzdálenosti 25 km od místa uložení jaderného zařízení a jsou zde studovány geologické, geomechanické, morfotektonické, seismické a hydrogeologické parametry, které jsou s přítomností zlomu úzce spjaty.

Zlomy představují výrazné diskontinuity i v jinak relativně homogenním horninovém prostředí. Vznikají jako následek dlouhodobého působení napětí na horninové prostředí, které vyústí ve vzájemný posun horninových bloků vyšší než 1 m. Zlomy se s ohledem na charakter vzájemného pohybu horninových bloků rozdělují na poklesy, přesmyky a horizontální posuny. Charakter posunu bloků lze na zlomové ploše identifikovat podle kinematických indikátorů, nejčastěji rýhování neboli striací. V mnoha případech ale charakter terénu, či nedostupnost výchozů tuto klasifikaci neumožňují. Přítomnost zlomu pak v terénu indikují další faktory, jako jsou například nápadné posuny mezi litologiemi zjištěné geologickým mapováním, přítomnost minerálních výplní asociovatelných se zlomovými projevy (jíly, sekreční křemen, zóny alterace okolních hornin), geomorfologická analýza terénního reliéfu (nápadně prudké, či terasovité svahy, ostře řezaná údolí či naopak výrazné terénní elevace a hřebeny) nebo vysoká přítomnost pramenů, často tvořících nápadné linie. Těmito způsoby je možné identifikovat průběh zlomu, odhadnout jeho přibližnou délku a vymezit oblasti pro podrobnější průzkum například s využitím geofyzikálních metod. Odporové profilování, vertikální elektrické sondování nebo mělká reflexní seismika pak umožňuje vymezit šířku zlomem postižené zóny, její přibližný sklon nebo hloubkový dosah.

Pro proudění podzemní vody pak zlomy představují, v závislosti na charakteru výplně, přirozený vodič nebo naopak bariéru, která má za následek odvodňování horninového masivu, či naopak koncentraci vody, na povrchu často detekovatelnou jako pramenné linie. V hloubce je pak lze trasovat pomocí karotážních metod (např. rezistivimetrie) v průzkumných vrtech a v kombinaci s akustickou/optickou vrtnou kamerou, či analýzou vrtného jádra identifikovat přítok vody do vrtu, a zdali je asociován se zlomem či jeho blízkým okolím.

V rámci lokalit uvažovaných pro detailnější průzkum dosahují identifikované tektonické linie (zlomy) délek od stovek metrů po několik kilometrů. Vyskytují se v křehkých deformačních zónách, které odrážejí lokalizovanou tektonickou aktivitu v závěrečném období variských orogenních procesů a v období mezozoika až terciéru během alpské orogeneze. Vlivem zejména kontinuálně probíhající alpské orogeneze, střídání glaciálů a interglaciálů a denudací terénu jsou existující zlomy, resp. diskontinuity místy s potenciálním projevem navazující seismické aktivity navzdory tomu že ČR je z tohoto pohledu dlouhodobě považována za území stabilní. Toto kritérium je popsáno dále v kapitole 7.3.4.

Vliv na bezpečnost:

Na popsitelnost a predikovatelnost zlomové sítě zkoumané lokality jsou kladeny velmi vysoké nároky, jelikož se jedná o jedno z hlavních kritérií ovlivňující výstavbu, provoz a životnost hlubinného úložiště. (Havlová et al. 2018 – TZ 327/2018).

Z hlediska vhodnosti lokality pro umístění jaderného zařízení by měl být stupeň křehkého porušení zlomy co nejnižší, protože zlomové struktury představují významná mechanická oslabení horninového masívu obzvláště v krystalinickém prostředí a slouží tak jako preferenční cesty pro migraci fluid, a to až k zemskému povrchu. Spolu s křehkým porušením horninového masívu drobnými diskontinuitami – puklinami pak dotváří komplexní systém transportu fluid a spolu s tím i potenciálních radionuklidů

Dostupná data:

Rozsáhlý soubor archivních geovědních zpráv a map je přehledně shrnutý ve zprávách, které doprovázejí detailní 3D geologické modely 7 lokalit (Franěk et al., 2018, z vybraných 4 lokalit se toto týká Horky, Hrádku a Březového potoka), a 3D geologický model ETE-Jih (Navrátilová a Noll, 2017). Morfostrukturní analýza terénu umožňující lépe lokalizovat terénní práce a vytipovat potenciální zlomové struktury je uvedena ve zprávě Kopačkové et al. 2017. Data získaná v letech 2017-2019 díky novým geofyzikálním a geologickým výzkumům, které výrazně přispěly k objasnění zlomové situace, jsou pak pro všechny tyto 4 lokality shrnuta v rozsáhlé práci Mixy et al. (2019).

Zároveň jsou všechny tyto podklady přehlednou a stručnější formou shrnuty ve zprávách týkajících se hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti (Havlová et al., 2020 a, e, f, g)

Nejistoty:

Se současným stavem poznání jednotlivých lokalit je obtížné stanovit zejména hloubkový dosah zlomů. Krystalinické horninové prostředí umožňuje jen v omezené míře využití hlubokých geofyzikálních metod, jako např. reflexní/refrakční seismiky. Vysoká homogenita prostředí, na rozdíl od jasně stratifikovaných sedimentárních hornin, omezuje spolehlivou interpretaci těchto metod v hlubších partiích masívu. Obdobně se lze vyjádřit ke komplikacím spojených s určením sklonu dokumentovaného zlomu. I z těchto důvodů jsou v 3D geologických modelech zlomy modelovány převážně jako vertikální struktury (sklon 90°) a konvenčně až k bázi modelované oblasti.

Je-li v terénu, vzácně, nalezena přímo zlomová plocha, jsou na ní často nalezeny známky polyfázové reaktivace těchto struktur a je tak možné předpokládat že zlom, který měl při svém vzniku charakter např. horizontálního posunu, se během dalšího eventu reaktivoval a charakter pohybu na zlomu se mohl změnit např. na pokles či násun. Určení sukcese těchto

jevů je komplikované a predikce dalšího potenciálního posunu na konkrétním zlomu v horizontu stovek tisíc let záleží na mnoha externích faktorech, které v současné době nelze spolehlivě predikovat jako je například zalednění, odlehčení a denudace terénu či zvýšení seismické aktivity dané pokračující alpínskou orogenezí.

Doporučení:

Ověřování hloubkového dosahu zlomů pomocí kombinace geofyzikálních metod a vrtného průzkumu. V kombinaci s metodami morfofotektonické analýzy a dálkového průzkumu země zpřesnit délku a průběh výrazných zlomů identifikovaných geologickým průzkumem. Pokusit se pomocí kopných prací odhalit zlomové plochy a zpřesnit tak představu o kinematice, rozsahu a charakteru zlomové zóny a její vliv na okolní horninový masiv. Kontinuálním monitoringem povrchových pramenů a pramenných linií zpřesnit vliv zlomové zóny na proudění či retenci podzemní vody.

Reference:

- FRANĚK J., BUKOVSKÁ Z., BURIÁNEK D., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ B., GRUNDLOCH J., HOLEČEK J., JELÉNEK J., JELÍNEK J., KLOMÍNSKÝ J., KRYŠTOFOVÁ E., KUČERA R., KUNCEOVÁ E., KŮRKOVÁ I., NAHODILOVÁ R., PACHEROVÁ P., PERTOLDOVÁ J., PEŘESTÝ V., RUKAVIČKOVÁ L., SOEJONO I., ŠVAGERA O., VERNER K., ŽÁČEK V. (2018): Závěrečná zpráva 3D strukturně – geologické modely potenciálních lokalit HÚ. MS SÚRAO, TZ 229/2018, Praha, 594 str.
- FRANĚK J., BUKOVSKÁ Z., ČEJCHANOVÁ A., JELÉNEK J., MLČOCH B., PERTOLDOVÁ J., SKÁCELOVÁ Z., SOEJONO I., ŠVAGERA O., VERNER K., MILICKÝ M., BARTÁŠKOVÁ L. (2015): Regionální 3D strukturně geologický model lokality Horka. Technická zpráva MS SÚRAO Praha.
- HAVLOVÁ, V., TRTÍLEK, R., RATAJ, J. (2018): Normalizované vyhodnocení vhodnosti lokalit pro umístění úložiště VJP a RAO z hlediska dlouhodobé bezpečnosti. MS SÚRAO, TZ 327/2018, 75 str.
- HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., BAIER, J., MILICKÝ, M., POLÁK, M., BUKOVSKÁ, Z., ČERNÝ, M., DUŠEK, K., FIFERNOVÁ, M., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., HOLEČEK J., JELÉNEK, J., JANKOVEC, J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., KUNCEOVÁ, E., PETYNIÁK, O., RAPPRIK, V., RUKAVIČKOVÁ, L., SOEJONO, I., ŠVAGERA, O., UHLÍK, J., VOJTĚCHOVÁ, H., ŽÁČKOVÁ, E. (2020a): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Březový potok. MS SÚRAO, TZ 447/2020, 62 str.
- HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., JANKOVEC, J., UHLÍK, J., ČERNÝ, M., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., BAIER, J., DUŠEK, K., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., HEJTMÁNKOVÁ, P., HOLEČEK J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., MILICKÝ, M., NAHODILOVÁ, R., PACHEROVÁ, P., PETYNIÁK, O., PEŘESTÝ, V., RAPPRIK, V., ŘIHOŠEK, J., RUKAVIČKOVÁ, L., ŠVAGERA, O., POLÁK, M., VOJTĚCHOVÁ, H., ŽÁČKOVÁ, E. (2020e): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Janoch (ETE-jih). MS SÚRAO, TZ 451/2020, 63 str.
- HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., UHLÍK, J., JANKOVEC, J., MILICKÝ, M., BAIER, J., BURIÁNEK, D., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ, B., DUŠEK, K., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., GRUNDLOCH, J., HOLEČEK J., JELÉNEK, J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., KUNCEOVÁ, E., PETYNIÁK, O., POLÁK, M., RAPPRIK, V., RUKAVIČKOVÁ, L., ŠVAGERA, O.,

- VOJTĚCHOVÁ, H. (2020f): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Horka. MS SÚRAO, TZ 452/2020, 63 str.
- HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., BAIER, J., MILICKÝ, M., BUKOVSKÁ, Z., ČERNÝ, M., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ, B., DUŠEK, K., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., HOLEČEK J., JANKOVEC, J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., KUNCEOVÁ, E., PETYNYIAK, O., POLÁK, M., RAPPRIK, V., RUKAVIČKOVÁ, L., ŠVAGERA, O., URÍK, J., VOJTĚCHOVÁ, H., ŽÁČKOVÁ, E. (2020g): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Hrádek. MS SÚRAO, 453/2020, 63 str.
- KOPAČKOVÁ V., JELÍNEK J., ŠVAGERA O., HROCH T., KOUCKÁ L., JELÉNEK J., SKÁCELOVÁ Z., FÁROVÁ K. (2017): Morfostrukturní analýza širšího okolí průzkumných území pomocí DPZ. MS SÚRAO, TZ 115/2017, Praha, 120 str.
- MIXA P., SKÁCELOVÁ Z., PERTOLDOVÁ J., BUKOVSKÁ Z., BURIÁNEK D., DUDÍKOVÁ B., FRANĚK J., HRDLIČKOVÁ K., JELÍNEK J., NAHODILOVÁ R., SOEJONO I., VERNER K., ŽÁČEK V. (2019): Shrnutí výsledků geologických a geofyzikálních výzkumných prací provedených v období 9/2017–6/2019 pro aktualizaci hodnocení potenciálních lokalit hlubinného úložiště RAO. MS SÚRAO, TZ 412/2019, Praha, 427 str.
- NAVRÁTILOVÁ V., NOL O., KAŠPAR R., LANČA D., MIŠUREC J., NEDVĚD J., RAJCHL M., SOSNA K., ŠINDELÁŘ M., TLAMSA J., VOJTĚCHOVSKÁ A. (2017): Zpráva o provedení geologicko-výzkumných prací na lokalitě ETE-jih. Závěrečná zpráva, MS SÚRAO, 280 str.
- ŠVAGERA O., BUKOVSKÁ Z., ČEJCHANOVÁ A., FRANĚK J., JELÉNEK J., MLČOCH B., PERTOLDOVÁ J., SKÁCELOVÁ Z., SOEJONO I., VERNER K., MILICKÝ M., BARTÁŠKOVÁ L. (2016): Regionální 3D strukturně geologický model lokality Březový potok. Technická zpráva MS SÚRAO, Praha.

Vyhláška č. 378/2016 Sb., o umístění jaderného zařízení, ve znění pozdějších předpisů.

6.2.2 Puklinové systémy

Popis:

Puklinové systémy představují nižší stupeň křehkého porušení horninového masivu nežli zlomy. Nedosahují takové délky jako zlomy, ale jejich hustota je významně vyšší a představují tak jedno z hlavních geomechanických a hydrogeologických rizik. Posuzování území k umístění jaderného zařízení křehkou tektonikou je dáno vyhl. č. 378/2016 Sb. §18 bod 2b. Popis a pochopení geometrie puklinové sítě přispívá k lepší parametrizaci hydraulických modelů a predikci potenciální kontaminace uniklými radionuklidy. Pukliny vznikají ve všech typech horninového prostředí, například při tuhnutí magmatu nebo vysychání sedimentů. Nejčastější jsou však pukliny vzniklé působením tektonického napětí v horninovém prostředí. Tyto pukliny se mohou vyskytovat ve velkých hloubkách (cca 20 km) a vznikají i v režimu přechodu horniny z duktilního (plastického) do křehkého (pevného) stavu. Pro účely budování HÚ jsou důležité pukliny vyskytující se v hloubkách cca do 2 km, které řadíme podle charakteru jejich vzniku na extenzní nebo střížné. Extenzní pukliny propagují ve směru maximálního působícího napětí a rozevírají se ve směru minimálního působícího napětí, často mívají minerální výplň, a čím blíže k povrchu vznikají tím je, vlivem snižujícího se působení litostatického napětí, jejich rozevření větší. Střížné pukliny typicky vznikají v rozmezí 20–30° od největší složky působícího napětí a dochází u nich ke smyku, který je na ploše pukliny často

zaznamenán ve formě kinematických indikátorů jako je například rýhování (striace), ze kterých lze odečíst jak se horninové bloky, oddělené puklinou, vůči sobě v minulosti pohybovaly. Pukliny vytváří v horninovém masivu síť diskontinuit typicky o velikosti desítek cm až stovek metrů, které v sobě zaznamenávají střídání různých režimů napětí vlivem tektonické činnosti. Přesné stáří vzniku puklin je však těžké přesně stanovit, jelikož vlivem změn v napěťovém režimu dochází často k reaktivaci již existujících puklin, které je možné pozorovat například ve formě vícečetného rýhování (striací) nebo vícečetným minerálním složením puklinové výplně. Vlivem působení různých napětí na horninový masiv během jeho vývoje dochází k tvorbě nových puklinových systémů, jejichž charakteristika se odvíjí od systémů předchozích. Dochází tak ke křížení puklinových systémů, jejich spojování, ukončování nebo vyznívání. Při vzniku zlomu často dochází ke vzniku puklinové sítě v jeho bezprostředním okolí a tato rovněž interaguje s okolními dislokacemi a horninovým masivem.

Vliv na bezpečnost:

Puklinová síť významnou měrou celistvost horninového masivu. Platí, že čím složitější geologický vývoj horninová jednotka prodělala, tím četnější a složitější bude i doprovodná puklinová síť. I z tohoto důvodu je nevhodnější uvažovat o co nejhomogennějším horninovém prostředí pro výstavbu HÚ. Pukliny, podobně jako zlomy mají predispozice k působení jako vodič nebo bariéra pro migraci vody, potažmo v ní rozpuštěných látek nebo např. radionuklidů. Vzhledem k menším rozměrům puklin je tento vliv násobně nižší než u zlomů, ale díky velké četnosti navzájem propojených diskontinuit pracuje puklinová síť jako komplexní migrační cesta. Znalost komplexnosti puklinové sítě má rovněž vliv na predikci a zhodnocení stability horninového masivu během procesu výstavby podzemní části úložiště. Vlivem razicích nebo trhacích prací jsou pukliny ovlivněny a může být indukována jejich propagace dále do masivu, či naopak jejich propojení v blízkosti stěn výrubu. Tyto oblasti se označují jako EDZ nebo EdZ (Excavation Damaged/disturbed Zone) tedy zóny porušení vlivem ražby. Vliv na bezpečnost má i následná relaxace masivu a jeho odlehčení vlivem vyhloubeného podzemního prostoru tento jev je dlouhodobý. V obou případech je třeba tyto jevy monitorovat a přijmout technologická opatření (např. zpevnění stěn chodeb) které budou tyto jevy kompenzovat. Znalost či alespoň modelový předpoklad puklinové sítě v hloubce HÚ může výrazně přispět k navržení optimálního postupu při projektování podzemní části HÚ.

Dostupná data:

Pro jednotlivé potenciální lokality k umístění HÚ vznikl v roce 2017 (Kabele et al. 2017) velký dataset strukturních měření puklinových sítí, který byl následně využit pro vývoj programu na tvorbu DFN modelů anebo pro využití v již existujícím software na matematické vyhodnocení puklinových sítí. Metodika modelování, je pak dále rozšiřována a kalibrována za využití různých vstupních dat ať již z podzemí nebo z povrchu (Bukovská et al. 2020, Gvoždík et al. 2020).

Pukliny a puklinové systémy jsou kontinuálně zaznamenávány při geologické dokumentaci výchozů, lomů, zářezu silnic apod. Limitem těchto dat je jejich generalizované podání. Standardně pro účely geologického mapování není třeba zaznamenávat každý jednotlivý set puklin, ale stačí určit směr a sklon hlavního systému, či dvou a četnost struktur na jednotku délky. Rovněž u této standardní dokumentace není zaznamenána viditelná délka struktury, která má velký vliv na hustotu propojení puklinové sítě. Tento dataset však může sloužit k vytipování výchozů vhodných k podrobnému zdokumentování a dává představu o hlavních směrech puklinových systémů v oblasti.

Nejistoty:

Prozkoumanost puklinových systémů je většinou limitována na odhalené horninové podloží v podobě terénních výchozů. Lomy a doly, kde je odkrytost horninového masivu největší, je často limitována pouze na lokální objekty, které jsou mnohdy nepřístupné. Největší nejistotu představuje z hlediska dokumentace zejména absolutní délka puklin, kterou nelze na horninových výchozech s výjimkou velmi drobných struktur spolehlivě změřit. Kvalitativní posun v této oblasti přináší dokumentace lomových stěn, avšak ty představují jen zlomek dokumentovaného území, a i tak nepostihnou struktury větší než několik desítek metrů. Vrtná data, zejména strukturní analýza vrtného jádra nebo akustická karotáž umožňují podchytit hustotu puklinové sítě směrem do hloubky. Přinášejí pouze bodové informace o studované puklině a není tak možné stanovit její velikost nebo dosah.

Doporučení:

Pro statisticky co nejhodnotnější dataset informací o puklinové síti je třeba získat co největší množství informací o orientaci, délce, vzájemných vztazích (vyznívání, prolínání a ukončování) a typu struktury, včetně výplně. Základní popis puklinové sítě lze získat z podrobné dokumentace výchozů, odkryvů a lomů, například s využitím fotogrammetrických 3D modelů a jejich následným digitálním zpracováním jako např. v Kabele et al. 2017.

Informace o rozsahu křehkého porušení zejména v okolí zlomů, lze získat pomocí dokumentace hloubených rýh, s využitím mělkého vrtání s výnosem jádra nebo z výsledků geofyzikálních měření (např. vertikální elektrické sondování nebo odporová tomografie). Základní charakteristiky získané z povrchu lze pak extrapolovat do hloubky a kalibrovat je daty z hlubokých vrtů, které by měly být karotované a měly by mít výnos orientovaného jádra. Maximální délku některých puklinových setů, lze dovodit z metod dálkového průzkumu Země ať již trasováním zvodnělých linií v různých vegetačních obdobích nebo metodou analýzy morfolineamentů. Díky podrobnému výzkumu výchozů a odkryvů by mělo být možné odlišit lineamenty zlomových struktur a puklin. V neposlední řadě je třeba rozvíjet metody matematického modelování puklinových sítí, jelikož s přibývajícím množstvím dat lze zpřesňovat tyto výpočty a zároveň v současnosti neexistuje jiný způsob, jak modelovat puklinovou síť v objemu studovaného území. Matematické modely vzniku a podoby puklinové sítě, vznikají z kombinace terénních pozorování, vrtných dat a statistického vyhodnocení. Tyto modely puklinových sítí, tzv. DFN (Discrete Fracture Network), ať již generované stochasticky na základě přímých terénních měření a statistik četností získaných z vrtů nebo generované náhodně na základě genetických (sukcese vzniku puklinových systémů) a směrových parametrů existující puklinové sítě (Grown-DFN) slouží jako vstupní data pro hydraulické simulace proudění vody v horninovém masivu. Tyto simulace pak určují potenciál horninového masivu transportovat radionuklidy, potenciálně až k zemskému povrchu a dávají představu o předpokládané hustotě puklinové sítě v hloubce úložiště. Tato informace je podstatná pro návrh podzemního díla a s přibývajícím daty během průzkumu i samotné konstrukce pro predikci jemnější puklinové sítě v izolační části úložiště.

Reference:

BUKOVSKÁ, Z., ŠVAGERA, O., CHABR, T., LEICHMANN, J., SOSNA, K., SOUČEK, K., VAVRO, M., ZUNA, M., NAVRÁTIL, P., BOHDÁLEK, P., BOŠKOVÁ, M., DOBEŠ, P., FILIPSKÝ, D., FRANĚK, J., GALEKOVÁ, E., GEORGIOVSKÁ, L., HANÁK, J., HAVLOVÁ, V., HLISNIKOVSÝ, K., HOLECZY, D., JANKOVSKÝ, F., JAROŠ, M., JELÍNEK, J., JELÍNEK, J., KNĚSL, I., KOUČKÁ, L., KRYL, J., KŘÍBEK,

- B., KUBEŠ, M., KUBINA, L., KUČERA, R., KUKUTSCH, R., LAUFEK, F., MIXA, P., MOZOLA, J., NÁSIR, M. M., PALÁT, J., PATOČKA, M., POŘÁDEK, P., ROSENDORF, T., SOEJONO, I., STAŠ, L., VAVRO, L., VESELOVSKÝ, F., VOREL, J., WACLAWIK, P., WERTICH, V., ZAJÍCOVÁ, V., ZELINKOVÁ, T. (2020): Získání dat z hlubokých horizontů dolu Rožná - závěrečná zpráva. 705 s. MS archiv ČGS Praha
- FRANĚK J., BUKOVSKÁ Z., BURIÁNEK D., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ B., GRUNDLOCH J., HOLEČEK J., JELÉNEK J., JELÍNEK J., KLOMÍNSKÝ J., KRYŠTOFOVÁ E., KUČERA R., KUNCEOVÁ E., KŮRKOVÁ I., NAHODILOVÁ R., PACHEROVÁ P., PERTOLDOVÁ J., PEŘESTÝ V., RUKAVIČKOVÁ L., SOEJONO I., ŠVAGERA O., VERNER K., ŽÁČEK V. (2018): Závěrečná zpráva 3D strukturně – geologické modely potenciálních lokalit HÚ. MS SÚRAO, TZ 229/2018, Praha, 594 str.
- FRANĚK J., BUKOVSKÁ Z., ČEJCHANOVÁ A., JELÉNEK J., MLČOCH B., PERTOLDOVÁ J., SKÁCELOVÁ Z., SOEJONO I., ŠVAGERA O., VERNER K., MILICKÝ M., BARTÁŠKOVÁ L. (2015): Regionální 3D strukturně geologický model lokality Horka. Technická zpráva MS SÚRAO Praha.
- GVOŽDÍK, L., KABELE, P., ŘÍHA, J., ŠVAGERA, O., TRPKOŠOVÁ, D., VETEŠNÍK, A., BUKOVSKÁ, Z., GRECKÁ, M., JANKOVEC, J., KRÁLOVCOVÁ, J., KRYL, J., MARYŠKA, J., MILICKÝ, M., UHLÍK, J., URBAN, P., ZELINKOVÁ, T. (2020): Transport radionuklidů z hlubinného úložiště – Testování koncepčních a výpočetních modelů. MS SÚRAO, TZ 463/2020, 102 str.
- HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., BAIER, J., MILICKÝ, M., POLÁK, M., BUKOVSKÁ, Z., ČERNÝ, M., DUŠEK, K., FIFERNOVÁ, M., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., HOLEČEK J., JELÉNEK, J., JANKOVEC, J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., KUNCEOVÁ, E., PETYNIÁK, O., RAPPRIČH, V., RUKAVIČKOVÁ, L., SOEJONO, I., ŠVAGERA, O., UHLÍK, J., VOJTĚCHOVÁ, H., ŽÁČKOVÁ, E. (2020a): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Březový potok. MS SÚRAO, TZ 447/2020, 62 str.
- HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., JANKOVEC, J., UHLÍK, J., ČERNÝ, M., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., BAIER, J., DUŠEK, K., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., HEJTMÁNKOVÁ, P., HOLEČEK J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., MILICKÝ, M., NAHODILOVÁ, R., PACHEROVÁ, P., PETYNIÁK, O., PEŘESTÝ, V., RAPPRIČH, V., ŘIHOŠEK, J., RUKAVIČKOVÁ, L., ŠVAGERA, O., POLÁK, M., VOJTĚCHOVÁ, H., ŽÁČKOVÁ, E. (2020e): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Janoch (ETE-jih). MS SÚRAO, TZ 451/2020, 63 str.
- HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., UHLÍK, J., JANKOVEC, J., MILICKÝ, M., BAIER, J., BURIÁNEK, D., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ, B., DUŠEK, K., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., GRUNDLOCH, J., HOLEČEK J., JELÉNEK, J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., KUNCEOVÁ, E., PETYNIÁK, O., POLÁK, M., RAPPRIČH, V., RUKAVIČKOVÁ, L., ŠVAGERA, O., VOJTĚCHOVÁ, H. (2020f): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Horka. MS SÚRAO, TZ 452/2020, 63 str.
- HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., BAIER, J., MILICKÝ, M., BUKOVSKÁ, Z., ČERNÝ, M., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ, B., DUŠEK, K., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., HOLEČEK J., JANKOVEC, J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., KUNCEOVÁ, E., PETYNIÁK, O., POLÁK, M., RAPPRIČH, V., RUKAVIČKOVÁ, L., ŠVAGERA, O., URÍK, J., VOJTĚCHOVÁ, H., ŽÁČKOVÁ, E. (2020g): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Hrádek. MS SÚRAO, 453/2020, 63 str.

- KABELE, P., ŠVAGERA, O., SOMR, M., NEŽERKA, V., ZEMAN, J., BUKOVSKÁ, Z., FRANĚK, J., JELÍNEK, J., SOEJONO, I. (2018): Mathematical modelling of brittle fractures in rock mass by means of the DFN method. 117 s. MS Správa úložišť radioaktivních odpadů
- MIXA P., SKÁCELOVÁ Z., PERTOLDOVÁ J., BUKOVSKÁ Z., BURIÁNEK D., DUDÍKOVÁ B., FRANĚK J., HRDLIČKOVÁ K., JELÍNEK J., NAHODILOVÁ R., SOEJONO I., VERNER K., ŽÁČEK V. (2019): Shrnutí výsledků geologických a geofyzikálních výzkumných prací provedených v období 9/2017,6/2019 pro aktualizaci hodnocení potenciálních lokalit hlubinného úložiště RAO. MS SÚRAO, TZ 412/2019, Praha, 427 str.
- NAVRÁTILOVÁ V., NOL O., KAŠPAR R., LANČA D., MIŠUREC J., NEDVĚD J., RAJCHL M., SOSNA K., ŠINDELÁŘ M., TLAMSA J., VOJTĚCHOVSKÁ A. (2017): Zpráva o provedení geologicko-výzkumných prací na lokalitě ETE-jih. Závěrečná zpráva, MS SÚRAO, 280 str.
- ŠVAGERA O., BUKOVSKÁ Z., ČEJCHANOVÁ A., FRANĚK J., JELÍNEK J., MLČOCH B., PERTOLDOVÁ J., SKÁCELOVÁ Z., SOEJONO I., VERNER K., MILICKÝ M., BARTÁŠKOVÁ L. (2016): Regionální 3D strukturně geologický model lokality Březový potok. Technická zpráva MS SÚRAO, Praha.
- WELLMANN F., REGENAUER-LIEB K. (2012): Uncertainties have a meaning: Information entropy as a quality measure for 3-D geological models. Tectonophysics. 526-529. 207-216. 10.1016/j.tecto.2011.05.001.

Vyhláška č. 378/2016 Sb., o umístění jaderného zařízení, ve znění pozdějších předpisů.

6.3 Geotermální charakteristika horninového prostředí

6.3.1 Tepelné parametry významné pro přenos tepla v horninovém prostředí

Popis:

Dle vyhlášky č. 378/2016 Sb. § 18 odst. 2 písmeno o) je nutno k umístění hlubinného úložiště zhodnotit možnost narušení izolačních vlastností úložného systému v souvislosti s využíváním geotermální energie a dle odst. 4 písmeno c) je zakázáno umisťovat hlubinná úložiště v místech s přítomností zdrojů geotermální energie.

Z výše uvedených důvodů je nutné před výběrem lokality k umístění hlubinného úložiště zhodnotit přirozené geotermické parametry horninového prostředí, které nejen vyloučí přítomnost průmyslově využitelného zdroje zemského tepla, ale jsou i nedílnou součástí bezpečnostní analýzy pro konstrukci a provozování hlubinného úložiště. Tepelné parametry horninového prostředí ovlivňují míru a rychlost odvodu tepla z míst HÚ do svého okolí a mají tak zásadní vliv na projektování a dimenzování HÚ.

Přirozená distribuce tepla v horninovém prostředí je dána fyzikálně-petrologickými vlastnostmi horninového prostředí, v němž se teplo šíří. Mezi základní popisné termické parametry patří:

- teplota horninového masivu
- tepelný tok
- teplotní gradient
- radiogenní produkce tepla

Teplota horninového prostředí, pomineme-li nejmělejší přípovrchovou zónu ovlivněnou sezónními klimatickými vlivy, obecně vzrůstá s rostoucí hloubkou od zemského povrchu do nitra Země. Dosažená teplota horninového prostředí je pak závislá na dalších termických parametrech horninového prostředí, jako jsou radiogenní produkce tepla, tepelná vodivost hornin a na velikosti zemského tepelného toku. V podmínkách ČR lze na aktuálně doporučených potenciálních lokalitách hlubinného úložiště v hloubce 500 m očekávat teploty v rozmezí 18–25 °C, přičemž hodnota ≤ 25 °C je dle TR-00-12 (Andersson et al. 2000) uvažována jako vhodné prostředí pro situování HÚ.

Tepelný tok je jednou ze základních termických veličin, která vyjadřuje množství tepelné energie šířící se ve směru spádu tepelného gradientu jednotkovou plochou (m^2). Tepelný tok se obvykle udává v jednotkách $mW \cdot m^{-2}$. Pro tepelný tok platí následující matematický vztah:

$$Q = k \cdot \Delta T$$

kde Q je velikost tepelného toku, k je koeficient tepelné vodivosti hornin a ΔT je přírůstek teploty s hloubkou, tj. teplotní gradient. Velikost tepelného toku se liší v různých místech zemského povrchu a jeho velikost je dána termálními vlastnostmi hornin v daném místě a geologickou stavbou území.

Teplotní gradient určuje změnu teploty připadající na jednotkovou vzdálenost ve směru kolmém k izotermickým plochám. Zjednodušeně se jedná o směr, v němž dochází k největšímu prostorovému poklesu teploty. Průměrný teplotní gradient zemské kůry na území ČR je 30°C na 1 km hloubky, ovšem velikost teplotního gradientu se liší místo od místa v rozmezí 15 – 40 °C/km. V litologicky homogenním prostředí má teplotní gradient lineární průběh, avšak tento lineární průběh je v praxi často narušen přítomností podzemních vod, nebo variabilitou litologických typů ve vertikálním profilu s různými tepelnými vodivostmi. Teplotní gradient je určován nejen přítomnými zdroji tepla, ale také tepelnou vodivostí hornin přenášejících teplo.

Radiogenní produkce hornin je přirozený a trvale probíhající proces produkce tepla horninami. Zdrojem tepla je jaderný rozpad v horninách přirozeně se vyskytujících radionuklidů prvků U, Th a K. Velikost radiogenní produkce je úměrná koncentraci radionuklidů v hornině a hustotě horniny. Velikost radiogenní produkce (A) se obvykle udává v $\mu W \cdot m^{-3}$.

Tab. 2 Radiogenní produkce vybraných hornin v Českém Masivu dle Myslil a kol. 2011

| Hornina | A ($\mu W \cdot m^{-3}$) |
|-------------|----------------------------|
| granit | 2,5 |
| granodiorit | 1,40 |
| syenit | 5,91 |
| metamorphy | 1,26 |
| ortoruly | 1,69 |

| | |
|----------------------|------|
| migmatity | 1,69 |
| svorové ruly | 1,65 |
| amfibolity | 0,30 |
| fyliny, svory | 1,49 |
| chloritické břidlice | 0,39 |

Dle výše uvedené Tab. 2 by granitový blok o objemu 1 km³ generoval teplo o výkonu 2,5 kW. Jiní autoři uvádějí odlišné hodnoty radiogenní produkce pro granitické horniny. Při průměrné tepelné produkci granitu okolo 3 $\mu\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$ (Wedepohl 1969; Vaňková et al. 1979; Čermák a Rybach 1982) se řada granitů v Českém masivu řadí do skupin se zvýšenou (4 $\mu\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$) až anomální (6 $\mu\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$) tepelnou produkcí.

Dle dostupných dat se na aktuálně doporučených kandidátních lokalitách HÚ vyskytují horniny s průměrně až anomálně vysokou radiogenní produkcí tepla. Radiogenní zdroj tepla v horninovém prostředí je z pohledu životního cyklu HÚ sice trvalý, avšak kvantitativně málo významný v porovnání s množstvím tepla produkovaného uloženým vyhořelým jaderným palivem.

Vliv na bezpečnost:

Vliv termálních vlastností hornin na bezpečnost provozu HÚ je významný. Jedna z bezpečnostních funkcí HÚ je odvod zbytkového tepla z obalových souborů mimo prostor vlastního HÚ. Variabilita petrologického složení horninového masivu v oblasti plánovaného hlubinného úložiště ovlivňuje fyzikálně-termické vlastnosti hornin a následně i predikovatelnost disipace tepla z hlubinného úložiště do okolí. Podhodnocení tepelných vlastností hornin vede k výstavbě nadbytečně rozsáhlého hlubinného úložiště, kdy prostory mezi jednotlivými úložnými prostory jsou zbytečně velké a je nutno budovat větší množství podzemních chodeb. Naopak přecenění termických vlastností horninového prostředí, kdy odvod tepla z hlubinného úložiště do okolí by byl nedostatečný, by mohl vést k nárůstu teploty nad únosnou míru a v krajním případě by mohl ohrozit bezpečnost úložiště. Obecně fyzikálně-termické vlastnosti hornin nejsou významnou překážkou pro výstavbu ani provoz hlubinného úložiště. Význam mají tyto parametry v procesu přípravy hlubinného úložiště, kdy může být vybráno prostředí s výhodnějšími parametry, tj. nižší teplotou horninového masivu a vyšší tepelnou vodivostí hornin.

Dostupná data:

Termální vlastnosti hornin 7 kandidátních lokalit HÚ na základě dostupných dat byly zhodnoceny v technické zprávě SÚRAO 486/2020 (Dědeček a kol. 2020). Zhodnocení teplotního gradientu, tepelného toku, dosažených teplot a radiogenní produkce hornin je dostupné pro aktuálně platné vládou ČR doporučené lokality Březový potok, Horka a Hrádek, nikoliv ale pro lokalitu Janoch u Temelína, která byla do výběru lokalit zařazena až po vyhotovení výše uvedené zprávy.

Tepelný tok a teplota hornin v různých hloubkových úrovních pro území ČR, potažmo na doporučených lokalitách HÚ, jsou nejnověji publikovány ve webové mapové aplikaci Geotermální potenciál ČR vytvořené společně odborníky ČGS a GFÚ AV ČR dostupné na adrese: https://mapy.geology.cz/geotermalni_potencial/ (Dědeček a kol. 2022).

Nejistoty:

Termické parametry hornin jsou závislé na jejich mineralogickém složení, struktuře a textuře. Ačkoliv TZ 486/2020 (Dědeček a kol. 2020) dává rámcovou představu o tepelných vlastnostech hornin na vybraných lokalitách, je třeba upozornit na fakt, že primární měření termálních parametrů byla provedena na vzorcích z povrchového sběru a měřené hodnoty tak nemusí zcela odpovídat skutečnosti v hloubce plánovaného HÚ. Povrchové vzorky mohly být v geologické minulosti vystaveny procesům zvětrávání (zvyšuje se porozita hornin, množství přítomných jílových minerálů apod.), což mohlo ovlivnit některé termální parametry a následně by ovlivnilo budoucí výpočty a termální modelování HÚ. Z tohoto důvodu je v budoucnu nutné snížit nejistotu stanovení dodatečným množstvím nových analýz termálních parametrů na čerstvých vzorcích hornin, ideálně z prostředí HÚ, tak aby byla získána statisticky robustní datová sada měření.

Obecně nejistota stanovení termických parametrů bude závislá na variabilitě litologie v horninovém masivu a na predikovatelnosti této variability.

Nejistota stanovení tepelného gradientu na lokalitách HÚ vychází z faktu, že byla vypočtena na základě modelů, které se opírají o data z vrtů nacházejících se v různé vzdálenosti od míst zvažovaných lokalit HÚ. Tato termická data jsou následovně extrapolována do míst zkoumaných lokalit a nejistota výpočtů roste se vzdáleností od místa primárního měření a proměnlivostí geologické stavby.

Doporučení:

Při výběru horninového prostředí s výhodnějšími geotermickými parametry (nižší teplota horninového prostředí, vyšší tepelné vodivosti hornin) lze vybudovat HÚ kompaktnějších rozměrů a lze tak snížit ekonomické nároky na budování takového úložiště. Pro snížení nejistot termických parametrů horninového prostředí je zcela zásadní opakování měření na horninových vzorcích odpovídající hloubce založení HÚ na vybraných lokalitách. To bude vyžadovat odvrtání 500 m hlubokého jádrového výzkumného vrtu na každé ze zvažovaných kandidátních lokalit. Jádro z tohoto výzkumného vrtu bude využito pro získání dostatečného počtu nových měření termálních parametrů hornin, aby bylo možné statisticky popsat jejich variabilitu. Dále je nutné na vrtu provést měření teplotního gradientu horninového prostředí v místě plánovaného HÚ. Všechna tato nová měření významně sníží nejistoty vyplývající z extrapolací dat z míst mimo zájmové území, sníží se nejistoty dané neexistencí statisticky dostatečně velkého souboru dat.

Reference:

ANDERSSON J., STROEM A., SVEMAR CH., ALMEN K. E., ERICSSON L. O. (2000): What requirements does the KBS-3 repository make on the host rock? Geoscientific suitability indicators and criteria for siting and site evaluation (SKB-TR-00-12). Sweden.

ČERMÁK V., RYBACH L. (1982): Thermal properties: Thermal conductivity and specific heat of minerals and rocks. – Geophysics and space research, 1, 305-343.

DĚDEČEK P., UXA T., HOLEČEK J. (2020): Geotermické zhodnocení potenciálních lokalit HÚ na základě dostupných dat. – MS SÚRAO, TZ 486/2020

DĚDEČEK P., ŠAFANDA J., UXA T., HOLEČEK J., BURDA J., DUDKOVÁ I., KACHLÍKOVÁ R., PALEČEK M., KLOZ. M., HOLEČKOVÁ P. (2022): Mapy potenciálu geotermální energie v různých hloubkových úrovních a mapy střetů zájmů na území ČR, https://mapy.geology.cz/geotermalni_potencial/, 24. 5. 2022

MYSLIL V., KAROUS M., MOTLÍK J., PAČES T., POŠMOURNÝ K. (2011): Geotermální energie, Zdroje – využití – technologie, Geoterm CZ s.r.o, 186 str.

VAŇKOVÁ V., BARTOŠEK J., CHLUPÁČOVÁ M., MATOLÍN M. (1979): Radioactivity and heat production of rocks from the Bohemian Massif and the West Carpathians. In: Geodynamic Investigations in Czechoslovakia, 257-263. – Veda, Bratislava.

WEDEPOHL K. H. (1969): Handbook of Geochemistry, Spriger-Verlag Berlin, 442 s.

Vyhláška č. 378/2016 Sb., o umístění jaderného zařízení, ve znění pozdějších předpisů.

6.3.2 Tepelné parametry horninového masivu významné pro odvod tepla z HÚ

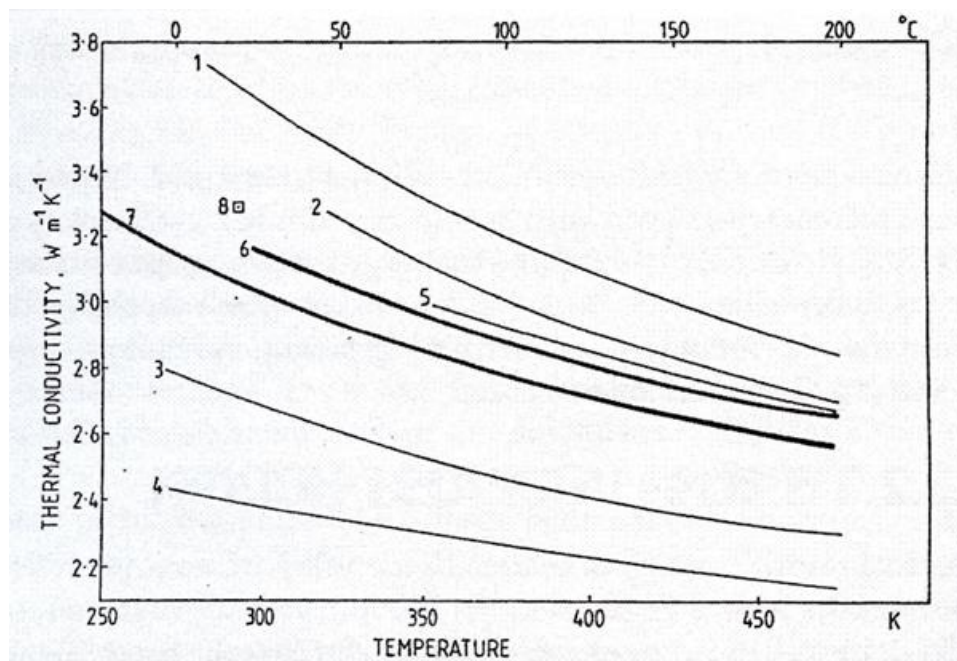
Popis:

Disipace neboli rozptylování a odvod zbytkového tepla z úložných obalových souborů vyhořelého jaderného paliva je jednou ze základních funkcí hlubinného úložiště. Proces šíření tepla v horninovém prostředí je závislý na petrologicko-termických parametrech použitých konstrukčních materiálů a hornin v okolí HÚ. Mezi tyto základní termické parametry patří:

- tepelná vodivost hornin,
- homogenita a izotropie tepelné vodivosti hornin,
- tepelná kapacita hornin.

Tepelná vodivost hornin je základní popisnou veličinou vyjadřující schopnost horniny vést teplo. Synonymními pojmy jsou koeficient tepelné vodivosti nebo tepelná konduktivita. Tepelná vodivost horniny je závislá především mineralogickém složení horniny, na jejím strukturním a texturním uspořádání, pórovitosti a obsahu přítomné vody v hornině. Tepelná vodivost se zpravidla označuje řeckým písmenem λ a vyjadřuje se v jednotkách $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$.

Tato veličina nabývá mezi běžnými horninotvornými minerály nejvyšší hodnoty pro křemen ($\lambda = 8,4 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$), nízké hodnoty tepelné vodivosti mají pak některé jíly a jílovce ($\lambda = 0,4 - 0,8 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$). U většiny hornin zemské kůry se tento parametr pohybuje v rozmezí $\lambda = 2,1 - 4,2 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ (Myslil a kol., 2011). Z výše uvedeného vyplývá, že čím větší podíl křemene hornina obsahuje, tím vyšší je hodnota její tepelné vodivosti (Obr. 5). Naopak čím více hornina obsahuje jílových minerálů s nízkou tepelnou vodivostí, tím celkově klesá její tepelná vodivost. Hodnota tepelné vodivosti je též významně závislá na jejím nasycení vodou. Je tedy vhodné měřit tepelnou vodivost jak v nasyceném, tak i suchém stavu, aby bylo možné modelovat tepelnou vodivost pro různé stavy nasycení horniny. Pro horninové prostředí HÚ byla stanovena preferovaná hodnota tepelné vodivosti hornin $>2,5 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ (Andersson a kol. 2000). Vyšší hodnoty tepelné vodivosti hornin jsou pro HÚ výhodnější z důvodu rychlejšího odvodu tepla do okolí.



Obr. 5 Tepelná vodivost různých typů granitů a závislost změn tepelné vodivosti na teplotě. (in: Myslík a kol., 2011)

Homogenita a izotropie tepelné vodivosti je charakteristika horniny vyjadřující variabilitu změn tepelné vodivosti hornin v prostoru. V ideálně izotropním prostředí je tepelná vodivost horniny konstantní v libovolném bodě či směru v prostoru, avšak v reálném horninovém prostředí změna poměrů minerálního zastoupení a strukturní a texturní uspořádání horniny způsobují variabilitu tepelné vodivosti v různých směrech. Horniny s homogenním minerálním složením a všesměrnou strukturou mají vysokou míru izotropie tepelné vodivosti. Naopak horniny s laminárním, či tokovým uspořádáním textury vykazují zvýšenou míru anizotropie a lze u nich změřit směry λ_{\min} a λ_{\max} . Znalost této charakteristiky je významná pro matematické modelování šíření tepla ze zdroje tepla, potažmo z HÚ, kdy teplo se šíří různými směry různě rychle.

Měrná tepelná kapacita horniny vyjadřuje množství tepelné energie (tepla), které je potřeba ke zvýšení teploty jednotkové hmotnosti (1 kg) o jednotkový teplotní rozdíl (1 °K). Měrná tepelná kapacita (c) se udává v jednotkách $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ a je definována následujícím vztahem:

$$c = \frac{\lambda}{\rho \cdot \kappa}$$

kde c je měrná tepelná kapacita horniny ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$), λ je tepelná vodivost ($W \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$) a κ je koeficient tepelné vodivosti ($m^2 \cdot s^{-1}$). Tepelná kapacita má na rozdíl od tepelné vodivosti izotropní charakter, je závislá na mineralogickém složení horniny či přítomnosti vody, ale ne na textuře a struktuře horniny. Při výpočtech se často používá objemová tepelná kapacita vyjadřující množství tepla, které je potřeba ke zvýšení teploty jednotkového objemu horniny (1 m³) o jednotkový teplotní rozdíl (1 °K). Objemová tepelná kapacita je produktem (součinem) měrné tepelné kapacity a hustoty horniny.

Vliv na bezpečnost:

Odvod tepla z místa ukládání VJP do okolí je nezbytnou funkcí úložiště, aby nedošlo k nárůstu teploty nad povolenou limitní kritickou mez, která by ohrožovala bezpečnost provozu (nárůst teploty na povrchu UOS nad předpokládaný limit 95 °C).

Tepelné parametry hornin mají vliv i na konstrukci HÚ v době plánování a výstavby, avšak nejsou to kritéria, která by technicky znemožňovala výstavbu. V případě méně výhodných termických parametrů hornin je dopadem horší ekonomika výstavby, kvůli nutnosti výstavby objemově většího HÚ schopného odvádět zbytkové teplo z uloženého vyhořelého jaderného paliva do svého okolí.

Dostupná data:

Termální vlastnosti hornin 7 kandidátních lokalit HÚ na základě dostupných dat byly zhodnoceny v technické zprávě SÚRAO 486/2020 (Dědeček a kol. 2020). Zhodnocení tepelné vodivosti hornin, izotropie tepelné vodivosti a tepelné kapacity a radiogenní produkce hornin je dostupné pro aktuálně platné vládou ČR doporučené lokality Březový potok, Horka a Hrádek, nikoliv ale pro lokalitu Janoch u Temelína, která byla do výběru lokalit zařazena až po vyhotovení výše uvedené zprávy. Z výše uvedeného vyplývá, že termická data jsou neúplná a v další fázi výzkumu bude třeba získat statisticky robustní datovou sadu vhodnou pro matematické modelování šíření tepla z HÚ.

Nejistoty:

Termické parametry hornin jsou závislé na jejich mineralogickém složení, struktuře a textuře. Ačkoliv TZ 486/2020 (Dědeček a kol. 2020) dává rámcovou představu o tepelných vlastnostech hornin na vybraných lokalitách, je třeba upozornit na fakt, že primární měření termálních parametrů byla provedena na vzorcích z povrchového sběru a měřené hodnoty tak nemusí zcela odpovídat realitě v hloubce plánovaného HÚ. Povrchové vzorky mohly být v geologické minulosti vystaveny procesům zvětrávání, což mohlo ovlivnit některé parametry a následně i výpočty.

Obecně nejistota stanovení termických parametrů hornin je závislá na variabilitě litologie v horninovém masivu a na předvídatelnosti této variability v prostoru.

Doporučení:

Termické parametry hornin jsou dostupné pouze pro část aktuálně doporučených kandidátních lokalit. Tyto parametry chybí pro lokalitu Janoch. Navíc měření proběhla na horninových vzorcích z povrchových sběrů a změřené parametry nemusí odpovídat poměrům v hloubce plánovaného HÚ. Pro snížení nejistot termických parametrů horninového prostředí je zcela zásadní opakování měření na horninových vzorcích odpovídající hloubce založení HÚ na vybraných lokalitách. To bude vyžadovat odvrtání 500 m hlubokého jádrového výzkumného vrtu na každé ze zvažovaných kandidátních lokalit. Při výběru horninového prostředí s výhodnějšími geotermickými parametry (vyšší tepelná vodivost hornin a vyšší míra izotropie) lze vybudovat HÚ kompaktnějších rozměrů a lze tak snížit ekonomické nároky na budování takového úložiště. Některé tepelné parametry hornin (např. tepelná vodivost, tepelná kapacita) jsou závislé na stupni nasycení horninového vzorku vodou, či na teplotě prostředí. V rámci výzkumných prací je třeba stanovit metodický pokyn způsobu stanovení tepelných parametrů hornin tak, aby měření co nejvíce zohledňovaly možné varianty stavu (např. rozsahy předpokládaných teplot) horninového prostředí v místě HÚ v průběhu jeho životního cyklu. Některé parametry je možné matematicky modelovat na základě empiricky zjištěných měření.

Reference:

ANDERSSON J., STROEM A., SVEMAR CH., ALMEN K. E., ERICSSON L. O. (2000): What requirements does the KBS-3 repository make on the host rock? Geoscientific suitability indicators and criteria for siting and site evaluation (SKB-TR-00-12). Sweden.

ANDERSSON J., STROEM A., SVEMAR CH., ALMEN K. E., ERICSSON L. O. (2000): What requirements does the KBS-3 repository make on the host rock? Geoscientific suitability indicators and criteria for siting and site evaluation (SKB-TR-00-12). Sweden.

DĚDEČEK P., UXA T., HOLEČEK J. (2020): Geotermické zhodnocení potenciálních lokalit HÚ na základě dostupných dat. – MS SÚRAO, TZ 486/2020

MYSLIL V., KAROUS M., MOTLÍK J., PAČES T., POŠMOURNÝ K. (2011): Geotermální energie, Zdroje – využití – technologie, Geoterm CZ s.r.o, 186 str.

6.4 Geomechanická charakteristika

6.4.1 Geomechanické vlastnosti

Popis:

Mechanické vlastnosti intaktních vzorků jednotlivých horninových typů vyskytujících se v oblasti HÚ jsou jedním z parametrů, který umožňuje definovat vhodnost horninového masivu pro výstavbu HÚ. Výčet odpovídajících požadavků uvádí Vyhláška č. 378/2016 Sb. v § 18 odst. 2d,l,m. V kontextu hodnocení jednotlivých lokalit a souvisejících legislativních požadavků zmiňují geomechanické vlastnosti, byť v omezené míře dané zřejmě nedostatkem dat, např. Havlová et al. (2018e, 2020) nebo Mixa et al. (2018). Odhad očekávaného rozsahu tří běžných parametrů (pevnost v jednoosém tlaku, Youngův modul a Poissonovo číslo) lze na všech 4 lokalitách HÚ klasifikovat jako R5 (velmi pevné) až R6 (extrémně pevné) pomocí klasifikace International Society for Rock Mechanics. Obecněji geomechanické charakteristiky (moduly přetvárnosti, pevnostní charakteristiky hornin za jednoosého stavu napjatosti, Poissonova konstanta, atd.), dále slouží pro 2D a 3D geomechanické, respektive geotechnické modely HÚ, které charakterizují chování a spolupůsobení horninového masivu z hlediska fyzikálně mechanických a deformačních vlastností jeho litologických jednotek, včetně zohlednění kvality a stavby horninového masivu (strukturní stavba, tektonické porušení, anizotropie, atp.), směru a velikosti horizontálních a vertikálních napětí ve vztahu k procesu projektování a výstavby podzemního díla (např. jeho geometrie). Základními vstupními údaji jsou dále tvary a profily podzemních a povrchových geotechnických děl a jejich časoprostorové uspořádání v horninovém masivu. Pro tyto modely je tedy potřeba celá řada vstupních údajů, jejichž kvalita přímo ovlivňuje kvalitu modelových výsledků.

Ze širšího spektra fyzikálně – mechanických vlastností horninových vzorků byly pro podrobnější popis v rámci FEP jako základní vybrány tyto tři: Pevnost intaktní horniny v prostém tlaku, Modul přetvárnosti intaktní horniny v prostém tlaku a Poissonovo číslo intaktní horniny v prostém tlaku.

Na zkušebních tělesech intaktních hornin z lokality HÚ by však měla být provedena všechna následující stanovení fyzikálně – mechanických vlastností (FMV) hornin:

mechanické vlastnosti:

- stanovení pevnosti v prostém tlaku („uniaxial compressive strength“), modulu přetvárnosti („deformation modulus“) a Poissonova čísla („Poisson ratio“) při standardním způsobu zatěžování, popřípadě stanovení meze crack initiation stress [MPa] a crack damage stress [MPa]
- studium způsobu porušování hornin při zkoušce pevnosti v prostém tlaku,
- stanovení pevnosti v prostém tlaku a modulu přetvárnosti a elasticity při cyklickém způsobu zatěžování („cyclic loading“),
- stanovení pevnosti v příčném tahu tzv. brazilskou zkouškou („Brazilian test“),
- stanovení pevnosti v prostém tahu („direct tensile strength“),
- stanovení pevnosti ve stříhu (smyku) („shear strength“),
- stanovení pevnosti horniny za trojosého stavu napjatosti („triaxial strength“) a konstrukce pevnostní obálky („failure envelope“) podle Hoek-Brownova kritéria porušení („Hoek-Brown“ failure criterion),

plynopropustnost:

- stanovení plynopropustnosti při různých plášťových tlacích („gas permeability“).

další charakteristiky:

- stanovení abrazivnosti horniny,
- stanovení měrné a objemové hmotnosti horniny,
- stanovení rychlosti průchodu podélných ultrazvukových vln („ultrasonic wave velocity“).

FMV hornin budou stanoveny na zkušebních tělíscích připravených z vrtných jader. Testování vlastností bude soustředěno na předpokládanou hloubkovou úroveň hlubinného úložiště, tj. interval 400–600 m od ústí vrtu. V tomto úseku se předpokládá odběr horniny po 50 metrech, tj. ve staničeních 400 m, 450 m, 500 m, 550 m a 600 m. Ve strukturních vrtech se navíc předpokládají odběry v hloubkových úrovních např. 700 m a 900 m. Kromě testování fyzikálně-mechanických a geotechnických vlastností v těchto pevně definovaných hloubkových úrovních budou totožné materiálové vlastnosti stanoveny rovněž u každého základního petrografického typu, zastiženého vrtnými pracemi.

V následujícím textu je pak uveden detailnější popis metodik jednotlivých stanovení a jejich přínos pro proces průzkumu lokality pro hlubinné úložiště a hodnocení její vhodnosti.

Vliv na bezpečnost:

Horniny vykazující nízké pevnostní charakteristiky, případně další kvalitativně horší geomechanické parametry, mohou způsobit problémy v etapě výstavby, provozu, i pozdější dlouhodobé stability HÚ po jeho uzavření. Kombinací špatných geomechanických vlastností s dalšími faktory (nevhodná orientace nebo rozměry výrubu, přítomnost křehkých struktur nebo zvodnění, změny napěťového pole apod.) by mohlo dojít ke spuštění mechanických procesů (např. plastických nebo křehkých deformací), které by následně ovlivňovaly stabilitu úložiště, integritu inženýrských bariér a hydraulické i transportní procesy.

Dostupná data:

Laboratorní stanovení geomechanických parametrů intaktních vzorků hornin má úzkou vazbu na provedení vrtných prací a následný odběr vzorků z vrtných jader. Laboratorní stanovení

musí být provedeno na intaktních vzorcích hornin, které neobsahují makroskopicky výrazné trhliny a jiná porušení a reprezentují hlavní petrografické typy hornin zastižené na lokalitě. Taková data nebyla dosud na žádné z lokalit moderními metodami sebrána. Využití archivních vrtných jader by mohlo být problematické kvůli jejich dlouhodobému odlehčení a případné další degradaci za podmínek ne zcela vhodného skladování (např. porušení vlivem mrazu a/nebo vlhkosti). Dosud zpracované vzorky (souhrny z jednotlivých lokalit uvádí např. Havlová et al. 2018 a,b,c,d) byly z převážné části odebrány z povrchových výchozů nebo lomů, a získané hodnoty geomechanických vlastností mají tedy omezenou vypovídací hodnotu ve vztahu k vlastnostem daných hornin v hloubce plánovaného HÚ cca 500 m pod zemským povrchem. Data publikovaná v uvedených souhrnech indikují velký rozptyl hodnot (např. nejčastěji měřená pevnost v prostém tlaku pro hlavní zájmovou horninu HÚ – granitoidy a pararuly – dosahuje hodnot od 38 do 226 MPa, obvyklé hodnoty leží v rozmezí 140-160 MPa), který je velmi pravděpodobně daný navětráním významné části zpracovávaných vzorků.

Nejistoty:

Měření geomechanických parametrů intaktních vzorků hornin představuje metodicky relativně snazší způsob, jak získat geomechanickou charakteristiku hornin dané lokality. Je však nutné zdůraznit, že na rozdíl od intaktních vzorků se geomechanické parametry celkového horninového masivu na dané lokalitě mohou v prostoru výrazně měnit v závislosti na křehkém porušení horniny a obvykle nabývají hodnot výrazně horších, než poskytuje laboratorní měření intaktních vzorků, zejména vrtných jader.

Mezi možná rizika řešení problematiky stanovení geomechanických parametrů intaktních hornin je dále nutné zmínit problémy při zpracování horniny. Jedná se například o vysoké primární, resp. sekundární porušení horniny a nepříznivou vnitřní stavbu horniny, které mohou způsobit zvýšenou rozpadavost vrtného jádra.

Výše uvedené skutečnosti mohou způsobit problémy především při přípravě dostatečného počtu a požadované velikosti zkušebních těles pro jednotlivé testy. Mezi další možná rizika, která mohou ovlivnit kvalitu a extrapolovatelnost získaných geomechanických parametrů, lze zařadit poruchy technických zařízení, která se používají pro testování hornin.

Postupy a metodiky stanovení jednotlivých vlastností vychází z běžných technických norem (ČSN, EN, ISO), souboru metod doporučených International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering, případně z dalších relevantních předpisů a doporučení. Velikost laboratorních vzorků pro jednotlivá stanovení by proto měla být alespoň taková, že průměr zkušebního tělesa bude nejméně 10 x větší, než je velikost největšího zrna v hornině. Z hlediska velikosti zkušebních těles je však třeba upozornit na skutečnost, že v případě stanovení některých fyzikálních a mechanických vlastností (např. pevnosti v prostém tlaku) je rozměr vzorku jedním z faktorů ovlivňujících výslednou naměřenou hodnotu. Proto je nutno zvolenou velikost zkušebního tělesa v průběhu stanovení příslušné materiálové vlastnosti striktně zachovávat tak, aby byla rovněž zachována srovnatelnost získaných výsledků v rámci všech hodnocených vzorků.

Doporučení:

Pro významné snížení popsaných nejistot doporučujeme realizaci rozsáhlejších výzkumných prací včetně realizace hlubokých vrtů a následného odběru statisticky dostatečného množství horninových vzorků v mnoha hlubkových úrovních horninového masivu na pečlivě vybraných metrážích (homogenní reprezentativní hornina bez porušení křehkými strukturami, alteracemi

apod.). Dále doporučujeme in-situ geomechanické testy realizované přímo ve vrtech, pro zjištění míry korelace mezi parametry intaktních hornin a celkového horninového masivu.

Reference:

HAVLOVÁ V., PERTOLDOVÁ J., BUKOVSKÁ Z., HROCH T., ŠTĚDRÁ V., BAIER J., ŘÍHA J., ČERVINKA R. (2018a): Hodnocení vhodnosti lokality pro umístění úložiště VJP a RAO z hlediska dlouhodobé bezpečnosti – Lokalita Březový potok. SÚRAO TZ 276/2018. 121 s. MS SÚRAO.

HAVLOVÁ V., PERTOLDOVÁ J., BUKOVSKÁ Z., HROCH T., ŠTĚDRÁ V., UHLÍK J., ŘÍHA J., ČERVINKA R. (2018b): Hodnocení vhodnosti lokality pro umístění úložiště VJP a RAO z hlediska dlouhodobé bezpečnosti – Lokalita Horka. SÚRAO TZ 280/2018. 119 s. MS SÚRAO.

HAVLOVÁ V., PERTOLDOVÁ J., BUKOVSKÁ Z., BAIER J., HROCH T., ŠTĚDRÁ V., ŘÍHA J., ČERVINKA R. (2018c): Hodnocení vhodnosti lokality pro umístění úložiště VJP a RAO z hlediska dlouhodobé bezpečnosti – Lokalita Hrádek. SÚRAO TZ 281/2018. 124 s. MS SÚRAO.

HAVLOVÁ V., PERTOLDOVÁ J., HROCH T., ŠTĚDRÁ V., JANKOVEC J., ŘÍHA J., ČERVINKA R. (2018d): Hodnocení vhodnosti lokality pro umístění úložiště VJP a RAO z hlediska dlouhodobé bezpečnosti – Lokalita Temelín – jih (ETE–J). SÚRAO TZ 284/2018. 119 s. MS SÚRAO.

HAVLOVÁ V., ČERVINKA R., PERTOLDOVÁ J., BUKOVSKÁ Z., MIXA P., HROCH T., ŠTĚDRÁ V., MILICKÝ M., ŘÍHA J. (2018e): HIERARCHIE KRITÉRIÍ ČI INDIKÁTORŮ VHDNOSTI LOKALIT A ZPŮSOB HODNOCENÍ LOKALIT. SÚRAO TZ 285/2018. 80 s. MS SÚRAO.

HAVLOVÁ V., PERTOLDOVÁ J., HROCH T., ŠTĚDRÁ V., UHLÍK J., MILICKÝ M., GVOŽDÍK L., BUTOVIČ A., ZAHRADNÍK O., LAHODOVÁ Z., KRAJÍČEK L. (2020): Konkretizace kritérií a indikátorů pro účely porovnání potenciálních lokalit HÚ. - MS SURAO. TZ 492/2020, Praha.

MIXA P., FRANĚK J., RUKAVIČKOVÁ L., MILICKÝ M., SKÁCELOVÁ Z., HROCH T., TENENKO V., ŠPAČEK P., NOVOTNÝ J., BUKOVSKÁ Z., ČERNÍK M., DOBEŠ P., DONÁT A., HANÁK J., HANŽL P., HAVLOVÁ V., PRCHAL K., HRDLIČKOVÁ K., JELÉNEK J., JELÍNEK J., KONÍČEK P., KYCL P., LEXA O., PECINA V., PERTOLDOVÁ J., SEDLÁČEK J., SOUČEK K., STEINOVÁ J., SVOBODA J., ŠTRUPL V., ŠVAGERA O., VAVRO M., WACLAWIK P. (2018): Aktualizace a konkretizace projektu geologických prací na hypotetické lokalitě. – MS SÚRAO, TZ 390/2019, Praha.

ZIEGLER P. A., DĚZES P. (2007): Cenozoic uplift of Variscan Massifs in the Alpine foreland: Timing and controlling mechanisms. *Global and Planetary Change*, 58, 1–4, 237–269.

Vyhláška č. 378/2016 Sb., o umístění jaderného zařízení, ve znění pozdějších předpisů.

6.5 Geochemická charakteristika

6.5.1 Geochemické složení litologických typů

Popis:

Geochemická charakteristika zahrnuje chemické vlastnosti horninového prostředí stanovené na základě obsahu hlavních a stopových prvků ve všech důležitých litologických horninových typech. Tyto údaje mohou být podle potřeby doplněny chemickým složením hydrotermálně

alterovaných hornin, zvětralin, půdních profilů, sedimentů vodních toků a nádrží. Novým geochemickým odběrům předchází rešeršní kompilace z předchozích publikovaných i nepublikovaných prací včetně archivní data soustředěných v litogeochemické databázi ČGS (Gürtlerová et al. 1997). Odběr nových geochemických vzorků se realizuje na základě rozmístění a charakteru údajů v archivní dokumentaci a znalostí geologické stavby posuzovaného území. Geochemické složení litologických typů je výrazně ovlivněno stupněm petrografické homogenity horninového prostředí. Podle možností se proto odebírají vzorky, které co nejlépe reprezentují litologickou variabilitu posuzovaného území a jsou co nejméně porušené sekundárními procesy. V horninovém prostředí složeném z několika horninových typů vzorkujeme, pokud to situace dovolí, všechny přítomné horninové typy zvlášť. Kromě přesné lokalizace je pro verifikaci daného horninového typu užitečný výbrusový materiál. Petrografické zhodnocení geochemického vzorku má minimálně zahrnovat klasifikaci horniny a identifikaci hlavních, vedlejších a sekundárních minerálů. Podle § 18, odst. 2, písm. vyhl. č. 378/2016 Sb. je třeba posuzovat geochemické vlastnosti horninového prostředí, zejména s ohledem na zádržné vlastnosti horninového prostředí, chemické složení podzemní vody, redukční podmínky a obsah kyslíku. Hlavním geochemickým činitelem, jímž může horninové prostředí působit na inženýrské bariéry HÚ, je interakce hornin s podzemní vodou (díky tomu se může měnit pH, Eh, iontová síla, celkový obsah rozpuštěných látek, CO₂ apod.). Minoritní vliv je očekáván u nestabilních akcesorických minerálů horniny (např. pyrit) a u karbonátů (např. CO₂). Jedním z důležitých cílů geochemického popisu lokalit je vytvoření geochemického modelu lokalit, který umožní vyhodnotit kompatibilitu lokalit se systémem inženýrských bariér (Vokál et al. 2020). Horniny z dané lokality HÚ musí mít takové geochemické vlastnosti, které negativně neovlivní vlastní HÚ po dobu až několika milionů let. Za negativní ovlivnění je v tomto případě považováno zejména narušení inženýrských bariér HÚ (např. bentonitové těsnění ukládacích míst, zásypy všech přístupových prostor), které by mohlo vést k předčasnému selhání bezpečnostních funkcí těchto bariér (Havlová et al., 2020j). Geochemické vlastnosti hornin mohou ovlivnit procesy, které řídí migraci prvků (včetně radioaktivních) z úložiště do okolního prostředí a naopak. Při geochemické charakteristice horninového prostředí je nutné brát zřetel na alterační zóny, které, často představují významná transportní, sorpční a geomechanická oslabení horninového masívu a mají vliv na proudění podzemní vody. Všechny typy alterací vedou ke změnám mineralogického, někdy i chemického složení a změnám fyzikálních vlastností hornin.

Základní geochemické charakteristiky litologických typů můžeme stanovit na základě znalostí dat z jednotlivých hodnocených lokalit (Franěk et al. 2018 a Mixa et al. 2019). Na lokalitě Hrádek dominují granity moldanubického plutonického komplexu reprezentované řadou dílčích intruzí, které pronikají metamorfovanými horninami moldanubika. Granity jsou silně peraluminické a po stránce chemické poměrně homogenní. Na lokalitě Horka dominují metaluminické granitoidy (durbachity třebíčského plutonu) s vysokým obsahem K, U a Th. Také na lokalitě Březový Potok dominují metaluminické granitoidy (Blatenská suita středočeského plutonického komplexu) ve srovnání s předchozí lokalitou jsou však obsahy K, U a Th nižší. Na lokalitě ETE (Temelín) dominují vysoce metamorfované gřolské jednotky moldanubika, což jsou kyselé, peraluminické horniny. Z hlediska obsahu hlavních a stopových prvků se pro umístění hlubinného úložiště RAO jeví zmíněné horninové typy vhodné. Geochemická variabilita totiž výrazně koreluje s minerálním složením horniny. Jedná se zejména o přítomnost akcesorických sulfidů (hlavně pyrit) nebo o radioaktivní minerály, které se mohou rozpadat v důsledku metamiktizace nebo oxidace (allanit, uraninint). Posuzované horninové typy však obsahují poměrně málo sulfidů (nízké obsahy síry). Pokud jde

o radioaktivní prvky tam je situace poněkud složitější u durbachitů, kde bylo například zjištěno, že v důsledku zvětrávání může docházet k migraci U a Th (Buriánek et al. 2022). Chemické složení hornin ovlivňuje potenciální reaktivitu hornin vzájemně nebo při interakci s fluidy. Na základě složení hornin také může predikovat jejich chování během zvětrávání nebo při interakci s podzemní vodou. Nesmíme však také zapomínat, že chemické složení zároveň odráží i alterační procesy, které horninu postihly během jejího vývoje. Vyšší geochemická variabilita znamená složitější hodnocení bezpečnostních parametrů.

Vliv na bezpečnost:

Míra variability geochemického složení hlavních litologických typů ovlivňuje bezpečnost HÚ během provozu a po jeho uzavření jen velmi omezeně. Vyšší geochemická variabilita může negativně ovlivnit interakci horninového prostředí s podzemní vodou a znamená vyšší nejistoty v odhadu chování horninového masivu po uzavření HÚ. Geochemické složení hornin má v daných podmínkách vliv na interakci s migrujícími fluidy a ovlivňuje jejich chemické složení. Vhodné horninové prostředí může působit jako geochemická bariéra, naopak horniny s vysokým obsahem některých prvků negativně ovlivňují složení podzemních vod (například obsah síranů a chloridů), které mohou HÚ ohrozit. Vyšší obsahy radioaktivních prvků mohou ovlivnit celkovou produkci radiogenního tepla. Celkově však můžeme konstatovat, že přímý vliv geochemického složení litologických typů na bezpečnost HÚ je její relativně malý.

Dostupná data:

Přehled archivních geochemických dat je přehledně shrnutý ve zprávách, které doprovázejí detailní 3D geologické modely 7 lokalit (Franěk et al., 2018, z vybraných 4 lokalit se toto týká Horky, Hrádku a Březového potoka), a 3D geologický model ETE-Jih (Navrátilová a Noll, 2017). Data získaná v letech 2017-2019 díky novým geofyzikálním a geologickým výzkumům jsou pak pro všechny tyto 4 lokality shrnuta v rozsáhlé práci Mixy et al. (2019). Zároveň jsou všechny tyto podklady přehlednou a stručnější formou shrnuty ve zprávách týkajících se hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti (Havlová et al., 2020 a, e, f, g), a to včetně jejich interpretace z hlediska petrologického popisu složení jednotlivých litologických druhů v rámci daného horninového masivu.

Nejistoty:

Posouzení bezpečnosti HÚ představuje komplexní úlohu, která vyžaduje celou řadu vstupních dat zatížených různou mírou nejistoty. Při hodnocení lokalit je důležité identifikovat a kvantifikovat různé zdroje nejistot. V prostorovém kontextu horninového prostředí lze nejistotu interpretovat s ohledem na posuzovanou oblast, jako množství chybějící informace (Wellmann a Regenauer-Lieb 2012). Za současného stavu omezeného poznání horninového prostředí zájmových lokalit nelze nejistotu ve vztahu k jednotlivým geologickým indikátorům zodpovědně kvantifikovat. Proto byly nejistoty dosud popisovány expertním odhadem.

Ohledně geochemického složení litologických je nejistota spojená s lokalizací litologických přechodů, a s chemickou homogenitou hlavních litologických typů v hloubce. Konkrétně v magmatických horninách jsou nejistoty dány především přítomností mafických enkláv, xenolitů a variabilitou v obsazích světlých a tmavých minerálů. U vysoce metamorfovaných hornin je významnější nejistota dána přítomností chemicky odlišných těles metamorfovaných hornin (eklogity, amfibolity, ruly) uzavřených v dominantním horninovém typu. Poměrně důležitá je také přítomnost chemicky kontrastních žilných hornin, hydrotermálních žil a alterační zóny se sulfidickou nebo karbonátovou mineralizací. Před použitím archivních

geochemických dat je nutné posoudit jejich kvalitu, která závisí na přesném petrografickém zařazení horniny, kvalitním popisu alterací a typu použitých analytických metod (důležitá je zejména jejich mez detekce, chyba, spolehlivost stanovení a informace, zda jsou části analýzy všechny provedeny ve stejné laboratoři).

Doporučení:

Pro významné snížení popsaných nejistot doporučujeme realizaci povrchového vzorkování čerstvých i zvětralých geochemických vzorků hlavních horninových typů včetně geochemické charakteristiky typických půdních profilů, dále pak detailní vzorkování vrtných jader získaných z hlubokých vrtů.

Reference:

- BURIÁNEK, D., IVANOV, M., JANDERKOVÁ, J., PATZEL, M. (2022): Importance of accessory minerals for the vertical distribution of uranium and thorium in soil profiles: A case study of durbachite from the Třebíč Pluton (Czech Republic). CATENA 213, 106166.
- FRANĚK J., BUKOVSKÁ Z., BURIÁNEK D., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ B., GRUNDLOCH J., HOLEČEK J., JELÉNEK J., JELÍNEK J., KLOMÍNSKÝ J., KRYŠTOFOVÁ E., KUČERA R., KUNCEOVÁ E., KŮRKOVÁ I., NAHODILOVÁ R., PACHEROVÁ P., PERTOLDOVÁ J., PEŘESTÝ V., RUKAVIČKOVÁ L., SOEJONO I., ŠVAGERA O., VERNER K., ŽÁČEK V. (2018): Závěrečná zpráva 3D strukturně – geologické modely potenciálních lokalit HÚ. MS SÚRAO, TZ 229/2018, Praha, 594 str.
- GÜRTLEROVÁ, P. et al.(1997): Databáze analytických stanovení na mapách geochemické reaktivity hornin 1: 50 000: Litogeochemická databáze České geologické služby, Praha.
- HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., BAIER, J., MILICKÝ, M., POLÁK, M., BUKOVSKÁ, Z., ČERNÝ, M., DUŠEK, K., FIFERNOVÁ, M., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., HOLEČEK J., JELÉNEK, J., JANKOVEC, J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., KUNCEOVÁ, E., PETYNIÁK, O., RAPPRIČH, V., RUKAVIČKOVÁ, L., SOEJONO, I., ŠVAGERA, O., UHLÍK, J., VOJTĚCHOVÁ, H., ŽÁČKOVÁ, E. (2020a): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Březový potok. MS SÚRAO, TZ 447/2020, 62 str.
- HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., JANKOVEC, J., UHLÍK, J., ČERNÝ, M., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., BAIER, J., DUŠEK, K., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., HEJTMÁNKOVÁ, P., HOLEČEK J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., MILICKÝ, M., NAHODILOVÁ, R., PACHEROVÁ, P., PETYNIÁK, O., PEŘESTÝ, V., RAPPRIČH, V., ŘIHOŠEK, J., RUKAVIČKOVÁ, L., ŠVAGERA, O., POLÁK, M., VOJTĚCHOVÁ, H., ŽÁČKOVÁ, E. (2020e): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Janoch (ETE-jih). MS SÚRAO, TZ 451/2020, 63 str.
- HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., UHLÍK, J., JANKOVEC, J., MILICKÝ, M., BAIER, J., BURIÁNEK, D., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ, B., DUŠEK, K., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., GRUNDLOCH, J., HOLEČEK J., JELÉNEK, J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., KUNCEOVÁ, E., PETYNIÁK, O., POLÁK, M., RAPPRIČH, V., RUKAVIČKOVÁ, L., ŠVAGERA, O., VOJTĚCHOVÁ, H. (2020f): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Horka. MS SÚRAO, TZ 452/2020, 63 str.
- HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., BAIER, J., MILICKÝ, M., BUKOVSKÁ, Z., ČERNÝ, M., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ, B., DUŠEK, K., FRANĚK, J., GVOŽDÍK,

- L., HOLEČEK J., JANKOVEC, J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., KUNCEOVÁ, E., PETYNIÁK, O., POLÁK, M., RAPPRIČH, V., RUKAVIČKOVÁ, L., ŠVAGERA, O., URÍK, J., VOJTĚCHOVÁ, H., ŽÁČKOVÁ, E. (2020g): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Hrádek. MS SÚRAO, 453/2020, 63 str.
- HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., UHLÍK, J., MILICKÝ, M., GVOŽDÍK, L., BUTOVIČ, A., ZAHRADNÍK, O., LAHODOVÁ, Z., KRAJÍČEK, L. (2020j): Konkretizace kritérií a indikátorů pro účely porovnání potenciálních lokalit HÚ. 72 s. MS SÚRAO, TZ 492/2020
- MIXA P., SKÁCELOVÁ Z., PERTOLDOVÁ J., BUKOVSKÁ Z., BURIÁNEK D., DUDÍKOVÁ B., FRANĚK J., HRDLIČKOVÁ K., JELÍNEK J., NAHODILOVÁ R., SOEJONO I., VERNER K., ŽÁČEK V. (2019): Shrnutí výsledků geologických a geofyzikálních výzkumných prací provedených v období 9/2017–6/2019 pro aktualizaci hodnocení potenciálních lokalit hlubinného úložiště RAO. MS SÚRAO, TZ 412/2019, Praha, 427 str.
- NAVRÁTILOVÁ V., NOL O., KAŠPAR R., LANČA D., MIŠUREC J., NEDVĚD J., RAJCHL M., SOSNA K., ŠINDELÁŘ M., TLAMSA J., VOJTĚCHOVSKÁ A. (2017): Zpráva o provedení geologicko-výzkumných prací na lokalitě ETE-jih. Závěrečná zpráva, MS SÚRAO, 280 str.
- WELLMANN F., REGENAUER-LIEB K. (2012): Uncertainties have a meaning: Information entropy as a quality measure for 3-D geological models. Tectonophysics. 526-529. 207-216. 10.1016/j.tecto.2011.05.001.
- VOKÁL A., VONDROVIC L., HAUSMANNOVÁ L., DOHNÁLKOVÁ M., HANUSOVÁ I., AUGUSTA J., KONOPÁČOVÁ K., URÍK J., KOVÁČIK M., VENCL M., POPELOVÁ E., LAHODOVÁ Z., MIKLÁŠ O., MÁČELOVÁ M., SUD J. (2020): Střednědobý plán výzkumu a vývoje SÚRAO pro období 2020-2030. – MS SÚRAO, TZ 525/2020, Praha.
- Vyhláška č. 378/2016 Sb., o umístění jaderného zařízení, ve znění pozdějších předpisů.

6.5.2 Přítomnost akcesorických minerálů nestabilních v libovolném okamžiku sledovaného vývoje prostředí HÚ

Popis:

Prostorová distribuce akcesorických minerálů může ovlivnit odolnost horniny vůči zvětrávání a hydrotermální alteraci. V rámci studia horninového prostředí je nutné posuzovat distribuci, procentuální zastoupení a mikrochemismus jednotlivých akcesorických minerálních fází. Z hlediska akcesorických minerálů nestabilních v libovolném okamžiku sledovaného vývoje je důležitá především znalost obsahu karbonátů, sulfidů a radioaktivních minerálů. Tyto tři skupiny minerálů jsou nejvíce náchylné k rozpouštění a desintegraci. Sulfidy (např. pyrit, pyrhotin, chalkopyrit) jsou především náchylné k oxidaci, což vede k uvolňování kovů a snižování hodnoty pH u podzemní vody. Vyšší kyselost podzemní vody může především negativně působit na inženýrské bariéry HÚ. Interakce podzemní vody s karbonáty (např. kalcit, dolomit, ankerit) ovlivňuje pH, celkový obsah rozpuštěných látek a obsah CO₂. Radioaktivní minerály (např. uraninit, thorit, zirkon) podléhají metamiktizaci, což vede ke vzniku řady sekundárních fází. Metamiktizace je proces, při kterém dochází k rozpadu krystalové mřížky v důsledku bombardování alfa částicemi, jež se uvolňují rozpadem radioaktivních prvků. V pozdějších stádiích metamiktizace může docházet redistribuce a odnosu některých prvků. Znalost mineralogického složení akcesorických minerálů je klíčem

k porozumění procesům, které probíhají při interakci mezi horninou a podzemními vodami. Posuzování prostorové distribuce litologických typů je dáno vyhl. č. 378/2016 Sb. § 18 bod 2e) jako jeden z nezávislých parametrů při hodnocení reologických vlastností a homogenity horninového prostředí. Zastoupení akcesorických minerálů v hlavních horninových lze přibližně stanovit ze znalosti dat z jednotlivých hodnocených lokalit (Franěk et al. 2018 a Mixa et al. 2019). Ve výběru lokality pro umístění hlubinného úložiště figurují granitoidy (granity typu Čeřínek a Eisgarn – lokalita Hrádek; melasyenity až melagranity (durbachit) třebíčského plutonu – lokality Horka a granodiority červenského a blatenského typu – lokalita Březový potok). Většina těchto hornin obsahuje podobnou asociaci akcesorických minerálů. Především tmavé minerály často uzavírají hojné inkluze akcesorických minerálů (např. apatit, zirkon). Charakteristickými akcesorickými minerály granitu typu Čeřínek a Eisgarn jsou andalusit, ilmenit, apatit, zirkon a monazit (Havlová et al., 2020g). Z akcesorických minerálů v durbachitech třebíčského plutonu je běžný hlavně apatit, dále zirkon, allanit, někdy je přítomen titanit, magnetit, pyrotin, vzácně též thorit a uraninit (Havlová et al., 2020f). Biotitický granodiorit s amfibolem blatenského typu obsahuje apatit, zirkon, allanit, epidot, pyrotin a pyrit (Havlová et al., 2020a). Vysoce metamorfované migmatitizované biotitické a sillimanit-biotitické ruly obsahují akcesorické minerály jako granát, zirkon, muskovit, titanit, monazit, apatit, titanit, pyrit, ilmenit (Havlová et al., 2020e).

Vliv na bezpečnost:

Prostorová distribuce akcesorických minerálů může ovlivnit bezpečnost HÚ až po jeho uzavření. Jedná se zejména o interakci těchto minerálů (hlavně sulfidů) s podzemní vodou a jejich rozpad v důsledku metamiktizace. Určitý vliv může mít především přítomnost akcesorických sulfidů (např. pyrotin a pyrit v granodioritech blatenského typu) vzhledem k nízkému obsahu těchto akcesorických minerálů ve většině posuzovaných hornin však, předpokládáme jen malý vliv na složení důlních vod. Sulfidy se ve větším množství mohou vyskytovat v pestrých metamorfních vložkách (vápenatosilikátové horniny) a v bazických enklávách (gabra a diority). Obě zmíněné horninové litologie jsou však na popisovaných lokalitách zastoupeny minoritně. Tyto procesy mohou ovlivnit celkovou pevnost horninového masivu a mohou působit na inženýrské bariéry HÚ v důsledku interakce hornin s podzemní vodou a zní vyplývající změny jejich vlastností (pH, Eh, iontová síla, celkový obsah rozpuštěných látek a CO₂). Vyšší obsahy radioaktivních minerálů také mohou ovlivnit celkovou produkci radiogenního tepla.

Dostupná data:

Rozsáhlý soubor archivních geovědních zpráv a map je přehledně shrnutý ve zprávách, které doprovázejí detailní 3D geologické modely 7 lokalit (Franěk et al., 2018, z vybraných 4 lokalit se toto týká Horky, Hrádku a Březového potoka), a 3D geologický model ETE-Jih (Navrátilová a Noll, 2017). Data získaná v letech 2017-2019 díky novým geofyzikálním a geologickým výzkumům jsou pak pro všechny tyto 4 lokality shrnuta v rozsáhlé práci Mixy et al. (2019). Zároveň jsou všechny tyto podklady přehlednou a stručnější formou shrnuty ve zprávách týkajících se hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti (Havlová et al., 2020 a, e, f, g), a to včetně jejich interpretace ve smyslu prostorové distribuce litologických typů v horninovém masívu.

Nejistoty:

Posouzení bezpečnosti HÚ představuje komplexní úlohu, která vyžaduje celou řadu vstupní dat zatížených různou mírou nejistoty. V prostorovém kontextu horninového prostředí lze nejistotu interpretovat s ohledem na posuzovanou oblast, jako množství chybějící informace (Wellmann a Regenauer-Lieb 2012). Při hodnocení lokalit je důležité identifikovat a kvantifikovat různé zdroje nejistot. Za současného stavu omezeného poznání horninového prostředí zájmových lokalit nelze nejistotu ve vztahu k jednotlivým geologickým indikátorům zodpovědně kvantifikovat. Proto jsou nejistoty popsány expertním odhadem.

Nejistota ve vztahu k distribuci akcesorických minerálů v jednotlivých horninových typech je poměrně nízká. Určitá nejistota vyplývá i z hloubkového dosahu zájmových horninových masivů a neznalosti přesného tvaru a rozsahu jednotlivých horninových těles. Nejistota ve vztahu k homogenitě granitoidních masivů je dána neznalostí možného výskytu těchto xenolitů, enkláv a žil v hloubce. V prostředí tvořeného metamorfovanými horninami spočívá v neznalosti výskytu pestrých horninových vložek v hloubce (jedná se zejména o vápenato-silikátové horniny, které mohou obsahovat vyšší zastoupení sulfidů).

Doporučení:

Pro významné snížení popsaných nejistot doporučujeme realizaci detailního mineralogického studia všech hlavních litologických typů včetně studia petrografické a mineralogické variability hlubokých vrtů.

Reference:

- FRANĚK J., BUKOVSKÁ Z., BURIÁNEK D., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ B., GRUNDLOCH J., HOLEČEK J., JELÉNEK J., JELÍNEK J., KLOMÍNSKÝ J., KRYŠTOFOVÁ E., KUČERA R., KUNCEOVÁ E., KŮRKOVÁ I., NAHODILOVÁ R., PACHEROVÁ P., PERTOLDOVÁ J., PEŘESTÝ V., RUKAVIČKOVÁ L., SOEJONO I., ŠVAGERA O., VERNER K., ŽÁČEK V. (2018): Závěrečná zpráva 3D strukturně – geologické modely potenciálních lokalit HÚ. MS SÚRAO, TZ 229/2018, Praha, 594 str.
- HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., BAIER, J., MILICKÝ, M., POLÁK, M., BUKOVSKÁ, Z., ČERNÝ, M., DUŠEK, K., FIFERNOVÁ, M., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., HOLEČEK J., JELÉNEK, J., JANKOVEC, J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., KUNCEOVÁ, E., PETYNYIAK, O., RAPPRIK, V., RUKAVIČKOVÁ, L., SOEJONO, I., ŠVAGERA, O., UHLÍK, J., VOJTĚCHOVÁ, H., ŽÁČKOVÁ, E. (2020a): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Březový potok. MS SÚRAO, TZ 447/2020, 62 str.
- HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., JANKOVEC, J., UHLÍK, J., ČERNÝ, M., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., BAIER, J., DUŠEK, K., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., HEJTMÁNKOVÁ, P., HOLEČEK J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., MILICKÝ, M., NAHODILOVÁ, R., PACHEROVÁ, P., PETYNYIAK, O., PEŘESTÝ, V., RAPPRIK, V., ŘIHOŠEK, J., RUKAVIČKOVÁ, L., ŠVAGERA, O., POLÁK, M., VOJTĚCHOVÁ, H., ŽÁČKOVÁ, E. (2020e): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Janoch (ETE-jih). MS SÚRAO, TZ 451/2020, 63 str.
- HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., UHLÍK, J., JANKOVEC, J., MILICKÝ, M., BAIER, J., BURIÁNEK, D., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ, B., DUŠEK, K., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., GRUNDLOCH, J., HOLEČEK J., JELÉNEK, J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., KUNCEOVÁ, E., PETYNYIAK, O., POLÁK, M., RAPPRIK, V., RUKAVIČKOVÁ, L., ŠVAGERA, O.,

- VOJTĚCHOVÁ, H. (2020f): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Horka. MS SÚRAO, TZ 452/2020, 63 str.
- HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., BAIER, J., MILICKÝ, M., BUKOVSKÁ, Z., ČERNÝ, M., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ, B., DUŠEK, K., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., HOLEČEK J., JANKOVEC, J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., KUNCEOVÁ, E., PETYNYIAK, O., POLÁK, M., RAPPRIK, V., RUKAVIČKOVÁ, L., ŠVAGERA, O., URÍK, J., VOJTĚCHOVÁ, H., ŽÁČKOVÁ, E. (2020g): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Hrádek. MS SÚRAO, 453/2020, 63 str.
- MIXA P., SKÁCELOVÁ Z., PERTOLDOVÁ J., BUKOVSKÁ Z., BURIÁNEK D., DUDÍKOVÁ B., FRANĚK J., HRDLIČKOVÁ K., JELÍNEK J., NAHODILOVÁ R., SOEJONO I., VERNER K., ŽÁČEK V. (2019): Shrnutí výsledků geologických a geofyzikálních výzkumných prací provedených v období 9/2017–6/2019 pro aktualizaci hodnocení potenciálních lokalit hlubinného úložiště RAO. MS SÚRAO, TZ 412/2019, Praha, 427 str.
- NAVRÁTILOVÁ V., NOL O., KAŠPAR R., LANČA D., MIŠUREC J., NEDVĚD J., RAJCHL M., SOSNA K., ŠINDELÁŘ M., TLAMSA J., VOJTĚCHOVSKÁ A. (2017): Zpráva o provedení geologicko-výzkumných prací na lokalitě ETE-jih. Závěrečná zpráva, MS SÚRAO, 280 str.
- WELLMANN F., REGENAUER-LIEB K. (2012): Uncertainties have a meaning: Information entropy as a quality measure for 3-D geological models. *Tectonophysics*. 526-529. 207-216. 10.1016/j.tecto.2011.05.001.

Vyhláška č. 378/2016 Sb., o umístění jaderného zařízení, ve znění pozdějších předpisů.

6.5.3 Charakter horninového prostředí vlivem exogenních jevů (charakter regolitu)

Popis:

Regolit představuje přípovrchovou vrstvu horninového prostředí, která má charakter nezpevněného materiálu (zemín) vzniklé zvětráváním, případně následným přemístěním a uložením.

Zvětrávání představuje mechanické a chemické změny hornin a minerálů v důsledku interakce horninového prostředí s povrchovými činiteli (atmosféra, biosféra). Dochází tak k přizpůsobení horninového materiálu povrchovým podmínkám, které jsou odlišné od podmínek, ve kterých dané horniny vznikají (tlak, teplota, přítomnost vody). Jsou dva hlavní typy zvětrávání: i) mechanické spočívající v desintegraci a mechanickém rozpadu horniny na menší částice, aniž by docházelo ke změnám v chemickém složení materiálu, a ii) chemické zvětrávání, při kterém dochází jak k fyzikálním, tak chemickým změnám vlastností v důsledku rozpouštění, oxidace, redukce, hydratace, karbonizace a dalších chemické procesy. Mechanické zvětrávání převažuje především v aridním podmínkách s výraznými teplotními rozdíly, rozdíly v insolaci a v oblastech s poklesem teploty pod bod mrazu. Chemické zvětrávání je spojené s teplým klimatem s dostatkem srážek. K zvětrávání také přispívá činnost organismů, kdy dochází jak k mechanickému rozrušování (např. kořenovými systémy rostlin) tak k pedogenezi. V podmínkách Českého Masivu lze obecně konstatovat, že produkty chemického zvětrávání jsou spjata s obdobím mezozoika a terciéru, kdy zde převažovalo teplé klima, mechanické je spjata s obdobím glaciálů v průběhu kvartéru.

Kvartérní pokryv zahrnuje zpravidla nezpevněné siliciklastické sedimenty vznikající uložením erodovaného materiálu (zpravidla zvětralých hornin) na akumulčních formách povrchu (úpatní části svahů, říční nivy, výplavové kužele apod.). Eroze a transport zvětralin probíhá prostřednictvím činitelů působících na zemském povrchu (voda, vítr, led, gravitace).

V podmínkách Českého masivu se vyskytují produkty jak mechanického, tak chemického zvětrávání. Nejsouvislejší výskyty zvětralinového pláště lze očekávat na starších částech povrchu (například peneplenizované povrchy, sedla v blízkosti rozvodí), nejnižší zachování je pak v erozním povrchu, např. ve svazích podél vodních toků. V případě kvartérních sedimentů jsou nejsouvislejší výskyty kvartérního pokryvu v akumulčních oblastech podél velkých říčních toků (terasové systémy).

Většina lokalit hlubinného uložení RAO jsou umístěny v denudačních oblastech Českého Masivu ve středních či vyšších partiích povodí nebo blízkosti rozvodí vodních toků. Tyto oblasti jsou charakteristické nízkým stupněm zachování kvartérního pokryvu. Fluviální a splachové sedimenty jsou vázány výhradně na většinou úzké nivy vodních toků, případně mělké úzké deprese a mocnosti kvartéru dosahují většinou 2 m. Sedimenty plošně rozsáhlých říčních teras nejsou v těchto oblastech zachovány. Svahové sedimenty mají charakter většinou drobných výskytů v úpatních částech svahů s velmi proměnlivými mocnostmi, v řádu prvních metrů. Významnější výskyty blokových svahových sedimentů lze očekávat pouze v oblastech mrazově rozvolněných skalních výchozů, pod nimiž jsou uchována kamenná moře v podobě blokových proudů. Tyto oblasti jsou vázány především na nadmořské výšky cca 600 m.n.m. a výše. Další genetické typy kvartérních akumulací (organické nebo eolické sedimenty) jsou v těchto oblastech zastoupeny velmi okrajově.

Mocnosti zvětralinového a kvartéru pláště se pohybují zpravidla v řádech prvních metrů, pouze lokálně v případě přítomnosti fosilních zvětralin (produktů chemického zvětrávání z předkvartérního období) mohou nabývat mocností až prvních desítek metrů. Jejich mocnost také lokálně vzrůstá v oblastech vyššího stupně tektonického porušení hornin, kde tyto zóny mohou představovat struktury s významnou hydrogeologickou funkcí.

Charakter zvětralin se odvíjí od charakteru mateřské horniny a typu zvětrávání. Obecně lze konstatovat, že na horninách s vyšším podílem stabilních minerálů (granitoidy, ortoruly) vznikají zvětralinové písečité až hrubě písečitého charakteru, zatímco na většině metamorfovaných hornin (fylity, svory, pararuly, migmatity) vznikají zvětralinové jemnozrnnějšího písečito jílovitého charakteru. Na většině lokalit hlubinného uložení RAO mají výskyty zvětralin lokální, plošně omezený charakter s výraznými změnami mocnosti zvětralinového pláště. Na lokalitě Janoch charakteristické plochým peneplenizovaným povrchem je zastoupení zvětralin především pararul a migmatitů vyšší. Z archivních vrtných dat vyplývá poměrně časté zachování předkvartérních zvětralin i pod relikty sedimentárního terciéru na periférii jihočeských pánví.

Produkty mrazového zvětrávání jsou vázány především na výše položené partie lokalit. Mají charakter rozvolněných skalních masivů, mrazových srubů, skalních torů a v rozvinutém stádiu mohou tyto produkty tvořit kamenná moře. Nejvýraznější povrchové projevy se nacházejí v blízkosti vrcholů tvořené kompetentními horninami jako jsou granity, ortoruly, případně některé typy migmatitů. Tyto projevy mrazového zvětrávání jsou patrné zejména na lokalitě Hrádek v oblasti Čeřínu.

Vzhledem ke skutečnosti, že lokality jsou umístěny ve vyšších částech povodí denudační oblasti Českého masivu, je zastoupení nezpevněných kvarterních sedimentů omezené, vázané především na nivy vodních toků a úpatní části svahů. Vyšší zastoupení výskytu nezpevněných sedimentů vykazuje lokalita Janoch (ETE-Jih) (Navrátilová et al. 2017), kde je třeba brát v úvahu přítomnost erozních reliktních výplně jihočeských pánví, se zachovanými nezpevněnými sedimenty křídového a terciárního stáří (štěrk, písky, jíly a diatomity). Sled těchto nezpevněných hornin často převyšuje mocnosti v řádu desítek metrů.

Vliv na bezpečnost:

Přítomnost a charakter regolitu má vliv zejména geomechanické, chemické a hydrogeologické parametry lokalit. Proto regolit může ovlivnit celkové fyzikální a chemické vlastnosti v okolí uložště. Regolit tvořící přípovrchovou zónu tvoří mělký průlinový kolektor a zároveň zónu, jejímž prostřednictvím dochází k vsaku povrchových vod do hlubšího oběhu. Přítomnost regolitu může tak ovlivnit bezpečnost uložště změnou separace nebo délek transportních cest mezi uložštěm a povrchem (biosférou). Také může dojít k ovlivnění charakteru a rozložení environmentálních receptorů včetně biosféry, pokud by radionuklidy nebo jiné kontaminanty opustily uložště.

Dostupná data:

Rozsahy kvarterního pokryvu jsou zobrazeny v základních geologických mapách 1:50 000, případně v mapách měřítko 1:25 000:

<https://mapy.geology.cz/geocr25/>

<https://mapy.geology.cz/geocr50/>

Tato data poskytují základní informace o původu a litologické charakteristice kvarterního pokryvu, avšak neposkytuje konkrétní informace o mocnostech kvarterních akumulací. Informace ve stručné a souhrnné formě jsou v textových vysvětlivkách příslušných map. Informace o charakteru zvětrávání a přítomnosti zvětralin nejsou často v mapových podkladech zahrnuty.

Dalším zdrojem o charakteru kvartéru a charakteru zvětralin, s konkrétní mocností jsou uvedeny v archivu zpráv a dokumentace archivních vrtů ČGS:

<http://www.geology.cz/extranet/sluzby/archivy/archiv-geofond>

Tyto informace se vztahují ke konkrétní, často úzce vymezené lokalitě a data jsou často závislá na účelu pořízení. Obecně lze říct, že u hlubších, např. strukturních vrtů nejsou informacím o regolitu v takové míře detailu jako u technických prací pořízených za účelem inženýrskogeologického průzkumu.

Kvarterní pokryv byl mapován a popsán v rámci provedených geofyzikálních prací (Mixa et al. 2019), základní charakteristika kvarterního pokryvu či regolitu je také ve velmi stručné formě zpracována ve zprávách týkajících se hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti (Havlová et al., 2020 a, e, f, g).

Nejistoty:

Nejistoty týkající se přítomnosti a charakteru regolitu vyplývají zejména z omezeného odkrytí terénu a velmi rozdílné kvality a dostupnosti archivních dat. Zejména v případě zvětralin je

velmi obtížné na základě povrchových dat odhadnout rozsah a geometrii zvětralých horizontů. Velkou nejistotou jsou mocnosti regolitu. Hodnoty hloubky kvarterního pokryvu a zvětrávání jsou obecně velmi variabilní z výraznými rozdíly na krátké vzdálenosti a lze je ověřit pouze technickými pracemi. Tato nejistota vzrůstá zejména mimo zastavěná území a koridory významných liniové staveb, kde archivní data téměř chybí.

Doporučení:

Pro významné snížení výše zmíněných nejistot doporučujeme realizaci rozsáhlejších průzkumných prací zahrnující podrobného geologického mapování povrchu, realizace mělkých průzkumných vrtů a geofyzikálních prací.

Reference:

- HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., BAIER, J., MILICKÝ, M., POLÁK, M., BUKOVSKÁ, Z., ČERNÝ, M., DUŠEK, K., FIFERNOVÁ, M., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., HOLEČEK J., JELÉNEK, J., JANKOVEC, J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., KUNCEOVÁ, E., PETYNYIAK, O., RAPPRICH, V., RUKAVIČKOVÁ, L., SOEJONO, I., ŠVAGERA, O., UHLÍK, J., VOJTĚCHOVÁ, H., ŽÁČKOVÁ, E. (2020a): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Březový potok. MS SÚRAO, TZ 447/2020, 62 str.
- HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., JANKOVEC, J., UHLÍK, J., ČERNÝ, M., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., BAIER, J., DUŠEK, K., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., HEJTMÁNKOVÁ, P., HOLEČEK J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., MILICKÝ, M., NAHODILOVÁ, R., PACHEROVÁ, P., PETYNYIAK, O., PEŘESTÝ, V., RAPPRICH, V., ŘIHOŠEK, J., RUKAVIČKOVÁ, L., ŠVAGERA, O., POLÁK, M., VOJTĚCHOVÁ, H., ŽÁČKOVÁ, E. (2020e): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Janoch (ETE-jih). MS SÚRAO, TZ 451/2020, 63 str.
- HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., UHLÍK, J., JANKOVEC, J., MILICKÝ, M., BAIER, J., BURIÁNEK, D., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ, B., DUŠEK, K., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., GRUNDLOCH, J., HOLEČEK J., JELÉNEK, J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., KUNCEOVÁ, E., PETYNYIAK, O., POLÁK, M., RAPPRICH, V., RUKAVIČKOVÁ, L., ŠVAGERA, O., VOJTĚCHOVÁ, H. (2020f): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Horka. MS SÚRAO, TZ 452/2020, 63 str.
- HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., BAIER, J., MILICKÝ, M., BUKOVSKÁ, Z., ČERNÝ, M., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ, B., DUŠEK, K., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., HOLEČEK J., JANKOVEC, J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., KUNCEOVÁ, E., PETYNYIAK, O., POLÁK, M., RAPPRICH, V., RUKAVIČKOVÁ, L., ŠVAGERA, O., URÍK, J., VOJTĚCHOVÁ, H., ŽÁČKOVÁ, E. (2020g): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Hrádek. MS SÚRAO, 453/2020, 63 str.
- NAVRÁTILOVÁ V., NOL O., KAŠPAR R., LANČA D., MIŠUREC J., NEDVĚD J., RAJCHL M., SOSNA K., ŠINDELÁŘ M., TLAMSA J., VOJTĚCHOVSKÁ A. (2017): Zpráva o provedení geologicko-výzkumných prací na lokalitě ETE-jih. Závěrečná zpráva, MS SÚRAO, 280 str.

6.5.4 Alterace hornin vlivem endogenního původu (hydrotermální a pneumatolitická alterace minerálů a hornin, včetně okolí křehkých struktur)

Popis:

Při výzkumu zejména epigenetických minerálních ložisek bylo zjištěno, že horniny ve stěnách ložisek jsou působením různě teplých a různě mineralizovaných roztoků velmi přeměněné. Nápadné jsou zejména změna barvy, pórovitosti, propustnosti a textur (Schwartz 1959). Změny v mineralogii jsou složité, někdy může dojít pouze k rekrystalizaci primárních minerálů. Počet minerálů a minerálních skupin vznikajících při hydrotermální alteraci se pohybuje kolem sta; mezi nejčastější patří sericit, křemen, chlorit, sulfidy, epidot, alunit, pyrofylit, zeolity, jílové minerály, kalcit a další karbonáty. Chemické složení hornin a hydrotermálních roztoků (fluid) tvoří chemické systémy extrémní složitosti. Nejčastějšími fluidy hydrotermálních systémů jsou voda, S, CO₂, B, F, další prvky náchylné k mobilizaci jsou zejména Si (SiO₂), K, Na, Ca a Mg; podrobně např. Schwartz (1959). Konkrétní alterace hornin na jednotlivých kandidátních lokalitách HÚ vlivem endogenního původu, tj. zjištěná nebo pravděpodobná hydrotermální alterace hornin nebo jednotlivých minerálů, včetně alterací v okolí křehkých struktur, vyplývají z jejich předchozích hodnocení (Franěk et al. 2018 a Mixa et al. 2019). Alterace hornin a minerálů mají pro posouzení horninového prostředí specifický význam, protože mohou představovat nebo představují zjištěné nebo potenciální nehomogenity s přímou vazbou na hodnocení homogenity a reologických vlastností horninového prostředí. Přitom se tyto nehomogenity mohou vyskytovat i v rámci jednoho litologického typu (Mixa et al. 2019, Franěk et al. 2018). Z toho vyplývá, že výskyt alterací hornin a minerálů, včetně alterací kolem zlomů, může být faktorem snižujícím homogenitu horninového prostředí a při hodnocení je třeba s ním počítat.

Je však třeba posuzovat odděleně alteraci spojenou se zlomy nebo ložiskovými projevy (obvykle jde o málo rozsáhlou, ale intenzívní alteraci) a penetrativní nízkoteplotní hydrotermální alteraci spojenou s pozdně magmatickými nebo retrográdními metamorfními procesy, která je obvykle velkého rozsahu, ale slabé nebo velmi slabé intenzity. Zatímco alterace spjaté se zlomy nebo s projevy mineralizace jsou na lokalitách správně vyhodnoceny, slabé regionální hydrotermální pozdně magmatické nebo pozdně metamorfní alterace, jako jsou například sericitizace živců, chloritizace biotitu nebo pinitizace cordieritu, jsou nesprávně dávány do souvislosti s běžným povrchovým zvětráváním nebo chybně nazývány „přípovrchové alterace“ (srov. Havlová et al. 2018 a-d, Mixa et al. 2019). Minerály jako chlorit či sericit však při zvětrávání nevznikají a jsou produktem nízkoteplotních hydrotermálních procesů (viz např. Wilson 2004).

Na kandidátních lokalitách HÚ mohou být místy na zlomech pozorovány hydrotermální alterace, nejčastěji v podobě jílové výplně a limonitizace. Také podél dislokací mohou být přítomné alterace, jako je chloritizace, sericitizace, kaolinizace, hematitizace a limonitizace. Některé křehké tektonické poruchy mohou být vyplněny mladší hydrotermální mineralizací, především jde o křemenné žíly, někdy s krystaly křemene, méně často pak karbonátové žíly (např. na lokalitě Horka, Mixa et al. 2019). Žíly křemene mohou tvořit i žilník, který stmeluje úlomky kataklazových hornin. Žíly mohou být ojediněle doprovázeny i vtroušenými rudními minerály, zejména pyritem, chalkopyritem, sfaleritem a hematitem, případně sekundárním malachitem. Při vyšší koncentraci sulfidů pak můžeme hovořit o slabé polymetalické mineralizaci. Křemenné žíly jsou někdy protínány mladšími karbonátovými žilkami, obvykle

bez sulfidů. Běžně se zejména v metamorfitech mohou vyskytovat čočky sekrečního křemene. Křemenné úlomky nacházené na tektonických liniích jsou často povlečené oxidy Fe a Mn.

Vliv na bezpečnost:

Prostorová distribuce alterací ovlivňuje bezpečnost HÚ v době výstavby, během provozu i po jeho uzavření. Téměř všudypřítomná slabá penetrativní hydrotermální alterace horninových masivů byla zjištěna na všech zájmových lokalitách. Její vliv je však, vzhledem ke slabé intenzitě, malý až zanedbatelný

Druhý, z hlediska bezpečnosti významnější typ alterace je vázán do okolí křehkých zlomových struktur a může mít vliv na homogenitu prostředí. Na lokalitách lze očekávat zlomy s doprovodnou kataklázou až mylonitizací, se sekundární jílovou výplní, případně s doprovodnými alteracemi typu chloritizace, kaolinizace, sericitizace, limonitizace a křemenné žíly, ojediněle se slabým polymetalickým zrudněním, méně často pak karbonátové žilky.

Dostupná data:

Rozsáhlý soubor archivních zpráv a map je přehledně shrnutý ve zprávách, které doprovázejí detailní 3D geologické modely 7 lokalit (Franěk et al., 2018, z vybraných 4 lokalit se toto týká Horky, Hrádku a Březového potoka), a 3D geologický model ETE-Jih (Navrátilová a Noll 2017). Data získaná v letech 2017-2019 díky novým geofyzikálním a geologickým výzkumům jsou pak pro všechny tyto 4 lokality shrnuta v rozsáhlé práci Mixy et al. (2019).

Zároveň jsou všechny tyto podklady přehlednou a stručnější formou shrnuty ve zprávách týkajících se hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti (Havlová et al. 2020 a, e, f, g) a to včetně jejich interpretace ve smyslu prostorové distribuce a typů alterací v horninovém masívu.

Nejistoty:

Nejistota spojená s vlivem hydrotermální a pneumatolitické alterace hornin spočívá především v neznalosti rozsahu a míře těchto přeměn v hloubce jakéhokoliv masívu. Zároveň je velmi obtížné identifikovat míru alterace v okolí křehkých struktur. Určitá nejistota vyplývá i z neznalosti jak hloubkového dosahu zájmových horninových masivů, tak i přesného tvaru a rozsahu jednotlivých horninových těles.

Doporučení:

Pro významné snížení popsaných nejistot doporučujeme mineralogický výzkum vybraných vzorků z realizovaných vrtných prací.

Reference:

BENEŠ V., BELOV T., JIRKŮ J., BUNEŠ J., BÁRTA J. (2019): Ověření geologických struktur lokality Hrádek geofyzikálními metodami. Závěrečná zpráva. MS SÚRAO, TZ 435/2019, 76 str.

FRANĚK J., BUKOVSKÁ Z., BURIÁNEK D., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ B., GRUNDLOCH J., HOLEČEK J., JELÉNEK J., JELÍNEK J., KLOMÍNSKÝ J., KRYŠTOFOVÁ E., KUČERA R., KUNCEOVÁ E., KŮRKOVÁ I., NAHODILOVÁ R., PACHEROVÁ P., PERTOLDOVÁ J., PEŘESTÝ V., RUKAVIČKOVÁ L., SOEJONO I., ŠVAGERA O., VERNER K., ŽÁČEK V. (2018): Závěrečná zpráva 3D strukturně – geologické modely potenciálních lokalit HÚ. MS SÚRAO, TZ 229/2018, Praha, 594 str.

- FRANĚK J., BUKOVSKÁ Z., ČEJCHANOVÁ A., JELÉNEK J., MLČOCH B., PERTOLDOVÁ J., SKÁCELOVÁ Z., SOEJONO I., ŠVAGERA O., VERNER K., MILICKÝ M., BARTÁŠKOVÁ L. (2015): Regionální 3D strukturně geologický model lokality Horka. Technická zpráva MS SÚRAO Praha.
- HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., BAIER, J., MILICKÝ, M., POLÁK, M., BUKOVSKÁ, Z., ČERNÝ, M., DUŠEK, K., FIFERNOVÁ, M., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., HOLEČEK J., JELÉNEK, J., JANKOVEC, J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., KUNCEOVÁ, E., PETYNIÁK, O., RAPPRIČH, V., RUKAVIČKOVÁ, L., SOEJONO, I., ŠVAGERA, O., UHLÍK, J., VOJTĚCHOVÁ, H., ŽÁČKOVÁ, E. (2020a): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Březový potok. MS SÚRAO, TZ 447/2020, 62 str.
- HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., JANKOVEC, J., UHLÍK, J., ČERNÝ, M., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., BAIER, J., DUŠEK, K., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., HEJTMÁNKOVÁ, P., HOLEČEK J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., MILICKÝ, M., NAHODILOVÁ, R., PACHEROVÁ, P., PETYNIÁK, O., PEŘESTÝ, V., RAPPRIČH, V., ŘIHOŠEK, J., RUKAVIČKOVÁ, L., ŠVAGERA, O., POLÁK, M., VOJTĚCHOVÁ, H., ŽÁČKOVÁ, E. (2020e): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Janoch (ETE-jih). MS SÚRAO, TZ 451/2020, 63 str.
- HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., UHLÍK, J., JANKOVEC, J., MILICKÝ, M., BAIER, J., BURIÁNEK, D., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ, B., DUŠEK, K., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., GRUNDLOCH, J., HOLEČEK J., JELÉNEK, J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., KUNCEOVÁ, E., PETYNIÁK, O., POLÁK, M., RAPPRIČH, V., RUKAVIČKOVÁ, L., ŠVAGERA, O., VOJTĚCHOVÁ, H. (2020f): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Horka. MS SÚRAO, TZ 452/2020, 63 str.
- HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., BAIER, J., MILICKÝ, M., BUKOVSKÁ, Z., ČERNÝ, M., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ, B., DUŠEK, K., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., HOLEČEK J., JANKOVEC, J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., KUNCEOVÁ, E., PETYNIÁK, O., POLÁK, M., RAPPRIČH, V., RUKAVIČKOVÁ, L., ŠVAGERA, O., URÍK, J., VOJTĚCHOVÁ, H., ŽÁČKOVÁ, E. (2020g): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Hrádek. MS SÚRAO, 453/2020, 63 str.
- MIXA P., SKÁCELOVÁ Z., PERTOLDOVÁ J., BUKOVSKÁ Z., BURIÁNEK D., DUDÍKOVÁ B., FRANĚK J., HRDLIČKOVÁ K., JELÍNEK J., NAHODILOVÁ R., SOEJONO I., VERNER K., ŽÁČEK V. (2019): Shrnutí výsledků geologických a geofyzikálních výzkumných prací provedených v období 9/2017–6/2019 pro aktualizaci hodnocení potenciálních lokalit hlubinného úložiště RAO. MS SÚRAO, TZ 412/2019, Praha, 427 str.
- NAVRÁTILOVÁ V., NOL O., KAŠPAR R., LANČA D., MIŠUREC J., NEDVĚD J., RAJCHL M., SOSNA K., ŠINDELÁŘ M., TLAMSA J., VOJTĚCHOVSKÁ A. (2017): Zpráva o provedení geologicko-výzkumných prací na lokalitě ETE-jih. Závěrečná zpráva, MS SÚRAO, 280 str.
- SCHWARTZ G. M. (1959): Hydrothermal alteration. *Economic Geology* 54, 2, 161–183
- ŠVAGERA O., BUKOVSKÁ Z., ČEJCHANOVÁ A., FRANĚK J., JELÉNEK J., MLČOCH B., PERTOLDOVÁ J., SKÁCELOVÁ Z., SOEJONO I., VERNER K., MILICKÝ M., BARTÁŠKOVÁ L. (2016): Regionální 3D strukturně geologický model lokality Březový potok. Technická zpráva MS SÚRAO, Praha.

WELLMANN F., REGENAUER-LIEB K. (2012): Uncertainties have a meaning: Information entropy as a quality measure for 3-D geological models. *Tectonophysics*. 526-529. 207–216. 10.1016/j.tecto.2011.05.001.

WILSON M. J. (2004): Weathering of the primary rock-forming minerals. – *Clay Minerals* 39, 233–266.

Vyhláška č. 378/2016 Sb., o umístění jaderného zařízení, ve znění pozdějších předpisů.

6.6 Hydrogeologické vlastnosti

6.6.1 Tlakové poměry proudění

Popis:

Hydraulické procesy v geosféře (za které lze v širším slova smyslu považovat transport hmoty, tepla nebo radioaktivity prostřednictvím kapaliny, ale také dílčí procesy hydrogeologického cyklu jako jsou například drenáž a infiltrace podzemní vody nebo přetékání mezi dílčími hydrogeologickými tělesy) jsou spojeny s přítomností a prouděním podzemní vody. Důsledkem distribuce hydraulického tlaku – tlakových poměrů – v horninovém prostředí je proces proudění podzemní vody. Ve vyhlášce č. 378/2016 Sb. §3 je “oběh podzemní vody” jednou s posuzovaných přírodních vlastností území k umístění jaderného zařízení. Proudění podzemní vody lze popsat prostředky hydromechaniky zjednodušenými pro geologické prostředí. Ve všech typech prostředí (nesaturovaném i saturovaném, porézním i puklinovém) je proces proudění tekutin (kapalin a plynů) řízen na základě principu vzrůstu střední rychlosti proudění (objemové hustoty toku) s klesajícím hydraulickým odporem a rostoucím hydraulickým gradientem.

Podmínkou pro proudění podzemní vody v saturovaném geologickém prostředí je existence hydraulického gradientu. Hydraulický gradient mezi dvěma body ekvipotenciálního pole je dán rozdílem hydraulických výšek (úrovně hladiny podzemní vody) v těchto bodech. Velikost hydraulické výšky je definována jako součet geodetické a tlakové výšky. Ve specifickém prostředí krystalinických hornin českého masivu jsou obecně velikosti hydraulických gradientů vlivem výraznější členitosti terénu značné.

Tlakové podmínky proudění podzemní vody, ke kterému potenciálně dochází v prostoru HÚ, jsou dány především rozdílem úrovně hladiny podzemní vody v infiltrační oblasti a úrovně hladiny v drenážní bázi. V kandidátních lokalitách vybraných pro realizaci HÚ lze obecně předpokládat standardní vertikální vývoj tlakového pole, kdy v infiltračních oblastech převládá sestupné proudění (po vertikále dochází s hloubkou k poklesu hydraulické výšky) a v oblastech drenáže převládá vzestupné proudění (po vertikále dochází s hloubkou k nárůstu hydraulické výšky). Potenciální lokality pro realizaci HÚ jsou lokalizovány v oblastech hydrogeologického masivu, který má v podmínkách českého masivu morfometrický charakter členitých pahorkatin až členitých vrchovin (tzn. výškovou členitost 75 až 300 m). Distribuci hydraulických tlaků v horninovém prostředí dále ovlivňují hydraulické odporové parametry prostředí.

Tlakové poměry se v důsledku vývoje přírodních podmínek lokality nebo antropogenních zásahů v čase vyvíjí. Nejvýznamnější změnou je období realizace a provozu HÚ. HÚ představuje relativně rozsáhlé důlní dílo, ze kterého bude v období jeho budování a provozu

odčerpávána podzemní voda. Při tomto procesu se prostory HÚ stanou umělou drenážní bází, kde hydraulická výška bude dána pouze nadmořskou výškou HÚ (ve vytěžených prostorách bude atmosférický tlak). V období po uzavření HÚ lze předpokládat opětovné ustálení tlakových poměrů, které budou generelně shodné s obdobím před zahájením budování úložiště. Kromě změn související s budováním a provozem HÚ ovlivní tlakové poměry proudění širší lokality HÚ procesy a události související s vývojem podmínek vlivem geologických procesů, klimatických změn, ale i činností člověka. Tyto změny jsou popsány v samostatných kapitolách.

Komplexní analýza tlakových poměrů v oblasti potenciálně ovlivněné realizací HÚ je možná s využitím nástrojů hydrogeologického modelování. Matematické modely zpracované v regionálním měřítku umožňují s přijatelnou mírou schematizace přírodních podmínek (podloženou detailními studiemi) poskytnout přehled o aktuálním stavu i budoucím vývoji hydraulického tlakového pole v třídimenzionální doméně zájmové oblasti (viz odstavec Dostupná data).

Vliv na bezpečnost:

Tlakové poměry proudění představují z hlediska bezpečnostní funkce geologické bariéry významný faktor. Ekvipotenciální tlakové pole definující hydraulický gradient v každém bodě geologické bariéry ovlivňuje směr a rychlost proudění podzemní vody, a tedy i hmotovou bilanci kapalného média a transport případných kontaminantů. Z hlediska vyšší účinnosti geologické bariéry je vhodné, aby přirozený hydraulický gradient lokality byl v počátečních podmínkách provozu i následném období dlouhodobého uzavření HÚ co nejnižší. Vhodné je situovat HÚ do oblasti s převládajícím sestupným prouděním. V obou případech lze předpokládat prodloužení doby zdržení potenciálního kontaminantu v horninovém prostředí a snížení rizika průniku kontaminace do biosféry.

Dostupná data:

Celkový hydraulický gradient lokality HÚ je daný úrovní infiltrace a drenáže podzemní vody. Oblasti infiltrace a drenáže byly, při současné úrovni znalostí z kandidátních lokalit, stanoveny pomocí hydrogeologických matematických modelů realizovaných v průběhu zužování počtu kandidátních lokalit HÚ z 9 na 4. Tyto informace jsou pro kandidátní lokality přehledně uvedeny v Havlová et al., 2020 a, e, f, g. Metodika zpracování matematických modelů je uvedena v Uhlík et al., 2018. Modely byla popsána prostorová distribuce tlakových poměrů v širším okolí homogenních horninových bloků, zvolených jako možné hostitelské prostředí HÚ. Popis geometrie, parametrů a výsledků aktuálních modelů proudění podzemní vody v jednotlivých lokalitách je uveden v pasportech modelů (Baier et al., 2020a, b; Jankovec et al. 2020 a Uhlík et al., 2020).

Nejistoty:

Tlakové poměry proudění v lokalitě HÚ lze komplexně popsat pomocí matematického modelu proudění podzemní vody. Nejistota vypočteného tlakového pole souvisí s nedostatkem kvalitních vstupních a kalibračních dat modelu. V současnosti nejsou k dispozici téměř žádné informace o odporových parametrech a zvodnění horninového prostředí kandidátních lokalit z hloubek pod vodohospodářsky využitelnou přípovrchovou vrstvou. Další nejistoty plynou z nedostatečné znalosti hydrologického režimu a režimu proudění podzemní vody (prozatím není realizován periodický hydrogeologický monitoring lokalit). Řada parametrů, které jsou

nezbytné pro výpočet tlakového pole, je tak v současnosti zadávána na základě kvalifikovaného odhadu a analogie s jinými průzkumnými lokalitami.

Pro snížení nejistoty výsledků a tím i snížení rizik neočekávaného vývoje při realizaci úložiště je třeba doplnit dosavadní informace o výsledky z hloubkového geologického a hydrogeologického průzkumu a režimního hydrologického a hydrogeologického monitoringu.

Reference:

VONDROVIC ET AL. (2019): Metodika zúžení počtu lokalit pro hlubinné úložiště v ČR v letech 2019-2020. – MS SÚRAO, TZ 423/2019

UHLÍK J., ČERNÝ M., BAIER J., MILICKÝ M., POLÁK M., GVOŽDÍK L., KRÁLOVCOVÁ J., GRECKÁ M., RUKAVIČKOVÁ L. (2018): Detailní hydrogeologické modely lokalit. – MS SÚRAO, TZ 323/2018, Praha.

HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., BAIER, J., MILICKÝ, M., POLÁK, M., BUKOVSKÁ, Z., ČERNÝ, M., DUŠEK, K., FIFERNOVÁ, M., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., HOLEČEK J., JELÉNEK, J., JANKOVEC, J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., KUNCEOVÁ, E., PETYNIÁK, O., RAPPRIČH, V., RUKAVIČKOVÁ, L., SOEJONO, I., ŠVAGERA, O., UHLÍK, J., VOJTĚCHOVÁ, H., ŽÁČKOVÁ, E. (2020a): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Březový potok. MS SÚRAO, TZ 447/2020, 62 str.

HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., JANKOVEC, J., UHLÍK, J., ČERNÝ, M., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., BAIER, J., DUŠEK, K., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., HEJTMÁNKOVÁ, P., HOLEČEK J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., MILICKÝ, M., NAHODILOVÁ, R., PACHEROVÁ, P., PETYNIÁK, O., PEŘESTÝ, V., RAPPRIČH, V., ŘIHOŠEK, J., RUKAVIČKOVÁ, L., ŠVAGERA, O., POLÁK, M., VOJTĚCHOVÁ, H., ŽÁČKOVÁ, E. (2020e): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Janoch (ETE-jih). MS SÚRAO, TZ 451/2020, 63 str.

HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., UHLÍK, J., JANKOVEC, J., MILICKÝ, M., BAIER, J., BURIÁNEK, D., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ, B., DUŠEK, K., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., GRUNDLOCH, J., HOLEČEK J., JELÉNEK, J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., KUNCEOVÁ, E., PETYNIÁK, O., POLÁK, M., RAPPRIČH, V., RUKAVIČKOVÁ, L., ŠVAGERA, O., VOJTĚCHOVÁ, H. (2020f): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Horka. MS SÚRAO, TZ 452/2020, 63 str.

HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., BAIER, J., MILICKÝ, M., BUKOVSKÁ, Z., ČERNÝ, M., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ, B., DUŠEK, K., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., HOLEČEK J., JANKOVEC, J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., KUNCEOVÁ, E., PETYNIÁK, O., POLÁK, M., RAPPRIČH, V., RUKAVIČKOVÁ, L., ŠVAGERA, O., URÍK, J., VOJTĚCHOVÁ, H., ŽÁČKOVÁ, E. (2020g): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Hrádek. MS SÚRAO, 453/2020, 63 str.

BAIER, J., JANKOVEC, J., ČERNÝ, M., GVOŽDÍK, L., MILICKÝ, M., POLÁK, M., UHLÍK, J. (2020a): hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště, pasport aktualizovaného detailního modelu – lokalita Březový potok, MS SÚRAO, TZ 470/2020, 26 STR.

BAIER, J., JANKOVEC, J., ČERNÝ, M., GVOŽDÍK, L., MILICKÝ, M., POLÁK, M., UHLÍK, J. (2020b): hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště, pasport aktualizovaného detailního modelu – lokalita Hrádek, MS SÚRAO, TZ 469/2020, 25 STR.

JANKOVEC, J., BAIER, J., ČERNÝ, M., GVOŽDÍK, L., MILICKÝ, M., POLÁK, M., UHLÍK, J. (2020): hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště, pasport aktualizovaného detailního modelu – lokalita ETE-JIH, MS SÚRAO, TZ 474/2020, 24 STR.

UHLÍK, J., GVOŽDÍK, L., BAIER, J., MILICKÝ, M., JANKOVEC, J., POLÁK, M. (2020): hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště, pasport aktualizovaného detailního modelu – lokalita Horka, MS SÚRAO, TZ 476/2020, 25 STR.

6.6.2 Propustnost horninového prostředí

Popis:

Propustnost horninového prostředí obecně ovlivňuje možnost existence “významných útvarů” podzemních vod, což by spolu s rizikem jejich “trvalého znečištění radioaktivní látkou” mohlo vést k zákazu umístění jaderného zařízení (vyhláška č. 378/216 Sb. §8). Je proto jedním z důležitých faktorů při posouzení bezpečnosti HÚ.

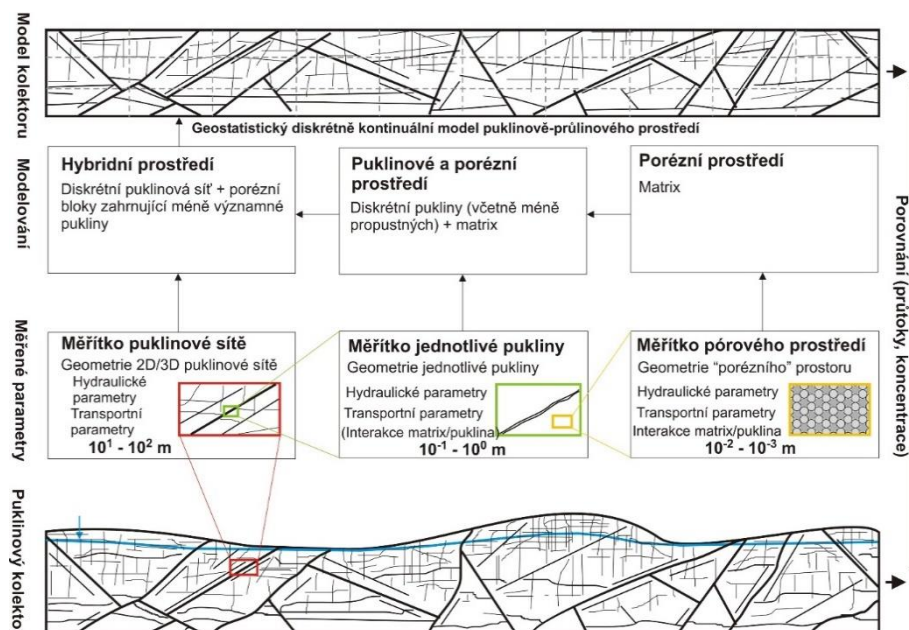
Propustnost horninového prostředí (odporové parametry horninového prostředí) ovlivňuje tlakové poměry, spolu s morfologií a úrovní drenážních bází, v rámci třídídimenzionálního prostoru lokality. Heterogenita odporových parametrů je v horninovém prostředí hydrogeologického masivu více než litologií dána stupněm rozpukání. Distribuce hydraulického tlaku (úrovně hladiny podzemní vody) v nehomogenním anizotropním horninovém prostředí je závislá na propustnosti, kterou lze popsat tenzorem třetího řádu. V regionálním měřítku kandidátní lokality HÚ lze vymezit dílčí podoblasti podle charakteru a typu hydraulické propustnosti:

- podoblast ovlivněná procesy přípovrchového zvětrání – mocnost zóny průměrně dosahuje vyšší desítky metrů a obvykle má kombinovanou průlinovo-puklinovou propustnost, přecházející do propustnosti puklinové, v tomto horizontu obvykle bývá vyvinuta zvodeň;
- podoblast přirozeně rozpukaného masivu s rozevřením hydraulicky vodivých puklin v řádu vyšších desítek či stovek μm , střední vzdálenost puklinových systémů je předpokládána řádově v metrech, mezilehlé bloky se na proudění podzemní vody prakticky nepodílí;
- podoblast tektonických deformačních zón (pásma intenzivního rozpukání podél zlomových linií) s kombinovanou propustností a lokálním zvodněním.

Analýza procesu proudění podzemní vody ve výrazně anizotropním nehomogenním prostředí je obecně velmi složitá. Jako účinný nástroj k analýze může sloužit hydrogeologický matematický model (s koncepty CPM, ECPM nebo DFN), ve kterém je na základě fyzikálních vztahů numerickou metodou respektující geometrii prostředí vypočteno hydraulické tlakové pole. Komponenty horninového prostředí a možnosti jejich koncepčního popisu ve smyslu odporových parametrů pro potřebu jejich kvantifikace v matematických modelech jsou schematicky zobrazeny na Obr. 6.

V regionálním měřítku lze s propustností pracovat ve smyslu ekvivalentního kontinua (koncept, předpokládající ekvivalentní výskyt všech komponent prostředí v každém bodě) a definovat ji pro vodu koeficientem hydraulické vodivosti $K(z)$ [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]. Při zachování velikosti

objemové hustoty toku má vyšší hydraulická vodivost za následek snížení hydraulického gradientu.



Obr. 6 Idealizovaný model konceptualizace prostředí hydrogeologického masivu

Parametr hydraulické vodivosti je závislý na typu propustnosti v lokální části geologické bariéry a na hloubce pod povrchem. V přípovrchové horizontu potenciálních lokalit je pod lokálně vyvinutým kolektorem kvartérů a eluvia desítky metrů (až do 120 m v granitických horninách) mocný kolektor svrchní rozpučené části masivu. Vodivost tohoto kolektoru, na který je vázána hlubší ze dvou dílčích zvodní, které jsou pro český masiv typické, je obvykle v rozmezí tří řádů od 10^{-7} po 10^{-5} $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. I v tomto kolektoru platí, že koeficient hydraulické vodivosti obecně klesá s hloubkou.

V hlubších částech masivu, mimo poruchové deformační zóny, je propustnost závislá na hydraulickém rozevření a konektivitě sítě diskrétních puklin. Toto prostředí lze v regionálním měřítku konceptuálně rovněž popsat parametrem hydraulické vodivosti, přičemž jeho hodnota a prostorová variabilita by měla být zdůvodnitelná daty z hydrogeologického vrtného průzkumu, hydraulických testů a následných modelových analýz, které zohledňují skutečnou geometrii a charakter proudění v tomto prostředí. Řadou prací bylo ověřeno, že hodnota hydraulické vodivosti masivu klesá s hloubkou pod terénem. Pokles lze následně vypočítat pomocí empirických vzorců, jejichž parametry jsou modifikovány podle litotypů vyskytujících se na konkrétní lokalitě a dostupných dat z hydrogeologického průzkumu (např. vzorec z práce Gustafson et Liedholm - 1989).

Fyzikálně přesnějším, ale výpočetně i datově náročnějším přístupem k modelování proudění v puklinovém kolektoru, je diskrétní popis vlastností, tedy koncept diskrétní puklinové sítě. V případě proudění podzemní vody jednotlivou puklinou je řídicím parametrem definujícím hydraulický odpor velikost rozevření pukliny (respektive transmisivita nebo hydraulická vodivost pukliny). Rozevření pukliny není v ploše pukliny konstantní a může vykazovat značnou variabilitu. Kromě absolutní velikosti rozevření jsou pro proudění vody podstatné i další parametry, jako paralelnost a drsnost stěn pukliny. Parametr, který definuje efektivní rozevření vzhledem k proudění podzemní vody, se nazývá hydraulické rozevření. Elementární vztah mezi geometrickými a hydraulickými parametry modelového puklinového prostředí je

obvykle označován jako LCL (*lokální kubický zákon/Local Cubic Law*). Koncept LCL je založen na tzv. Hagen-Poiseuilleově rovnici:

$$q = b_h^3 \frac{\rho g}{12\mu} \frac{dh}{dx},$$

kde specifický průtok q puklinou, definovanou dvěma paralelními povrchy při jednotkové šířce pukliny (rozměr kolmý na rozevření a podélný rozměr pukliny), je přímo úměrný třetí mocnině hydraulického rozevření b_h a velikosti hydraulického gradientu dh/dx . Dalšími členy rovnice jsou objemová hmotnost vody ρ , dynamická viskozita vody μ a gravitační zrychlení g .

Vzájemný vztah mezi hydraulickými parametry při popisu proudění v puklinové zóně vycházejícího z kubického, respektive Darcyho zákona je:

$$T = \frac{\rho g b_h^3}{12\mu} = K B_h,$$

kde T je transmisivita pukliny [$m^2 \cdot s^{-1}$], K [$m \cdot s^{-1}$] koeficient hydraulické vodivosti puklinové zóny a B_h [m] její mocnost.

Systém propojených jednotlivých puklin, jejichž hydraulický odpor je dostatečně malý, aby se mohly při daném hydraulickém gradientu podílet na proudění podzemní vody, tvoří hydraulicky konektivní síť, která představuje v prostředí hydraulického masivu preferenční proudovou a transportní cestu. Konektivita puklinové sítě obecně klesá s hloubkou a vzdáleností od tektonických poruchových zón. Soubor konektivních puklin, schopných zprostředkovat proudění podzemní vody, se označuje jako perkolační klastr. Aby došlo k vytvoření perkolačního klastru propojujícího dvě konkrétní místa v masivu, musí dojít k překročení hodnoty tzv. perkolačního prahu. Hodnota perkolačního prahu pro konkrétní oblast horninového masivu je závislá na hustotě puklinové sítě, orientaci puklin a jejich hydraulickém rozevření. Lze předpokládat, že v projektované úrovni HÚ bude propustnost horninového prostředí mimo deformační zóny extrémně nízká, protože puklinová síť dosáhne (shora) hodnoty blízké perkolačnímu prahu (v tomto případě v oblasti mezi prostorem HÚ a hydraulicky vodivou deformační zónou komunikující s drenážní bází).

V puklinovém prostředí se budou vyskytovat i rozsáhlé oblasti – zlomové zóny, deformační zóny – s mnohem větší intenzitou rozpuštění než v okolní hornině. Zlomové zóny mohou mít mocnost desítek centimetrů až desítek metrů a mohou se táhnout v délce desítek metrů až mnoha kilometrů. Je pravděpodobné, že v rámci zlomové zóny existuje značná variabilita prostředí s rozdílnými hydraulickými vlastnostmi. Zlomové zóny mohou být dominantními cestami proudění podzemní vody. Hodnoty hydraulické vodivosti v oblastech poruchových zón, které mají dle vzniku a vývoje různou geometrii a charakter, lze v regionálním měřítku popsat jako směrově orientované zóny zvýšené hydraulické vodivosti. V dosavadních hydrogeologických analýzách potenciálních lokalit HÚ byly poruchové zóny na kandidátních lokalitách rozděleny na 3 třídy dle klasifikace SKB (Andersson et al., 2000) a jejich hydraulická vodivost byla stanovena odhadem. Jednotlivé kategorie zlomů mají vzhledem k rozdílné uvažované šířce (1, 10 a 100 m pro zlomy 3., 2., a 1. kategorie) rozdílný příspěvek k celkové propustnosti masivu.

Vliv na bezpečnost:

Odporové parametry (hydraulická propustnost) horninového prostředí ovlivňují tlakové poměry proudění. Bezprostředně ovlivňují bezpečnostní funkci geologické bariéry. Řada

kvantifikovatelných indikátorů zvolených v metodice hodnocení potenciálních lokalit HÚ (in Vondrovic a kol., 2019 - *Doba dotoku z HÚ do oblasti drenáže, Rychlost proudění v úrovni HÚ, propustnost v prostoru HÚ, Maximální propustnost poruchových zón a Specifický průtok v prostoru HÚ*) je závislá na propustnosti prostředí. V hloubce HÚ realizovaného v krystalinických horninách bude propustnost pouze puklinová. Hydraulické propojení prostoru HÚ s infiltračními a drenážními oblastmi na povrchu (tedy možností proudění vody) bude umožněno pouze v případě existence perkolačního klastru v puklinové síti. Odporové parametry puklinového prostředí mají tedy dominantní vliv na proudění podzemní vody v oblasti úložiště, a tedy i na transport potenciální kontaminace, anebo tepla.

Z hlediska maximální účinnosti geologické bariéry je vhodné, aby propustnost prostředí v hloubce HÚ byla po uzavření (a tedy i v iniciálním stavu lokality) co nejnižší, tedy aby bylo v maximální míře omezeno proudění podzemní vody, které by ohrožovalo stabilitu inženýrských bariér a umožnilo transport kontaminace z HÚ směrem do zóny biologických procesů. Vzhledem k předpokladu poklesu hydraulické vodivosti horninového masivu s hloubkou (vlivem uzavírání puklin a poklesu konektivity puklinové sítě) je pro bezpečnost klíčová rovněž vzdálenost HÚ od vodivých struktur představovaných deformačními tektonickými zónami. U významných deformačních zón a poruchových pásem lze předpokládat i v hloubce realizace HÚ řádově vyšší hydraulickou vodivost než v okolní hornině bez výrazného tektonického porušení. Čím větší je vzdálenost k potenciálně propustnějším zónám preferenčního proudění, tím vyšší je obecně předpokládána hodnota perkolačního prahu, která definuje hranici efektivního hydraulického propojení vodivé zóny s HÚ.

Dostupná data:

Jediným způsobem získání relevantních hydraulických parametrů hornin krystalinika a dílčích puklin a zlomů jsou hydraulické testy realizované v zájmové lokalitě a zájmové hloubce. Cílený výzkum zaměřený na získání hydraulických parametrů puklinového prostředí kandidátních lokalit zatím nebyl realizován. Dílčí práce zabývající se měřením a vyhodnocením hydraulických parametrů puklinového prostředí byly realizovány např. v projektu FR-T11/367 (Rukavičková et al. 2013) – stanovení hydraulické vodivosti pro 5 m úseky vrtů v granitických horninách do hloubky 100 m. Ve zprávě Komulainen et al. (2019) jsou dokumentovány výsledky měření transmisivity pro 2 m úseky ve vrtech Mel-1 a Mel-2 do hloubky 160 m. Měření bylo pro SÚRAO realizováno zařízením Posiva Flow Log (Rouhiainen a Sokolnicki 2005), které umožňuje detailní a systematické vyhodnocení hydraulických parametrů jednotlivých vodivých struktur ve vrtech. Hodnocením hydraulických parametrů puklin a puklinového prostředí v cca 70 m vrtech v PVP Bukov a studiem vzájemného propojení puklinové sítě se zabývá probíhající projekt „Výzkum puklinové konektivity v PVP Bukov“ (Zuna et al. 2021).

Hydraulické parametry puklinového prostředí (v podobě parametru hydraulické vodivosti), použité v aktuálních modelech proudění podzemní vody jednotlivých lokalit, jsou uvedeny v pasportech modelů (Baier et al. 2020a, b; Jankovec et al. 2020 a Uhlík et al. 2020). Hodnoty byly stanoveny expertním odhadem ČGS s nejistotou dva řády a do regionálních modelů byly zadány střední hodnoty zlogaritmovaného rozpětí hydraulické vodivosti (K_0). Hodnoty jsou homogenní pro daný horninový typ a anizotropní ve vertikálním směru (předpokládané snižování hodnoty K_0 s hloubkou). Obdobně expertním odhadem byly stanoveny hydraulické vodivosti poruchových zón (zlomy I. - III. kategorie dle klasifikace SKB; Andersson et al. 2000), stejně jako v případě masivu se hydraulická vodivost regionálních zlomů snižuje s hloubkou.

Nejistoty:

Propustnost horninového masivu je klíčovou veličinou pro analýzu režimu proudění podzemní vody v každé lokalitě. Zároveň ale patří k parametrům nejobtížněji měřitelným, obzvláště v hlubokých horizontech v prostředí hydrogeologického nehomogenního a anizotropního masivu. Prostorová distribuce propustnosti horninového masivu bude zatížena vysokou nejistotou i při provedení rozsáhlého vrtného průzkumu a kalibrace hodnot propustnosti pomocí modelu. V současnosti nejsou k dispozici téměř žádné informace o odporových parametrech a zvodnění horninového prostředí kandidátních lokalit z hloubek pod vodohospodářsky využitelnou přípovrchovou vrstvou.

Reference:

- VONDROVIC ET AL. (2019): Metodika zúžení počtu lokalit pro hlubinné úložiště v ČR v letech 2019-2020. – MS SÚRAO, TZ 423/2019
- UHLÍK J., ČERNÝ M., BAIER J., MILICKÝ M., POLÁK M., GVOŽDÍK L., KRÁLOVCOVÁ J., GRECKÁ M., RUKAVIČKOVÁ L. (2018): Detailní hydrogeologické modely lokalit. – MS SÚRAO, TZ 323/2018, Praha.
- HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., BAIER, J., MILICKÝ, M., POLÁK, M., BUKOVSKÁ, Z., ČERNÝ, M., DUŠEK, K., FIFERNOVÁ, M., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., HOLEČEK J., JELÉNEK, J., JANKOVEC, J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., KUNCEOVÁ, E., PETYNIÁK, O., RAPPRIČH, V., RUKAVIČKOVÁ, L., SOEJONO, I., ŠVAGERA, O., UHLÍK, J., VOJTĚCHOVÁ, H., ŽÁČKOVÁ, E. (2020a): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Březový potok. MS SÚRAO, TZ 447/2020, 62 str.
- HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., JANKOVEC, J., UHLÍK, J., ČERNÝ, M., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., BAIER, J., DUŠEK, K., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., HEJTMÁNKOVÁ, P., HOLEČEK J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., MILICKÝ, M., NAHODILOVÁ, R., PACHEROVÁ, P., PETYNIÁK, O., PEŘESTÝ, V., RAPPRIČH, V., ŘIHOŠEK, J., RUKAVIČKOVÁ, L., ŠVAGERA, O., POLÁK, M., VOJTĚCHOVÁ, H., ŽÁČKOVÁ, E. (2020e): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Janoch (ETE-jih). MS SÚRAO, TZ 451/2020, 63 str.
- HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., UHLÍK, J., JANKOVEC, J., MILICKÝ, M., BAIER, J., BURIÁNEK, D., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ, B., DUŠEK, K., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., GRUNDLOCH, J., HOLEČEK J., JELÉNEK, J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., KUNCEOVÁ, E., PETYNIÁK, O., POLÁK, M., RAPPRIČH, V., RUKAVIČKOVÁ, L., ŠVAGERA, O., VOJTĚCHOVÁ, H. (2020f): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Horka. MS SÚRAO, TZ 452/2020, 63 str.
- HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., BAIER, J., MILICKÝ, M., BUKOVSKÁ, Z., ČERNÝ, M., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ, B., DUŠEK, K., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., HOLEČEK J., JANKOVEC, J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., KUNCEOVÁ, E., PETYNIÁK, O., POLÁK, M., RAPPRIČH, V., RUKAVIČKOVÁ, L., ŠVAGERA, O., URÍK, J., VOJTĚCHOVÁ, H., ŽÁČKOVÁ, E. (2020g): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Hrádek. MS SÚRAO, 453/2020, 63 str.
- BAIER, J., JANKOVEC, J., ČERNÝ, M., GVOŽDÍK, L., MILICKÝ, M., POLÁK, M., UHLÍK, J. (2020a): hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště, pasport

aktualizovaného detailního modelu – lokalita Březový potok, MS SÚRAO, TZ 470/2020, 26 STR.

BAIER, J., JANKOVEC, J., ČERNÝ, M., GVOŽDÍK, L., MILICKÝ, M., POLÁK, M., UHLÍK, J. (2020b): hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště, pasport aktualizovaného detailního modelu – lokalita Hrádek, MS SÚRAO, TZ 469/2020, 25 STR.

JANKOVEC, J., BAIER, J., ČERNÝ, M., GVOŽDÍK, L., MILICKÝ, M., POLÁK, M., UHLÍK, J. (2020): hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště, pasport aktualizovaného detailního modelu – lokalita ETE-JIH, MS SÚRAO, TZ 474/2020, 24 STR.

UHLÍK, J., GVOŽDÍK, L., BAIER, J., MILICKÝ, M., JANKOVEC, J., POLÁK, M. (2020): hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště, pasport aktualizovaného detailního modelu – lokalita Horka, MS SÚRAO, TZ 476/2020, 25 STR.

6.6.3 Velikost proudění

Popis:

Jednu ze základních charakteristik zvodnělého horninového prostředí geologické bariéry představuje bilance proudění podzemní vody, kterou lze označit obecně jako velikost proudění nebo jako průtok (kvantifikace vzhledem ke geometricky definované ploše). Velikost proudění (průtok) je důsledkem rozložení hydraulického potenciálu proudění (FEP 6.6.1 Tlakové poměry proudění) a propustnosti horninového masivu (FEP 6.6.2 Propustnost horninového prostředí). Objemový průtok (Q_v , [m.s⁻³]) v horninovém prostředí je definován jako součin objemové hustoty toku v [m.s⁻¹] a velikosti průtočné plochy S [m²].

Protože podzemní vodu lze považovat za ideální nestlačitelnou kapalinu a proces proudění v nasycené zóně zjednodušeně za bezztrátový, platí pro uzavřenou hydrogeologickou strukturu (struktura bez výměny podzemní vody s okolím) rovnice kontinuity, tedy že celkové infiltrované množství za jednotku času se rovná celkovému drénovanému množství za jednotku času. Tato vodní bilance představuje celkový průtok geologickou strukturou. Celková velikost průtoku strukturou geologické bariéry HÚ je jedním z parametrů, který charakterizuje kandidátní lokality HÚ.

Celkový průtok hydrogeologickou strukturou je v heterogenních anizotropních podmínkách geologického prostředí a tlakového pole výrazně distribuovaný. Obecně je velikost proudění (tedy sumární průtok) výrazně větší ve svrchní části horninového prostředí, ve kterém je obvykle vyvinut hydrogeologický kolektor zóny zvětralin a rozpojení puklin. Pod touto zónou je intenzivnější proudění soustředěno převážně do oblastí poruchových pásem s výrazně vyšší hydraulickou vodivostí než okolní, málo porušená nebo zcela intaktní hornina. Z hlediska bezpečnosti HÚ ve smyslu potenciálního transportu kontaminace z jeho prostoru je vhodné, aby velikost proudění podzemní vody v úrovni úložiště byla co nejmenší. Kvantifikace velikosti proudění v prostoru HÚ je dosažena bilancováním průtoku zvolenou uzavřenou oblastí zahrnující HÚ a jeho bezprostřední okolí. Hodnota průtoku takovou oblastí je jedním z možných kritérií pro hodnocení potenciálních lokalit HÚ v souvislosti s posouzením území k umístění jaderného zařízení z hlediska "oběhu podzemní vody" dle vyhlášky č. 378/2016 Sb. §8).

Velikost proudění se v důsledku vývoje přírodních podmínek lokality nebo antropogenních zásahů v čase vyvíjí. Přirozené změny spjaté s vývojem klimatu jsou významněji patrné

v přípovrchovém kolektoru horninového prostředí, ve kterém se velikost průtoku mění se změnou velikosti zásob podzemní vody v návaznosti na aktuální srážkově-odtokový režim. Změny spjaté s vývojem klimatu jsou pozvolnější. Nejvýznamnější změnou ve vodní bilanci lokality HÚ bude období realizace a provozu HÚ. HÚ představuje rozsáhlé důlní dílo, ze kterého bude třeba čerpat podzemní vodu. Při tomto procesu se prostory HÚ stanou umělou drenážní bází, do které bude směřovat proudění podzemní vody z oblasti vytvořené hydraulické deprese. Velikost přítoku do úložiště v tomto období bude výrazně odlišná než velikost bilančního průtoku stejnou oblastí v iniciační fázi před zahájením stavby. V období po uzavření HÚ lze předpokládat opětovné ustálení tlakových poměrů a spolu s aplikací těsnících a výplňových materiálů v prostoru HÚ lze očekávat snížení průtoku. Kromě změn souvisejících s budováním a provozem HÚ mohou ovlivnit tlakové poměry proudění širší lokality HÚ geologické procesy a události, klimatické změny, ale i činnosti člověka. Tyto změny jsou pospány v samostatných kapitolách.

Komplexní analýza velikosti proudění podzemní vody v prostředí geologické bariéry kandidátních lokalit HÚ je možná s využitím nástrojů hydrogeologického modelování. Zpracování hydrogeologického modelu proudění podzemní vody je součástí požadavků na posouzení území k umístění jaderného zařízení podle vyhlášky č. 378/2016 Sb. Matematické modely zpracované v regionálním měřítku umožňují s přijatelnou mírou schematizace (podloženou detailními studiemi) poskytnout přehled o velikosti proudění v třídímní doméně zájmové oblasti a v omezené míře i stanovit velikost průtoku prostorem potenciálního HÚ před zahájením výstavby. Při dosavadních výzkumných pracích při výběru lokality HÚ byly používány hlavně simulační softwary využívající program MODFLOW, menší měrou pak CONNECTFLOW, FEFLOW a FLOW123D. Podrobné hydrogeologické modelové studie lokálního rozsahu omezené na podrobný popis oblasti bezprostředního okolí HÚ zatím nebyly realizovány.

Vliv na bezpečnost:

Velikost proudění v prostoru umístění HÚ je jeden z důležitých parametrů bezpečnosti lokality HÚ a byla jedním z indikátorů při zužování počtu kandidátních lokalit (Vondrovic a kol., 2019). Z hlediska vyšší účinnosti geologické bariéry je vhodné, aby velikost průtoku v hloubce a přímo v oblasti HÚ byla nízká a hostitelské prostředí tak neposkytovalo dostatek media pro destrukci inženýrských bariér a transport potenciální kontaminace v roztoku. Velikost proudění v přípovrchové části geologické bariéry má pak vliv na ředění potenciálního kontaminačního mraku z prostředí HÚ před vstupem do biosféry.

Dostupná data:

Bilance podzemní vody kandidátních lokalit a velikosti proudění v jednotlivých hloubkových úrovních hydrogeologického masivu kandidátních lokalit byly, při současné úrovni znalostí, stanoveny pomocí hydrogeologických matematických modelů realizovaných v průběhu zužování počtu kandidátních lokalit HÚ z 9 na 4. Tyto informace jsou pro kandidátní lokality přehledně uvedeny v Havlová et al., 2020 a, e, f, g. Metodika realizace matematických modelů je uvedena v Uhlík et al., 2018. Modely byla popsána prostorová bilance podzemní vody v širším okolí homogenních horninových bloků zvolených jako možné hostitelské prostředí HÚ. Popis geometrie, parametrů a výsledků aktuálních modelů proudění podzemní vody jednotlivých lokalit je uveden v pasportech modelů (Baier et al., 2020a, b; Jankovec et al. 2020 a Uhlík et al., 2020).

Nejistoty:

Velikost proudění (průtok) dílčími částmi struktury (včetně prostoru HÚ), která představuje geologickou bariéru v kandidátních lokalitách je v současnosti stanovena s menší mírou jistoty pomocí komplexních hydrogeologických modelů. Nejistota stanovení souvisí s nedostatkem vstupních a kalibračních dat modelu. V současnosti nejsou k dispozici informace o odporových parametrech a zvodnění horninového prostředí kandidátních lokalit z hloubek pod vodohospodářsky využitelnou přípovrchovou vrstvou. Dostatečné rovněž nejsou znalosti hydrologického režimu a režimu proudění podzemní vody (prozatím není realizován periodický hydrogeologický monitoring lokalit). Řada parametrů, které jsou nezbytné pro důvěryhodný bilanční výpočet, je tak v současnosti zadávána na základě kvalifikovaného odhadu a analogie s jinými průzkumnými lokalitami.

Pro snížení nejistoty výsledků a tím i snížení rizik neočekávaného vývoje při realizaci úložiště je třeba doplnit dosavadní informace o výsledky z hloubkového geologického a hydrogeologického průzkumu a režimního hydrologického a hydrogeologického monitoringu.

Reference:

- VONDROVIC ET AL. (2019): Metodika zúžení počtu lokalit pro hlubinné úložiště v ČR v letech 2019-2020. – MS SÚRAO, TZ 423/2019
- UHLÍK J., ČERNÝ M., BAIER J., MILICKÝ M., POLÁK M., GVOŽDÍK L., KRÁLOVCOVÁ J., GRECKÁ M., RUKAVIČKOVÁ L. (2018): Detailní hydrogeologické modely lokalit. – MS SÚRAO, TZ 323/2018, Praha.
- HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., BAIER, J., MILICKÝ, M., POLÁK, M., BUKOVSKÁ, Z., ČERNÝ, M., DUŠEK, K., FIFERNOVÁ, M., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., HOLEČEK J., JELÉNEK, J., JANKOVEC, J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., KUNCEOVÁ, E., PETYNYIAK, O., RAPPRIK, V., RUKAVIČKOVÁ, L., SOEJONO, I., ŠVAGERA, O., UHLÍK, J., VOJTĚCHOVÁ, H., ŽÁČKOVÁ, E. (2020a): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Březový potok. MS SÚRAO, TZ 447/2020, 62 str.
- HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., JANKOVEC, J., UHLÍK, J., ČERNÝ, M., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., BAIER, J., DUŠEK, K., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., HEJTMÁNKOVÁ, P., HOLEČEK J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., MILICKÝ, M., NAHODILOVÁ, R., PACHEROVÁ, P., PETYNYIAK, O., PEŘESTÝ, V., RAPPRIK, V., ŘIHOŠEK, J., RUKAVIČKOVÁ, L., ŠVAGERA, O., POLÁK, M., VOJTĚCHOVÁ, H., ŽÁČKOVÁ, E. (2020e): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Janoch (ETE-jih). MS SÚRAO, TZ 451/2020, 63 str.
- HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., UHLÍK, J., JANKOVEC, J., MILICKÝ, M., BAIER, J., BURIÁNEK, D., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ, B., DUŠEK, K., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., GRUNDLOCH, J., HOLEČEK J., JELÉNEK, J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., KUNCEOVÁ, E., PETYNYIAK, O., POLÁK, M., RAPPRIK, V., RUKAVIČKOVÁ, L., ŠVAGERA, O., VOJTĚCHOVÁ, H. (2020f): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Horka. MS SÚRAO, TZ 452/2020, 63 str.
- HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., BAIER, J., MILICKÝ, M., BUKOVSKÁ, Z., ČERNÝ, M., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ, B., DUŠEK, K., FRANĚK, J., GVOŽDÍK,

- L., HOLEČEK J., JANKOVEC, J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., KUNCEOVÁ, E., PETYNIÁK, O., POLÁK, M., RAPPRIČH, V., RUKAVIČKOVÁ, L., ŠVAGERA, O., URÍK, J., VOJTĚCHOVÁ, H., ŽÁČKOVÁ, E. (2020g): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Hrádek. MS SÚRAO, 453/2020, 63 str.
- BAIER, J., JANKOVEC, J., ČERNÝ, M., GVOŽDÍK, L., MILICKÝ, M., POLÁK, M., UHLÍK, J. (2020a): hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště, pasport aktualizovaného detailního modelu – Lokalita Březový potok, MS SÚRAO, TZ 470/2020, 26 str.
- BAIER, J., JANKOVEC, J., ČERNÝ, M., GVOŽDÍK, L., MILICKÝ, M., POLÁK, M., UHLÍK, J. (2020b): hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště, Pasport aktualizovaného detailního modelu – Lokalita Hrádek, MS SÚRAO, TZ 469/2020, 25 str.
- JANKOVEC, J., BAIER, J., ČERNÝ, M., GVOŽDÍK, L., MILICKÝ, M., POLÁK, M., UHLÍK, J. (2020): Hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště, Pasport aktualizovaného detailního modelu – Lokalita ETE-JIH, MS SÚRAO, TZ 474/2020, 24 str.
- UHLÍK, J., GVOŽDÍK, L., BAIER, J., MILICKÝ, M., JANKOVEC, J., POLÁK, M. (2020): Hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště, Pasport aktualizovaného detailního modelu – Lokalita Horka, MS SÚRAO, TZ 476/2020, 25 str.

6.6.4 Charakter drenážní báze

Popis:

Charakter drenážní báze HÚ, nebo bází dílčích částí HÚ, ovlivňuje distribuci transportních cest a míru rozptylu potenciální kontaminace v prostředí. Kandidátní lokality pro umístění HÚ v prostředí českého masivu se vyznačují relativně členitou morfologií, která způsobuje, kromě velkých hydraulických gradientů, vyšší distribuci drenážních bází prostoru HÚ.

Drenážní báze úložiště lze charakterizovat několika indikátory, které umožňují jednoduše získat základní přehled o potenciálních procesech při proudění a transportu v dané lokalitě HÚ. Důležitý údaj představuje identifikace počtu drenážních toků. V těchto podmínkách je identifikace drenážních oblastí jednoznačnější, zatížená menší nejistotou (Vondrovic a kol., 2019). Pro identifikaci je vhodná realizace regionálního hydrogeologického modelu proudění.

V případě, že prostory HÚ na kandidátních lokalitách mají několik dílčích drenážních bází, je podstatný podíl, jakým se jednotlivé báze na drenáži potenciální kontaminace z HÚ podílejí. Dochází tak k identifikaci prostoru s potenciálně nejvyšším zatížením kontaminací na rozhraní geologické bariéry a biosféry.

Kromě umístění drenážní báze je důležitá i charakteristika drenážní báze s ohledem na její prostorový rozsah. Jedná-li se o prostorově omezenou drenáž do krátkého říčního úseku, pramenní linie nebo soustředěného pramenního vývěru, nebo se jedná o rozptýlenou skrytou drenáž ve velké prostoru. Od rozsahu drenážní báze je možné odvodit potenciální riziko vyšší koncentrace kontaminace v zóně biosférických procesů.

Umístění a charakter drenážních bází HÚ se bude v jednotlivých etapách vývoje HÚ měnit. V období výstavby a provozu HÚ se drenážní báze stane samotný vytěžený prostor, ve kterém se bude čerpat podzemní (důlní) voda. Po uzavření HÚ se do značné míry obnoví režim před zahájením stavby. Změny drenážních poměrů se budou dále vyvíjet v závislosti na exogenních

(např. selektivní eroze, změna klimatu, stavební úpravy apod.) i endogenních procesech (např. tektonické procesy), které budou mít vliv na průběh transportních cest z úložiště.

Vliv na bezpečnost:

Geosféra představuje přirozenou bariéru mezi HÚ a biosférou. Drenážní báze, jejich počet, rozsah, odlehlost od HÚ a jejich charakter jsou klíčové pro proces proudění podzemní vody a transport potenciální kontaminace. Větší počet drenážních toků představuje příznivější hydrogeologické a transportní podmínky, protože lze předpokládat, že potenciální kontaminace z HÚ se v horninovém prostředí více rozptýlí a koncentrace se sníží ředěním. Naopak drenáž do jediného toku (nebo jednoho úseku toku) nepřímo indikuje možnost nežádoucího soustředěného odvodnění úložiště a výskyt zvýšených koncentrací na rozhraní geosféra – biosféra (Vondrovic a kol., 2019). Z hlediska bezpečnosti lokality HÚ je vhodné, aby přírodní i antropogenní podmínky lokality (např. říční eroze, klimatické výkyvy, odběry vod, úpravy toků, stavební činnost atd.) měly co nejmenší tendenci ke změně, jejímž důsledkem by byla změna polohy a charakteru drenážní báze území oproti stavu před zahájením výstavby. Při posouzení bezpečnosti by tedy měl být brán zřetel i na scénáře budoucího vývoje území vzhledem k drenážním bázím.

Dostupná data:

Oblasti drenáže, jejich počet a podíly na celkovém průtoku úložištěm byly, při současné úrovni znalostí z kandidátních lokalit, stanoveny pomocí hydrogeologických matematických modelů realizovaných v průběhu zužování počtu kandidátních lokalit HÚ na 4. Tyto informace jsou pro kandidátní lokality přehledně uvedeny v Havlová et al., 2020 a, e, f, g. Metodika zpracování matematických modelů je uvedena v Uhlík et al., 2018. Popis geometrie, parametrů a výsledků aktuálních modelů proudění podzemní vody jednotlivých lokalit je uveden v pasportech modelů (Baier et al., 2020a, b; Jankovec et al. 2020 a Uhlík et al., 2020).

Nejistoty:

Modely proudění podzemní vody, zpracované v rámci zužování počtu kandidátních lokalit, charakterizovaly prostředí drenážních bází značně konceptualizovaně, výhradně na základě mapových podkladů a dostupných archivních dat z databáze vrtného průzkumu. Prostorové hydraulické a transportní parametry jsou v přípovrchových kolektorech značně rozdílné v závislosti na genezi jejich vývoje, ale i konkrétních morfologických a klimatických vlastnostech lokality. Zobecnování hydrogeologických vlastností pro větší oblasti v přípovrchové vrstvě geologické bariéry s aktivním prouděním tak může vést k významným nepřesnostem. Další nejistoty plynou z nedostatečné znalosti hydrologického režimu a režimu proudění podzemní vody (prozatím není realizován periodický hydrologický a hydrogeologický monitoring lokalit) v konkrétních lokalitách.

Pro snížení nejistoty výsledků a tím i snížení rizik neočekávaného vývoje při realizaci úložiště je třeba doplnit dosavadní informace o výsledky z režimního hydrogeologického monitoringu.

Reference:

BAIER, J., JANKOVEC, J., ČERNÝ, M., GVOŽDÍK, L., MILICKÝ, M., POLÁK, M., UHLÍK, J. (2020a): hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště, pasport aktualizovaného detailního modelu – Lokalita Březový potok, MS SÚRAO, TZ 470/2020, 26 str.

- BAIER, J., JANKOVEC, J., ČERNÝ, M., GVOŽDÍK, L., MILICKÝ, M., POLÁK, M., UHLÍK, J. (2020b): hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště, Pasport aktualizovaného detailního modelu – Lokalita Hrádek, MS SÚRAO, TZ 469/2020, 25 str.
- HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., BAIER, J., MILICKÝ, M., POLÁK, M., BUKOVSKÁ, Z., ČERNÝ, M., DUŠEK, K., FIFERNOVÁ, M., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., HOLEČEK J., JELÍNEK, J., JANKOVEC, J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., KUNCEOVÁ, E., PETYNIÁK, O., RAPPRIČH, V., RUKAVIČKOVÁ, L., SOEJONO, I., ŠVAGERA, O., UHLÍK, J., VOJTĚCHOVÁ, H., ŽÁČKOVÁ, E. (2020a): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Březový potok. MS SÚRAO, TZ 447/2020, 62 str.
- HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., JANKOVEC, J., UHLÍK, J., ČERNÝ, M., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., BAIER, J., DUŠEK, K., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., HEJTMÁNKOVÁ, P., HOLEČEK J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., MILICKÝ, M., NAHODILOVÁ, R., PACHEROVÁ, P., PETYNIÁK, O., PEŘESTÝ, V., RAPPRIČH, V., ŘIHOŠEK, J., RUKAVIČKOVÁ, L., ŠVAGERA, O., POLÁK, M., VOJTĚCHOVÁ, H., ŽÁČKOVÁ, E. (2020e): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Janoch (ETE-jih). MS SÚRAO, TZ 451/2020, 63 str.
- HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., UHLÍK, J., JANKOVEC, J., MILICKÝ, M., BAIER, J., BURIÁNEK, D., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ, B., DUŠEK, K., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., GRUNDLOCH, J., HOLEČEK J., JELÍNEK, J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., KUNCEOVÁ, E., PETYNIÁK, O., POLÁK, M., RAPPRIČH, V., RUKAVIČKOVÁ, L., ŠVAGERA, O., VOJTĚCHOVÁ, H. (2020f): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Horka. MS SÚRAO, TZ 452/2020, 63 str.
- HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., BAIER, J., MILICKÝ, M., BUKOVSKÁ, Z., ČERNÝ, M., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ, B., DUŠEK, K., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., HOLEČEK J., JANKOVEC, J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., KUNCEOVÁ, E., PETYNIÁK, O., POLÁK, M., RAPPRIČH, V., RUKAVIČKOVÁ, L., ŠVAGERA, O., URÍK, J., VOJTĚCHOVÁ, H., ŽÁČKOVÁ, E. (2020g): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Hrádek. MS SÚRAO, 453/2020, 63 str.
- JANKOVEC, J., BAIER, J., ČERNÝ, M., GVOŽDÍK, L., MILICKÝ, M., POLÁK, M., UHLÍK, J. (2020): Hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště, Pasport aktualizovaného detailního modelu – Lokalita ETE-JIH, MS SÚRAO, TZ 474/2020, 24 str.
- UHLÍK, J., GVOŽDÍK, L., BAIER, J., MILICKÝ, M., JANKOVEC, J., POLÁK, M. (2020): Hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště, Pasport aktualizovaného detailního modelu – Lokalita Horka, MS SÚRAO, TZ 476/2020, 25 str.
- UHLÍK J., ČERNÝ M., BAIER J., MILICKÝ M., POLÁK M., GVOŽDÍK L., KRÁLOVCOVÁ J., GRECKÁ M., RUKAVIČKOVÁ L. (2018): Detailní hydrogeologické modely lokalit. – MS SÚRAO, TZ 323/2018, Praha.
- VONDROVIC ET AL. (2019): Metodika zúžení počtu lokalit pro hlubinné úložiště v ČR v letech 2019-2020. – MS SÚRAO, TZ 423/2019

6.7 Transportní charakteristiky

6.7.1 Geometrie pukliny

Popis:

Transport radionuklidů v puklinovém prostředí ovlivňuje celá řada procesů (mezi jinými radioaktivní přeměna, advekce, sorpce, komplexace, difuze). Rámec pro uplatnění těchto procesů vytváří geometrie puklinového systému (proměnlivé rozevření, rozměry puklin, konektivita, doprovodné porušení horniny podél puklin, drsnost, výplň a další doprovodné jevy – např. channeling; Milický et al. 2019). Významná je tedy četnost a velikosti puklin, jejich rozměr (tedy smáčený povrch, otevřenost/puklinová výplň, hydraulická konduktivita, kinematická porozita, a dále na parametry proudění podzemní vody, tj. rychlost proudění, regionální a lokální hydraulické gradienty (viz kap.6.5).

Z vlastností masivu, které jsou důležité pro migraci látek v horninovém prostředí, je možno z hlediska vlastností pukliny specifikovat následující:

- Hustota a délka puklin
- Transmisivita
- Distribuce napětí v hornině,
- Rozevření puklin
- Morfologie pukliny (tvar povrchu)
- .

Proudění a transport látek v síti puklin je ovlivněno primárně následujícími vlastnostmi puklinového systému (Posiva 2008 v Milický et al. 2019):

1. duální porozitou, kdy vodivé jsou především pukliny, okolní horninová matrice má velmi nízkou hydraulickou vodivost.
2. heterogenitou proudění. Heterogenní struktura rozpukaných hornin má za následek preferenční proudění, které je odrazem jak hydraulických, tak transportních charakteristik.
3. větvením proudění (channeling) - cca 90% kapaliny proudí v 5-20 % z celkové plochy puklin, což znamená, že pouze omezené množství puklin se podílí na transportu látek, odhadem méně než 10 %.

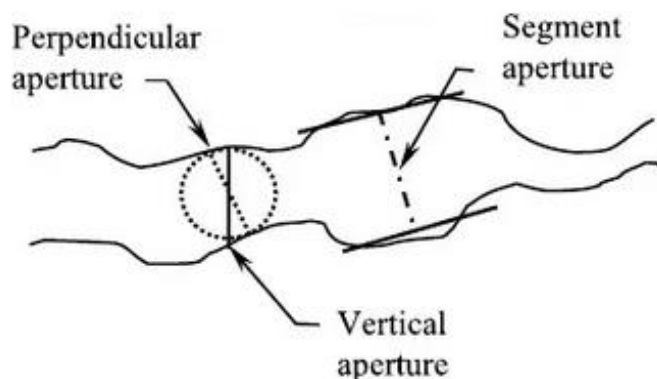
Pro kompletní popis geometrie a vlastností puklinového prostředí je předpokladem znalost; respektive stanovení parametrů, které definují (Milický et al. 2019):

- Orientaci puklin.
- Rozměry puklin.
- Intenzitu (prostorová distribuce intenzity rozpukání).
- Rozmístění puklin (*spatial model*).

Smáčený povrch pukliny se označuje jako „smáčená plocha povrchu na jednotku objemu mobilního roztoku“ nebo jako „specifická plocha kontaktu“. Obojí označuje tu část povrchu, která zůstává v kontaktu s mobilním roztokem a kde může dojít k transportu hmoty mezi puklinou a nemobilním (stagnujícím) roztokem v horninové matrici. Pro zjednodušení: pokud

proudění probíhá v puklině o šířce $2b$, pak hodnota specifického kontaktního povrchu je $1/b$ (Jakob 2004).

Rozevření pukliny (apertura) a (Obr. 7) je bez znalosti a výzkumu konkrétní lokality možno pouze odhadovat. Podle Hagros (2006) je puklina o šířce větší než 5 mm ze stavebního hlediska považována pro výstavbu úložiště za nevhodnou, a to i přesto, že puklina, na níž dochází k významné erozi bentonitu, se považuje za významnou, až když přesáhne šířku 10 mm (Andersson et al. 2000).



Obr. 7 Základní definice rozevření pukliny (Konzuk & Kueper, 2004)

Vliv na bezpečnost:

Charakter puklinové sítě je jedním ze základních parametrů, ovlivňujících rychlost šíření radionuklidů v horninovém masivu krystalinických hornin za předpokladu, že hlavním transportním mechanismem je advektivní transport. Jde tedy o zcela zásadní charakteristiky, mající vliv na migraci směrem k povrchu.

Dostupná data:

Popisem puklinové sítě na jednotlivých lokalitách se do určité míry zabývaly práce, zaměřené na vytvoření geologických modelů a jejich ověření geofyzikálními metodami (Franěk et al. 2017; Mixa et al. 2019; Franěk et al. 2015; Švagera et al. 2016; Navrátilová et al. 2017; Bukovská et al. 2016). Doplněním a popisem diskrétní sítě puklin a jejich modelováním se pak zabývala práce Milický et al. (2019).

Popis geometrie pukliny a její modelování v laboratorních podmínkách lze najít v práci Jankovského et al. (2017, 2020).

Parametry pukliny, použité pro bezpečnostní hodnocení HÚ, lze nalézt např. v pracích Vokála et al. (2009) nebo Trpkošové et al. (2018). V práci Vokála et al. (2009) byla např. zvolena poloviční vzdálenost rozevření pukliny a v hodnotě 0,0001 m v návaznosti na práce SKB (1999, 2010). V práci Trpkošové et al. (2018) bylo použito rozevření $7,58 \cdot 10^{-5}$ m.

Nejistoty:

Charakter puklinové sítě, či hodnoty rozevření puklin nebo smáčeného povrchu pukliny bez znalosti a výzkumu konkrétní lokality možno pouze odhadovat.

Reference:

- ANDERSSON, J., STROM, A., ALMÉN, K. E. A ERICKSSON, E. (2000): What requirements does the KBS-3 repository make on the host rock. SKB Technical Report TR 00-12 - SKB, Sweden.
- BUKOVSKÁ Z., ČEJCHANOVÁ A., FRANĚK J., JELÉNEK J., MLČOCH B., PERTOLDOVÁ J., SKÁCELOVÁ Z., SOEJONO I., ŠVAGERA O., VERNER K., MILICKÝ M., BARTÁŠKOVÁ L. (2016): Regionální 3D strukturně geologický model lokality Hrádek. – MS SÚRAO, Technická zpráva, Praha.
- FRANĚK J., BUKOVSKÁ Z., BURIÁNEK D., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ B., GRUNDLOCH J., HOLEČEK J., JELÉNEK J., JELÍNEK J., KLOMÍNSKÝ J., KRYŠTOFOVÁ E., KUČERA R., KUNCEOVÁ E., KŮRKOVÁ I., NAHODILOVÁ R., PACHEROVÁ P., PERTOLDOVÁ J., PEŘESTÝ V., RUKAVIČKOVÁ L., SOEJONO I., ŠVAGERA O., VERNER K., ŽÁČEK V. (2018): Závěrečná zpráva 3D strukturně – geologické modely potenciálních lokalit HÚ. MS SÚRAO, TZ 229/2018, Praha, 594 str.
- FRANĚK J., BUKOVSKÁ Z., ČEJCHANOVÁ A., JELÉNEK J., MLČOCH B., PERTOLDOVÁ J., SKÁCELOVÁ Z., SOEJONO I., ŠVAGERA O., VERNER K., MILICKÝ M., BARTÁŠKOVÁ L. (2015): Regionální 3D strukturně geologický model lokality Horka. Technická zpráva MS SÚRAO Praha.
- HAGROS (2006): Host Rock Classification (HRC) System for Nuclear Waste Disposal in Crystalline Bedrock. Doctoral Thesis. - University of Helsinki, Department of Geology.
- JAKOB, A. (2004): Matrix diffusion for performance assessment - experimental evidence, modelling assumptions and open issues. PSI Report Nr. 04-08. – NAGRA, Switzerland.
- JANKOVSKÝ F., HAVLOVÁ V., ZUNA M., KŮS P., POLÁK M., JANKOVEC J., ZEMAN O., MILICKÝ M., GVOŽDÍK L., HOKR M. (2017): Vývoj nástrojů pro studium transportu kontaminantů v puklinovém prostředí. Průběžná zpráva projektu TAČR TH02030543 Vývoj nástrojů pro studium transportu kontaminantů v puklinovém prostředí. ÚJVC Řež, a. s.
- JANKOVSKÝ F., HAVLOVÁ V., ZUNA M., TRPKOŠOVÁ D., MILICKÝ M., POLÁK M., JANKOVEC J., HOKR M., BALVÍN A., RÁLEK P., PARMA P. (2021): Vývoj nástrojů pro studium transportu kontaminantů v puklinovém prostředí. Závěrečná zpráva projektu TH02030543, ÚJV Řež report Z5539, ÚJV Řež, a. s.
- KONZUK, J. S., & KUEPER, B. H. (2004): Evaluation of cubic law based models describing single-phase flow through a rough-walled fracture. Water Resources Research, Vol. 40.
- MILICKÝ M., BUKOVSKÁ Z., GRECKÁ M., GVOŽDÍK L., JANKOVEC J., KABELE P., KRYL J., ŘÍHA J., ŠVAGERA O., TRPKOŠOVÁ D., UHLÍK J., URBAN P., VETEŠNÍK A., VIŠŇÁK J., ZELINKOVÁ T. (2019): Transport radionuklidů z hlubinného úložiště/testování koncepčních a výpočetních modelů – rešerše literatury. – MS SÚRAO, SÚRAO TZ 387/2019, Praha.
- MIXA P., SKÁCELOVÁ Z., PERTOLDOVÁ J., BUKOVSKÁ Z., BURIÁNEK D., DUDÍKOVÁ B., FRANĚK J., HRDLIČKOVÁ K., JELÍNEK J., NAHODILOVÁ R., SOEJONO I., VERNER K., ŽÁČEK V. (2019): Shrnutí výsledků geologických a geofyzikálních výzkumných prací provedených v období 9/2017–6/2019 pro aktualizaci hodnocení potenciálních lokalit hlubinného úložiště RAO. MS SÚRAO, TZ 412/2019, Praha, 427 str.
- NAVRÁTILOVÁ V., NOL O., KAŠPAR R., LANČA D., MIŠUREC J., NEDVĚD J., RAJCHL M., SOSNA K., ŠINDELÁŘ M., TLAMSA J., VOJTĚCHOVSKÁ A. (2017): Zpráva o provedení geologicko-výzkumných prací na lokalitě ETE-jih. Závěrečná zpráva, MS SÚRAO, 280 str.

- OHLSSONS Y., NERETNIEKS I. (1997): Diffusion data in granite. Recommended values, SKB Technical report TR 97-20. - SKB, Sweden.
- POSIVA (2008): Radionuclide Release and Transport – RNT – 2008. Eurajoki, Finland: Posiva Oy. Posiva 2008-06.
- SKAGIUS K., PETTERSSON M., WIBORGH M., ALBINSSON Y., HOLGERSSON S. (1999): Compilation of data for the analysis of radionuclide migration from SFL 3-5. SKB Technical Report TR 98-13. - SKB, Sweden.
- SKB (2010): Radioactive transport report for the safety assessment SR-SITE. Appendix, Technical Report TR-10-50, Svensk Kärnbränslehantering AB, Sweden
- SKB (1999): Deep repository for spent nuclear fuel SR 97 – Post-closure safety, Main Report, Summary, Technical Report TR-99-06, Svensk Kärnbränslehantering AB, Sweden.
- ŠVAGERA O., BUKOVSKÁ Z., ČEJCHANOVÁ A., FRANĚK J., JELÉNEK J., MLČOCH B., PERTOLDOVÁ J., SKÁCELOVÁ Z., SOEJONO I., VERNER K., MILICKÝ M., BARTÁŠKOVÁ L. (2016): Regionální 3D strukturně geologický model lokality Březový potok. Technická zpráva MS SÚRAO, Praha.
- TRPKOŠOVÁ D., HAVLOVÁ V., DOBREV D., HUSŤÁKOVÁ H., GONDOLLI J., KLAJMON M., MIRANDA A. N. M., VEČERNÍK P., BUKOVSKÁ Z., RATAJ J., FRÝBORT J., FEJT F., ŠTAMBERG K., VETEŠNÍK, A., VOPÁLKA D., UHLÍK J., GVOŽDÍK L., KRÁLOVCOVÁ J., ŘÍHA J., MARYŠKA J., STEINOVÁ J., STAŠ L. (2018): Bezpečnostní rozbor dlouhodobé bezpečnosti hlubinného úložiště na lokalitě Kraví hora. Závěrečná zpráva. – MS SÚRAO ZZ 334/2018, Praha.
- VOKÁL A., HAVLOVÁ V., HERCÍK M., LANDA J., LUKIN D., VEJSADA J. (2009): Analýza vstupních předpokladů řešení. 1. etapa 2. dílčí zprávy Aktualizace referenčního projektu hlubinného úložiště radioaktivních odpadů v hypotetické lokalitě. - ÚJV Řež a.s. pro SÚRAO, 2009.

6.7.2 Vlastnosti povrchu pukliny

Popis:

Z vlastností pukliny, které jsou důležité pro migraci látek v horninovém prostředí, je možno specifikovat následující:

- Pórovitost.
- Mineralogii (minerální výplň, alterace hostitelské horniny).
- Hydraulické vlastnosti pukliny (transmisivita, hydraulické rozevření).
- Mechanické vlastnosti pukliny (střihová a normálová pevnost).

Pukliny v krystalinických horninách jsou často pokryty sekundárními minerály, které vznikly na kontaktu s pohybující se podzemní vodou jako produkt zvětrávání nebo hydrotermální alterace. Zatímco porozita granitu se pohybuje v rozmezí 0,1-1 % (Skagius, 1986), porozita povrchů puklin bývá obecně vyšší, až 8-10 % (Skagius, 1986).

Vazba radionuklidu na pevnou fázi závisí na vlastnostech povrchu pukliny. S přítomností sekundárních minerálů v puklinovém systému významným způsobem narůstá schopnost sorbovat některé z radionuklidů (např. Cs; Havlová et al. 2019).

Specifický povrch, tj. plocha povrchu pevné látky, vztažená na jednotku hmotnosti (obvykle v m²/g) je významným parametrem zejména pro charakterizaci minerálů puklinových výplní.

Procesy vedoucí k jejímu porušení či alteraci obvykle též vedou ke zvýšení specifického povrchu (např. jílové minerály jakožto výplně puklin mohou mít řádově vyšší specifické povrchy než minerály horninové matrice). **Kationtová výměnná kapacita** (CEC) určuje množství kationtů vázaných na povrchu iontoměniče, které je iontoměnič schopen vyměnit za ionty v roztoku. Veličina se obvykle udává v meq/100 g. Některé sekundární minerály a zejména produkty alterací (např. jílové minerály) mají hodnoty CEC výrazně vyšší než horninotvorné minerály. Minerály, které obecně přispívají ke zvýšení CEC a specifického povrchu jsou např. slídy, jílové minerály, oxyhydroxidy Fe ad. Tyto dva parametry jsou tedy přímo úměrné mineralogickému složení. Z důvodu ovlivnění hodnot sorpční kapacity horniny velikostí částic doporučuje Crawford et al. (2006) používat hodnoty K_d , relativizované ke specifickému povrchu SSA (tzv. K_a).

Ohlsson a Neretnieks (1995) ukázali, že minerální výplň puklin, byť mm silná, nemusí nutně ovlivnit difúzi z pukliny do horniny, neboť v porovnání s horninovou maticí mají často tyto minerály větší povrch. (Havlová et al. 2019)

Variabilitu složení povrchu puklin lze např. kategorizovat do několika **transportních tříd** (Posiva 2012a), na jejichž základě jsou pak reprezentovány transportní vlastnosti puklin. Jedná se o např. o pukliny s povlakem jílu (a případně sulfidů), pukliny s povlakem kalcitu (a případně jílu a sulfidů), tektonická zrcadla a ostatní pukliny. Retenční vlastnosti (např. porozita, difuzivita nebo sorpční distribuční koeficient) se liší v rámci transportních tříd.

Vliv na bezpečnost:

Radionuklidy při transportu horninovým prostředím reagují s okolním horninovým prostředím a mohou se vázat na jeho složky (retardace). V důsledku toho může dojít jednak ke zpomalení rychlosti transportu radionuklidů v porovnání s rychlostí toku podzemní vody v puklině, případně i k migraci radionuklidu do horninové matrice. Minerály puklinových výplní představují významné sorbenty v prostředí krystalinických hornin.

Dostupná data:

Geologické charakteristiky uvažovaných území jsou hodnoceny v kapitolách 4, případný výskyt minerálů na puklinách a alterovaných zónách v kapitole 6.5.4. Rozsáhlý soubor archivních geovědních zpráv a map je přehledně shrnutý ve zprávách, které doprovázejí detailní 3D geologické modely 7 lokalit (Franěk et al., 2018, z vybraných 4 lokalit se toto týká Horky, Hrádku a Březového potoka), a 3D geologický model ETE-Jih (Navrátilová a Noll, 2017); shrnuty v pracích Havlová et al. (2020a-d). Data získaná v letech 2017-2019 díky novým geofyzikálním a geologickým výzkumům jsou pak pro všechny tyto 4 lokality shrnuta v rozsáhlé práci Mixy et al. (2020).

Při komplexní charakterizaci PVP Bukov (Bukovská et al. 2017) byly identifikovány zóny alterací až několik metrů široké, tvořené především kalcitem, chloritem, hematitem, slídkami, palygorskitem, kaolinitem, tektitem, illitem a minerály zeolitové skupiny, jež reprezentují minerály, jež se vyznačují významně vyššími hodnotami sorpčních parametrů (Havlová et al. 2019).

Charakteristickými vlastnostmi puklinových výplní z dostupných materiálů Českého masivu, a to zejména z PVP Bukov (CEC, specifický povrch a sorpční vlastnosti) se zabývala práce Havlové et al. (2019).

Přehled hodnot CEC pro minerály z literatury uvádí Crawford (2010) - CEC křemene a K-živce může být zhruba v rozmezí 0,1–0,3 cmol kg⁻¹ pro pH v intervalu 6–9, biotitu 1–2 cmol kg⁻¹, chlorit 5 cmol kg⁻¹ a smektitu 70–80 cmol kg⁻¹ v intervalu pH 5–9.

Transportní vlastnosti vyhojené pukliny Havlová et al. (2017) v rámci projektu PAMIRE.

Nejistoty:

Část nejistot tkví v nedostatečných metod, používaných jak pro charakterizaci horniny, tak pro popis jejích vlastností (nově Havlová et al. 2022).

Další významnou nejistotou je nedostatek dat a vzorků pro charakterizaci v hloubkách, relevantních pro horizont ukládání radioaktivních odpadů. Pro dostatečnou charakterizaci lokality je nutno provést důkladný geologický průzkum, spojený s invazivními metodami.

Reference:

BUKOVSKÁ Z., VERNER K., BRÁZDA L., BURIÁNEK D., DOBEŠ P., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ B., ERBAN V., FRANĚK J., HALODOVÁ P., HANÁK J., HAVLOVÁ V., HOLEČEK J., JAČKOVÁ I., JELÉNEK J., KAŠPAR V., KOLOMÁ K., KOPAČKOVÁ V., KOUČKA L., KUČETA 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. – MS SÚRAO, ZZ 191/2017, Praha.

CRAWFORD J (2010) Bedrock Kd data and uncertainty assessment for application in SR-Site geosphere transport calculations. SKB R-10-48, Svensk Kärnbränslehantering AB.

FRANĚK J., BUKOVSKÁ Z., BURIÁNEK D., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ B., GRUNDLOCH J., HOLEČEK J., JELÉNEK J., JELÍNEK J., KLOMÍNSKÝ J., KRYŠTOFOVÁ E., KUČERA R., KUNCEOVÁ E., KŮRKOVÁ I., NAHODILOVÁ R., PACHEROVÁ P., PERTOLDOVÁ J., PEŘESTÝ V., RUKAVIČKOVÁ L., SOEJONO I., ŠVAGERA O., VERNER K., ŽÁČEK V. (2018): Závěrečná zpráva 3D strukturně – geologické modely potenciálních lokalit HÚ. MS SÚRAO, TZ 229/2018, Praha, 594 str.

FRANĚK J., BUKOVSKÁ Z., ČEJCHANOVÁ A., JELÉNEK J., MLČOCH B., PERTOLDOVÁ J., SKÁCELOVÁ Z., SOEJONO I., ŠVAGERA O., VERNER K., MILICKÝ M., BARTÁŠKOVÁ L. (2015): Regionální 3D strukturně geologický model lokality Horka. Technická zpráva MS SÚRAO Praha.

HAVLOVÁ V., ZUNA M., BRÁZDA L., JANKOVSKÝ F., KOLOMÁ K., KOLOMÁ K., TRPKOŠOVÁ D., MILICKÝ M., GVOŽDÍK P., SOSNA K., POLÁK M. (2017): Přenos hodnot migračních parametrů granitických hornin z Mikroměřítka do REálného měřítka horninového masivu (PAMIRE). Závěrečná výzkumná zpráva projektu TA04020986, Z 4933

HAVLOVÁ V., ZUNA M., BRÁZDA L., KOLOMÁ K., GALEKOVÁ E., ROSENDORF T., JANKOVSKÝ F. (2018): Migrační procesy radionuklidů v prostředí krystalických hornin a migrační parametry hornin Českého masivu. – MS SÚRAO, ZZ 333/2018, Praha

HAVLOVÁ V., ZUNA M., BRÁZDA L., KOLOMÁ K., GALEKOVÁ E., ROSENDORF T., JANKOVSKÝ F. (2019): Migrační procesy radionuklidů v prostředí krystalických hornin a migrační parametry hornin Českého masivu. Revize 1. – MS SÚRAO, ZZ 333/2018, Praha.

HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., BAIER, J., MILICKÝ, M., POLÁK, M., BUKOVSKÁ, Z., ČERNÝ, M., DUŠEK, K., FIFERNOVÁ, M., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., HOLEČEK J., JELÉNEK, J., JANKOVEC, J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., KUNCEOVÁ, E., PETYNIÁK, O., RAPPRIČH, V., RUKAVIČKOVÁ, L., SOEJONO, I., ŠVAGERA, O., UHLÍK, J.,

- VOJTĚCHOVÁ, H., ŽÁČKOVÁ, E. (2020a): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Březový potok. MS SÚRAO, TZ 447/2020, 62 str.
- HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., BAIER, J., MILICKÝ, M., BUKOVSKÁ, Z., ČERNÝ, M., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ, B., DUŠEK, K., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., HOLEČEK J., JANKOVEC, J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., KUNCEOVÁ, E., PETYNIÁK, O., POLÁK, M., RAPPRIČH, V., RUKAVIČKOVÁ, L., ŠVAGERA, O., URÍK, J., VOJTĚCHOVÁ, H., ŽÁČKOVÁ, E. (2020g): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Hrádek. MS SÚRAO, 453/2020, 63 str.
- HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., UHLÍK, J., JANKOVEC, J., MILICKÝ, M., BAIER, J., BURIÁNEK, D., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ, B., DUŠEK, K., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., GRUNDLOCH, J., HOLEČEK J., JELÉNEK, J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., KUNCEOVÁ, E., PETYNIÁK, O., POLÁK, M., RAPPRIČH, V., RUKAVIČKOVÁ, L., ŠVAGERA, O., VOJTĚCHOVÁ, H. (2020f): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Horka. MS SÚRAO, TZ 452/2020, 63 str.
- HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., JANKOVEC, J., UHLÍK, J., ČERNÝ, M., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., BAIER, J., DUŠEK, K., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., HEJTMÁNKOVÁ, P., HOLEČEK J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., MILICKÝ, M., NAHODILOVÁ, R., PACHEROVÁ, P., PETYNIÁK, O., PEŘESTÝ, V., RAPPRIČH, V., ŘIHOŠEK, J., RUKAVIČKOVÁ, L., ŠVAGERA, O., POLÁK, M., VOJTĚCHOVÁ, H., ŽÁČKOVÁ, E. (2020e): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Janoch (ETE-jih). MS SÚRAO, TZ 451/2020, 63 str.
- HAVLOVÁ V., BEDRNÍKOVÁ E., VEČERNÍK P., KOLOMÁ K., VOPÁLKA D., DRTINOVÁ B., BABOROVÁ L. (2022): Shrnutí postupů využívaných pro predikci retardačních parametrů bariér a migrace radionuklidů v HÚ. – MS SURAO, TZ 593/2022. SURAO, Praha
- MIXA P., SKÁCELOVÁ Z., PERTOLDOVÁ J., BUKOVSKÁ Z., BURIÁNEK D., DUDÍKOVÁ B., FRANĚK J., HRDLIČKOVÁ K., JELÍNEK J., NAHODILOVÁ R., SOEJONO I., VERNER K., ŽÁČEK V. (2019): Shrnutí výsledků geologických a geofyzikálních výzkumných prací provedených v období 9/2017–6/2019 pro aktualizaci hodnocení potenciálních lokalit hlubinného úložiště RAO. MS SÚRAO, TZ 412/2019, Praha, 427 str.
- NAVRÁTILOVÁ V., NOL O., KAŠPAR R., LANČA D., MIŠUREC J., NEDVĚD J., RAJCHL M., SOSNA K., ŠINDELÁŘ M., TLAMSA J., VOJTĚCHOVSKÁ A. (2017): Zpráva o provedení geologicko-výzkumných prací na lokalitě ETE-jih. Závěrečná zpráva, MS SÚRAO, 280 str.
- OHLSSONS, Y., NERETNIEKS, I. (1995): Literature survey of matrix diffusion theory and of experiments and data including natural analogues. SKB Technical Report TR 95-12, Sweden.
- POSIVA (2012a): Safety case for the disposal of spent nuclear fuel at Oikiluoto (2012): Synthesis 2012. Posiva 2012-12. Posiva Oy, Eurojaki, Finland.
- ŠVAGERA O., BUKOVSKÁ Z., ČEJCHANOVÁ A., FRANĚK J., JELÉNEK J., MLČOCH B., PERTOLDOVÁ J., SKÁCELOVÁ Z., SOEJONO I., VERNER K., MILICKÝ M., BARTÁŠKOVÁ L. (2016): Regionální 3D strukturně geologický model lokality Březový potok. Technická zpráva MS SÚRAO, Praha.

6.7.3 Vlastnosti horninové matrice

Popis:

Typické krystalinické horniny granitového typu jsou tvořeny převážně křemenem draselným živcem, plagioklasy a biotitem (Savage, 1995). Kromě těchto minerálů, které tvoří horninovou matici, se vyskytuje v různém množství mnoho dalších minerálů s odlišným složením. Jsou to minerály stabilní za nízkých teplot, zejména jílové minerály, hydroxidy železa a manganu, zeolity a slídy. Dále jsou to minerály stabilní za vyšší teploty, jako jsou turmalín, amfiboly, světlé slídy, druhá generace křemene, karbonáty a mnohé další.

Z vlastností horniny, které jsou důležité pro migraci látek v horninovém prostředí, je možno specifikovat následující:

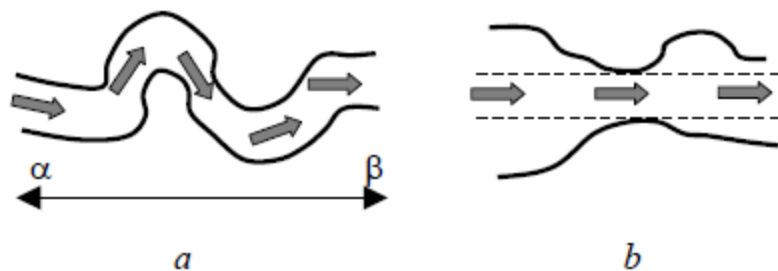
- Hustota horniny,
- Pórovitost,
- Minerální složení,
- Hydraulická konduktivita horniny,
- Specifikace základních hydrochemických parametrů, které jsou specifické pro každou lokalitu.

Různorodost ve složení hornin (tj. výskyt různých typů hornin, variace v jejich složení a ve složení v puklinových zónách) vede k variacím ve fyzikálních vlastnostech (Gascoyne et al. 1995).

Celková pórovitost (total porosity) ε_T - odpovídá objemu horniny, který není vyplněn minerálními zrny. Bývá často definovaná vztahem: $\varepsilon_T = \varepsilon_F + \varepsilon_D + \varepsilon_R$, kde ε_F značí efektivní pórovitost (dominantním typem transportu fluid je zde proudění – definice efektivní pórovitosti předpokládá dostatečný hydraulický gradient, bez jehož existence by efektivní pórovitost spadala do definice difuzivní pórovitosti). ε_D představuje difuzivní pórovitost (převládajícím typem transportu je difuze ve vodou vyplněných pórech) a ε_R představuje reziduální pórovitost (nespojité póry, v nichž žádný transport neprobíhá), v níž se mohou v uzavřených inkluzích vyskytovat i roztoky.

Dlouhou dobu probíhá diskuze o dosahu propojenosti pórů (konektivě). Lanyon a Blechsmidt (2008) nebo Löfgren a Neretnieks (2003) dokladují, že póry mohou být v granitové matici propojeny i na několik metrů v reálných podmínkách či několik centimetrů v laboratorních podmínkách. Podle jiných prací (Birgersson a Neretnieks, 1990) existují části horninového masívu s uzavřenými póry, které jsou obklopeny partiemi s otevřenými póry, kterými kolem uzavřených zón mohou radionuklidy difundovat a nepronikat do nich. Vzhledem k vysokým tlakům v hornině a uzavírání pórů předpokládají, že dosah propojené porozity je limitován a uzavřen pro migraci radionuklidů (Jakob, 2004).

Kromě toho je tvar pórů různě deformovaný, což vede k tomu, že látky difundující z jednoho bodu do druhého (viz Obr. 8) nemohou procházet nejkratší přímou cestou, tento jev se nazývá *tortuozita póru*. Jiným faktorem ovlivňujícím difúzní transport látky v pórech je jejich různá plocha průřezu (viz Obr. 8), neboli *konstrikivita póru* (Löfgren, 2004).



Obr. 8 Schématické znázornění tortuozity (vlevo) a konstrikivity póru (vpravo)

Tortuozita (τ^2) čili zakřivení a konstrikivita (δ) neboli zúžení jsou hlavními vlastnostmi pórů, které ovlivňují migraci látek horninou.

Vzájemné propojení pórů je další vlastností, která ovlivňuje možnou migraci prvku horninovou maticí. Čím je síť pórů propojenější, tím je množství kontaminantu, schopné proniknout do horniny větší.

Vazba radionuklidu na horninu závisí na vlastnostech povrchu pevné fáze. **Specifický povrch**, tj. plocha povrchu pevné látky, vztažená na jednotku hmotnosti (obvykle v m^2/g) je významným parametrem zejména pro charakterizaci minerálů puklinových výplní. Horninotvorné minerály granitických hornin mají obecně samy o sobě velmi nízké hodnoty specifického povrchu (stejně jako kompaktní neporušená hornina). **Kationtová výměnná kapacita (CEC)** určuje množství kationtů vázaných na povrchu iontoměniče, které je iontoměnič schopen vyměnit za ionty v roztoku. Veličina se obvykle udává v $\text{meq}/100 \text{ g}$. Horninotvorné minerály granitických hornin mají obecně velmi nízké hodnoty CEC. Minerály, které obecně přispívají ke zvýšení CEC a specifického povrchu jsou např. slídy, jílové minerály, oxyhydroxidy Fe ad. Tyto dva parametry jsou tedy přímo úměrné mineralogickému složení.

Minerální složení významným způsobem ovlivňuje složení podzemní vody (viz kap. 6.7.4). Meteorické vody, tj. podzemní vody atmosférického původu po průniku puklinami do horninového masivu reagují nejvíce s plagioklasy, potom se slídami a draselnými živci a prakticky nereagují s křemenem. Z akcesorických minerálů se rozpouští apatit, amfiboly a případný pyroxen. Kromě těchto základních horninotvorných minerálů podzemní vody reagují s roztroušenými minerály železa, zejména hematitem, magnetitem a pyritem a s žilnými výplněmi puklin. V žilách bývá reaktivní fluorit a hlavně karbonáty, většinou kalcit. Složení minerálů v hornině však může mít i obráceně významný vliv např. na záchyt plynů, rozpuštěných v podzemní vodě. Typickým příkladem je např. spotřeba kyslíku po uzavření úložiště či konsumpce kyslíku při průniku ledovcových vod (Malstroem et al. 1995, Kotelnikova & Pedersen, 1998; Puigdomenech et al., 2001 ad. – viz vliv klimatu v kap. 8.2.1)

Vliv na bezpečnost:

Radionuklidy při transportu horninovým prostředím reagují s okolním horninovým prostředím a mohou se vázat na jeho složky (retardace). V důsledku toho může dojít jednak ke zpomalení rychlosti transportu radionuklidů v porovnání s rychlostí toku podzemní vody v puklině, jednak naopak k vazbě na složky podzemní vody (ligandy, koloidy, organické látky aj.), které zvyšují mobilitu prvku ve srovnání s normálním stavem.

Dostupná data:

Základní data, popisující vlastnosti hornin z potenciálních lokalit, významné pro transport, jsou shromážděny ve zprávách Havlová et al. (2019b) a Hanák et al. (2017). Vyhodnocení parametrů hornin Českého masivu lze najít ve zprávě Havlová et al. (2019a) Detailní charakteristiky metamorfovaných hornin v různých hloubkových horizontech lze najít v Bukovská et al. (2017) a Bukovská ed. (2020).

Nejistoty:

Část nejistot tkví v nedostatečných metod, používaných jak pro charakterizaci horniny, tak pro popis jejích vlastností (nově Havlová et al. 2022).

Další významnou nejistotou je nedostatek dat a vzorků pro charakterizaci v hloubkách, relevantních pro horizont ukládání radioaktivních odpadů. Pro dostatečnou charakterizaci lokality je nutno provést důkladný geologický průzkum, spojený s invazivními metodami.

Reference:

BIRGERSSON L. A NERETNIEKS I. (1990): Diffusion in the matrix of granitic rock: Field test in Stripa mine. *Water Resource Res.* Vol. 26, 2833–2842.

BUKOVSKÁ Z. ED. (2020): Získání dat z hlubokých horizontů dolu Rožná. – MS SURAO ZZ 464/2020, Praha.

BUKOVSKÁ Z., VERNER K., BRÁZDA L., BURIÁNEK D., DOBEŠ P., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ B., ERBAN V., FRANĚK J., HALODOVÁ P., HANÁK J., HAVLOVÁ V., HOLEČEK J., JAČKOVÁ I., JELÉNEK J., KAŠPAR V., KOLOMÁ K., KOPAČKOVÁ V., KOUČKA L., KUČETA 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. – MS SÚRAO, ZZ 191/2017, Praha.

GASCOYNE M., STROES S., SARGENT F. P. (1995): Geochemical influence on the design, construction and operation of a nuclear waste vault. *Applied Geochemistry*, 10, 657–671.

HANÁK J., CHLUPÁČOVÁ M., ONDRA P. (2017): Stanovení petrofyzikálních charakteristik horninového prostředí pro území potenciálních lokalit HÚ – MS SURAO, TZ 103/2017, SURAO, Praha.

HAVLOVÁ V., KOLOMÁ K., BRÁZDA L., RUKAVIČKOVÁ L. (2019a): Odhad hodnot transportní charakteristiky krystalinických hornin Českého masivu. Revize 1. – MS SÚRAO, TZ 102/2017, Praha.

HAVLOVÁ V., ZUNA M., BRÁZDA L., KOLOMÁ K., GALEKOVÁ E., ROSENDORF T., JANKOVSKÝ F. (2019b): Migrační procesy radionuklidů v prostředí krystalických hornin a migrační parametry hornin Českého masivu. Revize 1. – MS SÚRAO, ZZ 333/2018, Praha.

HAVLOVÁ V., BEDRNÍKOVÁ E., VEČERNÍK P., KOLOMÁ K., VOPÁLKA D., DRTINOVÁ B., BABOROVÁ L. (2022): Shrnutí postupů využívaných pro predikci retardačních parametrů bariér a migrace radionuklidů v HÚ. – MS SURAO, TZ 593/2022. SURAO, Praha

LANYON, G. W. AND BLECHSMIDT, I. (2008): Hydraulic interference between CFM and LTD Experiments. NAGRA report NAB 08-11.

- LOFGREN M. A NERETNIEKS I. (2003): Formation factor logging by electrical methods – Comparison of formation factor logs obtained in situ and in the laboratory. J. Contam. Hydrol. 61, 107-115.”
- KOTELNIKOVA, S., & PEDERSEN, K. (1998). Microbial O₂ consumption in the Aespoe tunnel. SKB Report TR 99-17. SKB Stockholm.
- MALMSTROEM, M., BANWART, S., DURO, L., WERSIN, P., & BRUNO, J. (1995). Biotite and chlorite weathering at 25 degrees C: the dependence of pH and (bi)carbonate on weathering kinetics, dissolution stoichiometry, and solubility; and the relation to redox conditions in granitic aquifers. SKB Report TR 95-01. SKB Stockholm.
- PUIGDOMENECH, I., AMBROSI, J. P., EISENLOHR, L., LARTIGUE, J. E., BANWART, S. A., BATEMAN, K., MILODOWSKI, A. E., WEST, J. M., GRIFFAULT, L., GUSTAFSSON, E., HAMA, K., YOSHIDA, H., KOTELNIKOVA, S., PEDERSEN, K., MICHAUD, V., TROTIGNON, L., RIVAS PEREZ, J., & TULLBORG, E. L. (2001). O₂ depletion in granitic media The Rex project. SKB Report TR 01-05. SKB Stockholm.
- SKAGIUS M. (1986): Diffusion of dissolved species in the matrix of some Swedish crystalline rocks. PhD thesis. KTH, Stockholm, Sweden.

6.7.4 Složení podzemní vody

Popis:

Podle zprávy Pačese et al. (2009) nelze přesně definovat, jaké je ideální složení vody z hlediska migrace a interakce v poli vzdálených interakcí. Hlavním předpokladem je, aby pH vody bylo vyšší než 6,5 a nižší než 9,5. Mimo tyto limity se zvyšuje rozpustnost většiny hydroxidů a oxidů potenciálně toxických kovů. Význam Eh vody závisí na pH a měl by ležet v oblasti tzv. hluboké zóny, která je ve vyvřelých a metamorfovaných horninách charakterizována stabilním hematitem a magnetitem (Pačes 1972) a obvykle vyšší salinitou podzemní vody (např. Bukovská et al. 2017; 2020).

Každá z potenciálních lokalit bude charakterizována individuálním složením podzemních vod (Havlová et al. 2019). Obsahy a vzájemné poměry hlavních iontů v podzemních vodách jsou dány zejména:

- složením infiltrující vody;
- charakterem horninového prostředí, kterým voda protéká (chemické složení, míra porušení, zvětrání, druhotné změny, mineralogické výplně puklin, propustnost hornin, textura hornin);
- délkou (hloubkou) oběhu podzemní vody;
- dobou zdržení podzemní vody v horninovém prostředí;
- morfologií terénu, která má vliv na hydraulický gradient a rychlost toku podzemní vody.

Výše uvedené parametry jsou pro každou lokalitu specifické. Specifické proto je i složení podzemní vody na lokalitách s obdobnými horninovými typy. Podzemní vodou zde chápeme především vodu v puklinovém systému.

Meteorické vody, tj. podzemní vody atmosférického původu po průniku puklinami do horninového masivu reagují nejvíce s plagioklasy, potom se slídkami a draselnými živci

a prakticky nereagují s křemenem (viz kap. Interakce hornina – podzemní voda 7.4.3.1). Z akcesorických minerálů se rozpouští apatit, amfiboly a případný pyroxen. Kromě těchto základních horninotvorných minerálů podzemní vody reagují s rozptýlenými minerály železa, zejména hematitem, magnetitem a pyritem a s žilnými výplněmi puklin V žilách bývá reaktivní fluorit a hlavně karbonáty, většinou kalcit. Kromě minerálů, podzemní voda reaguje s plyny přítomnými v horninovém prostředí. Ta obsahuje jednak CO₂ biogenního původu v půdě, jednak CO₂ hlubinného, vesměs magmatického původu. (Pačes a Mikšová eds. 2013). Obsah rozpuštěného CO₂ může mít vliv na korozi, případně rozpouštění karbonátů v montomorillonitu (Havlová et al. 2018).

Dále jsou významné procesy, kterých se účastní rozpuštěný kyslík a méně často sulfan (H₂S). Současně budou plyny uvolňovány i z HÚ (zejména H₂, CO₂ a CH₄). Tyto plyny se budou rozpouštět v podzemní vodě. Rozpustnost plynů bude závislá na teplotě, parciálním tlaku plynu a minoritně na složení podzemní vody / celkových rozpuštěných látkách (salinitě). Jelikož salinita jednotlivých podzemních vod na potenciálních lokalitách se velmi málo liší, můžeme toto hledisko zcela zanedbat (Havlová et al. 2018).

Výskyt rozpuštěného O₂, CO₂ a H₂S je pro úložiště nežádoucí (Havlová et al. 2018).

Chemické složení podzemní vody v granitech může být ve větších hloubkách ovlivněno vyluhováním zbytkových fosilních roztoků a solí v mezizrných pórech a také rozpouštěním plynokapalných uzavření v minerálech. Tyto uzavření obsahují vysoké procento chloridu sodného a vápenatého (Pačes a Mikšová eds. 2013). Tyto interakce pak přispívají k vytvoření zonálnosti podzemních vod, typické pro Český masiv Ca-HCO₃ → Na-HCO₃ → Na-Cl (Pačes 1983; Bukovská et al. 2017). Pod zónou rychlého oběhu se v hloubce mohou vyskytovat vyskytují vody s vysokou mineralizací – solanky (Pačes a Mikšová eds 2013). Jejich původ není často zcela zřejmý. Může jít o staré fosilní vody zasáklé ze starých moří, nebo může jít o rozpuštěné zbytkové sole spojené s krystalizací magmatu a metamorfózou hornin za zvýšených tlaků a teplot. V krystalických horninách mají tyto solanky obvykle složení Na-Ca-Cl až Ca-Na-Cl a jejich koncentrace je obvykle nižší než v sedimentárních pánvích, většinou kolem 150 g/l (Pačes a Mikšová eds 2013). Lze však předpokládat, že pro potenciální umístění HÚ budou zvoleny lokality, kde se tyto vody vyskytovat nebudou.

Významným procesem jsou reakce zprostředkované autotrofními mikroorganismy, a pokud je v granitu přítomná organická hmota, pak mohou být procesy interakce mezi vodou a horninou ovlivněny i organismy heterotrofními (Pačes a Mikšová eds. 2013).

Kromě oběhu podzemní vody v puklinách mohou být v pórovém prostoru přítomny různé typy fluid. Patří mezi ně: a) voda v mikrofrakturách, kde není prakticky žádný tok, b) voda v pórovém prostoru horniny, která je přístupná pouze difúzí, c) voda uložená v izolovaných pórech a d) tekutina uzavřená v inkluzích. Pojem pórová voda, jak se zde používá, odkazuje k vodě v propojeném systému pórů, která je dostupná pro transport s dominující difúzní složkou (Waber et al. 2008).

Proudění podzemní vody v krystalinických horninách se odehrává především v puklinové síti, případně na zlomových pásmech. Tyto puklinové sítě mívají často odlišné mineralogické složení od zbytku okolní méně propustné horniny. S tím souvisí i odlišné chemické složení podzemní vody hlavních přítoků na zlomových pásmech od pórové vody nacházející se v neporušené hornině. Kromě jiného mineralogického prostředí hraje roli také pomalý pohyb podzemní vody v neporušené hornině, kde se mohou vytvářet geochemické rovnováhy (Waber et al. 2008). Jen málo je známo o složení pórových vod ve spojení pórovitosti z nízko

propustných částí masivu ($T < 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) podloží. Důležité v tomto aspektu je to, že dochází ke kontinuální výměně mezi pórovou vodou a formační podzemní vodou cirkulující v puklinách. Většina inkluzí minerálních fluid obsahuje zbytky magmatických, metamorfovaných a/nebo hydrotermálních tekutin a jejich složení je často velmi slané, což může mít vliv na složení pórové vody (např. při podrcení horniny). Za předpokladu, že se taková tekutina uvolní ze svého hostitelského minerálu do propojené porozity, vytvoří se mezi pórovou vodou a vodou v puklinách s advektivním prouděním chemický gradient. Chemický gradient se pak může stát hlavní hnací silou při nízkých Pecletových číslech, tj. dominantní transportním procesem se stane difúze. Taková interakce bude probíhat v obou směrech, dokud bude existovat chemický gradient mezi pórovou vodou a vodou v puklině (Waber et al. 2008). Zde je pak možno hledat vysvětlení disproporce např. mezi obsahem Na^+ v podzemní stagnantní vodě a predikcí jeho uvolnění na základě ekvibrace s horninou (Bukovská et al. 2020).

Je důležité si také připomenout, že složení roztoku v těchto horninách bude dáno i interakcemi mezi minerály horniny a roztokem v pórovém prostoru. Můžeme předpokládat, že některé minerály jsou reaktivnější (zejm. sekundární minerály, jako jsou kaolinit, chlorit) než horninotvorné minerály typu křemen nebo živce. Složení vody v takových pórech, kde nedochází k advektivnímu proudění, by pak mělo odrážet i prostorovou variabilitu minerálního složení (Bath 2011).

Z hlediska dlouhodobého vývoje HÚ je nutné brát v potaz dlouhodobé procesy Země, které mohou ovlivnit stav a bezpečnost úložiště. Mezi tyto dlouhodobé změny patří:

- klimatické změny (viz kap. 8.2),
- denudace a eroze (viz kap. 7.4.2).

Pravděpodobně jednou z nejvýraznějších vlivů klimatických změn je vliv klimatu na hydrologii v přípovrchových vrstvách. Vlivem této změny může dojít ke zvýšení či ke snížení koncentrace radionuklidů v přípovrchových vrstvách v důsledku snížení či zvýšení jejich ředění ostatními zdroji podzemní vody (Vokál et al. 2010a).

Pro naše úvahy jsou významné dvě události (na podkladě Nývlt a Dobrovolný 2015), a to ať už vlivem chladného klimatu (viz kap. 8.2.1) nebo teplého klimatu (viz kap. 8.2.2):

- intruze vod s vysokým obsahem kyslíku a nízkou mineralizací tak, jak to mu bývá v předpolí ledovce (uvažováno zejména ve Švédsku a ve Finsku),
- vznik uzavřeného oběhu podzemních vod a případně přítomnost solanky.

V obou případech by došlo k ovlivnění složení pórové vody a změně složení podzemní vody v puklinovém systému. Byla by tedy ovlivněna především speciace radionuklidů (viz kap. 7.4.4.1). Na druhou stranu lze předpokládat následnou reakci složek roztoku s horninou, kdy je uvažována především oxidace minerálů Fe(II) a spotřeba kyslíku z roztoku na tento proces (Malmstroem et al., 1995).

Vliv na bezpečnost:

Předpokládá se, že hlavním geochemickým činitelem, jímž může horninové prostředí působit na inženýrské bariéry HÚ, je podzemní voda v puklinovém systému. Minoritní vliv je očekáván u nestabilních akcesorických minerálů horniny a u plynných, přirozeně se vyskytujících fází (např. hlubinný CO_2 , pokud by byl přítomen; Havlová et al. 2018). Negativním ovlivněním se v tomto případě myslí jakékoliv ovlivnění zejména inženýrských bariér HÚ (ukládací obalové soubory VJP, bentonitové těsnění ukládacích míst, zásypy všech přístupových prostor,

betonové konstrukční prvky a betonkontejnery sekce VAO), které by mohlo přímo (např. ovlivněním stability jílových a akcesorických minerálů, ovlivněním geochemických dějů) či nepřímo (např. změnou bobtnací schopnosti bentonitového těsnění) vést k předčasnému selhání bezpečnostních funkcí těchto bariér (Havlová et al. 2018).

Otázka, zda může difúze v horninové matici působit jako retardační faktor pro transport radionuklidů, závisí na přítomnosti vzájemně propojeného systému pórů, který obsahuje roztok, tj. pórovou vodu, kde může dojít k transportu rozpuštěných látek. Kromě toho bude tato voda pórů v průběhu času interagovat s materiály bariéry úložiště (např. bentonit, kontejner), což potenciálně povede ke zhoršení jejich fyzikálních vlastností. Z hlediska posouzení bezpečnosti je proto důležité znát složení pórové vody a její vývoj v nedávné geologické době během posledních tisíců až stovek tisíc let v souladu s očekávanou životností úložiště (Waber et al. 2008).

Dostupná data:

Statistickou distribuci hlavních složek podzemních vod v Českém masivu uvádějí Pačes a Mikšová eds (2013).

Hydrochemickou zonálnost vod v PVP Bukov až do hloubky cca 1200 m studovala Rukavičková v práci Bukovská et al. (2017) a Bukovská eds. (2020). Vyhodnocení složení podzemní vody na potenciálních lokalitách reportovala Havlová et al. (2015) a Červinka a Gondolli (2016), ačkoli většina dat pocházela z hloubek do 100 m. Parametry podzemní vody, které zajišťují její slučitelnost s inženýrskými bariérami, jsou definované v Havlová et al. (2018).

Jen málo je známo o složení pórových vod ve spojené pórovitosti z nízko propustných částí masivu ($T < 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) podloží velkých hloubek. Za stagnujících hydraulických podmínek se předpokládá, že pórové vody v krystalickém horninovém složení mají složení velmi salinní, což bylo potvrzeno například studii na poloostrovu Kola v Rusku (NEDRA 1992), v Kanadě a USA (Gascoyne et al. 1996; Grimaud et al. 1990; Couture et al. 1983), a v Německu (Moller et al. 1997).

Studii s použitím různých technik pro odběr pórové vody či vody dlouhodobě stagnantní testovali Zuna et al. pro odběry z PVP Bukov na různých etážích (Bukovská et al. 2020).

Nejistoty:

Informace o chemickém složení vod v krystalinických horninách Českého masivu jsou spíše kusé. Jsou dostupná např. data z podzemní laboratoře Bukov (Bukovská et al. 2017, 2020) nebo z vrtů na lokalitě Potůčky (300 m, Pačes a Mikšová eds. 2013). Nicméně informace o složení vod hlubšího oběhu na potenciálních lokalitách pro umístění HÚ chybí.

Většinu roztoků obsaženého v pórovém prostoru nelze odebrat pomocí konvenčních technik odběru vzorků podzemní vody. Nicméně jsou vyvíjeny a testovány inovativní metodiky chemické a izotopové charakterizace pórové vody. Pro získání pórové vody jsou aplikovány dva základní přístupy. Prvním řešením je přímý odběr pórové vody z vrtů, které jsou opatřeny speciálními pakry. Tento postup je ovšem časově velice náročný, a proto se častěji využívají tzv. nepřímé metody charakterizace pórové vody (Waber a Smellie 2008; Smellie et al. 2003).

Reference:

- BATH (2011): Infiltration of dilute groundwaters and resulting groundwater compositions at repository depth. – Report 2011:22. SSM, Sweden.
- BUKOVSKÁ Z. ED. (2020): Získání dat z hlubokých horizontů dolu Rožná. – MS SÚRAO ZZ 464/2020, Praha.
- BUKOVSKÁ Z., VERNER K., BRÁZDA L., BURIÁNEK D., DOBEŠ P., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ B., ERBAN V., FRANĚK J., HALODOVÁ P., HANÁK J., HAVLOVÁ V., HOLEČEK J., JAČKOVÁ I., JELÉNEK J., KAŠPAR V., KOLOMÁ K., KOPAČKOVÁ V., KOUCKÁ L., KUČETA 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. – MS SÚRAO, ZZ 191/2017, Praha.
- COUTURE R.A., SEITZ M.G., STEINDLER M.J. (1983): Sampling of brine in cores of Precambrian granite from northern Illinois. – J. Geophys. 88B, 7331–7334. de Marsily, G., Gonc_alves, J., Violette,
- ČERVINKA R., GONDOLLI J. (2016): Výběr reprezentativních podzemních vod a příprava jejich syntetických ekvivalentů. - TZ 41/2016. SÚRAO Praha, 122 str.
- GASCOUYNE M. (2004). Hydrogeochemistry, groundwater ages and sources of salts in a granitic batholith on the Canadian Shield, southeastern Manitoba. – Appl. Geochem. 19, 519–560.
- GASCOUYNE M., ROSS J.D., WATSON R.L. (1996): Highly saline pore fluids in the rock matrix of a granitic batholith on the Canadian Shield. – In: Abstr.: 30th International Geological Congress, Beijing, China, August, 1996.
- GRIMAUD D., BEAUCAIRE C., MICHARD G. (1990): Modelling of the evolution of ground waters in a granite system at low temperature: the Stripa ground waters, Sweden. – Applied Geochemistry 5, 515-525.
- HAVLOVÁ V., VIDENSKÁ K., GONDOLLI J., MILICKÝ M., GVOŽDÍK L., KRÁLOVCOVÁ J., RUKAVIČKOVÁ L. (2015): Migrační procesy radionuklidů v prostředí krystalických hornin a migrační parametry hornin Českého masivu. TZ 13/2015. SÚRAO Praha, 122 str.
- HAVLOVÁ V., PERTOLDOVÁ J., BUKOVSKÁ Z., MIXA P., MILICKÝ M., ŘÍHA J., HROCH T., ŠTĚDRÁ V., ČERVINKA R. (2018a): Hierarchie kritérií či indikátorů vhodnosti lokalit a způsob hodnocení lokalit. – MS SÚRAO TZ 285/2018, Praha.
- HAVLOVÁ V., ZUNA M., BRÁZDA L., KOLOMÁ K., GALEKOVÁ E., ROSENDORF T., JANKOVSKÝ F. (2019): Migrační procesy radionuklidů v prostředí krystalických hornin a migrační parametry hornin Českého masivu. Revize 1. – MS SÚRAO, ZZ 333/2018, Praha.
- MOLLER P., WEISE S.M., ALTHAUS E., BACK W., BEHR H.J., BORCHARDT R., BRÄUER K., DRESCHER J., ERZINGER J., FABER E., HANSEN B.T., HORN E., HUENGES E., KÄMPF H., KESSELS W., KIRSTEN T., LANDWEHR D., LODEMANN M., MACHON L., PEKDEGER A., PIELOW H.U., REUTEL C., SIMON K., WALTHER J., WEINLICH F.H., ZIMMER M. (1997): Palaeofluids and recent fluids in the upper continental crust: results from the German continental deep drilling program (KTB). – J. Geophys. Res. 102, 18233–18254.
- KOTELNIKOVA, S., & PEDERSEN, K. (1998). Microbial O₂ consumption in the Aespoe tunnel. SKB Report TR 99-17. SKB Stockholm.

- MALMSTROEM, M., BANWART, S., DURO, L., WERSIN, P., & BRUNO, J. (1995). Biotite and chlorite weathering at 25 degrees C: the dependence of pH and (bi)carbonate on weathering kinetics, dissolution stoichiometry, and solubility; and the relation to redox conditions in granitic aquifers. SKB Report TR 95-01. SKB Stockholm.
- NEDRA 1992. Characterisation of crystalline rocks in deep boreholes: The Kola, Krivoy Rog and Tyrnauz boreholes. – SKB Technical Report (TR-92-39). SKB, Stockholm, Sweden.
- NÝVLT D., DOBROVOLNÝ P. (2015): Klimatická stabilita území. Závěrečná zpráva. MS SÚRAO ZZ 22/2015, Praha. – MS SÚRAO TZ 232/2018, Praha.
- PAČES T. (1972): Chemické rovnováhy v přírodním systému voda-hornina-atmosféra. - Knihovna Ústředního ústavu geologického, Svazek 43. ÚUG Praha, pp.193.
- PAČES T. (1983): Základy geochemie vod. 300 str., Academia, Praha.
- PAČES T. A MIKŠOVÁ J. eds (2013): Far field of the geological repository in the Bohemian Massif. Czech Geological Survey, 1st edition, 346 pp.
- PAČES T., RUKAVIČKOVÁ L., HOLEČEK J. (2009): Expertní odhad hydraulických a hydrochemických parametrů. - Dílčí závěrečná zpráva č. 3.3. Příloha Průběžná technické zprávy č. 4 projektu Výzkum procesů pole vzdálených interakcí HÚ vyhořelého jaderného paliva a vysoce aktivních odpadů, sdružení Geobariéra. Registrační č. Geofondu 1291/2007 z 1.6.2007.
- VOKÁL A., HAVLOVÁ V., HERCÍK M., LANDA J., LUKIN D., VEJSADA J. (2010a): Aktualizace referenčního projektu hlubinného úložiště radioaktivních odpadů v hypotetické lokalitě. III. Etapa. Studie zadávací bezpečnostní zprávy. C. Dokumentační část. C.2 Hodnocení dlouhodobé bezpečnosti HÚ. Zpráva ÚJV Řež, a.s. EGP 5014-F-101420, 12/2010.
- WABER H.N., SMELLIE J.A.T. (2008): Characterisation of pore water in crystalline rocks. – Applied Geochemistry 23, 1834-1861.

6.7.5 Složení plynu

Popis:

Horninové prostředí lze rozdělit na systém, ve kterém se vyskytují pevné (horninová zrna), kapalné (podzemní voda) a plynné složky.

Plynnou složku mohou představovat plyny, a to jak atmosférického původu zejména ovzdušné (N_2 a O_2), tak hlubšího původu (CO_2 , H_2S , CH_4) nebo biochemického původu (CO_2 , CH_4 , H_2S , NH_3 aj.). V některých případech mohou být měřeny i vzácné plyny (He ad. Pačes 1983, 2011).

Kapalnou složku představuje podzemní voda, jejíž složení je výsledkem vzájemného působení srážkových a povrchových vod, podzemní atmosféry a horninového prostředí a závisí na chemickém složení každé z těchto interagujících složek. Podzemní vody často obsahují rozpuštěné plyny – zejména plyny ze vzduchu (N_2 a O_2) vody hlubšího oběhu (metamorfní nebo juvenilní vody) - CO_2 , H_2S , CH_4 nebo biochemického původu (CO_2 , CH_4 , H_2S , NH_3 aj.). V některých případech mohou být měřeny i vzácné plyny (He ad.).

Rozpustnost plynů v podzemní vodě závisí nejvíce na hydrostatickém tlaku a teplotě. Jejich rozpustnost má tendenci se zvyšovat s hloubkou v důsledku zvýšení hydrostatického tlaku, ale je snížena zvýšením teploty podzemní vody a slanosti.

Zároveň s hydrochemickou zónalností podzemní vod (kap. 6.7.4) lze pozorovat i změny ve složení rozpuštěných plynů a v hodnotách oxidačně redukčního potenciálu. V povrchových zónách převládá asociace plynů O_2 - CO_2 - N_2 a potenciál dosahuje hodnot +0,4 V. Hluběji převládá asociace N_2 - CO_2 a potenciál je blízký 0 V. V nejhlubších zónách se vyskytuje plynná asociace CH_4 - N_2 nebo CH_4 - N_2 - H_2S s potenciálem klesajícím k hodnotě -0,3 V (Pačes 2011; Pačes a Mikšová eds. 2013).

S hloubkou dochází k postupnému snižování koncentrace rozpuštěného kyslíku. Od koncentrace $0,1 \text{ mg.l}^{-1}$ již oxidačně-redukční stav vody neurčuje redukce kyslíku, ale procesy kterými jsou například redukce síranů na sulfidickou síru, redukce oxidu uhličitého na methan a redukce prvků s rozdílným oxidačním číslem.

Plyny se mohou sorbovat na površích pevných fází, čímž brání nebo zpomalují migraci radionuklidů nebo jiných kontaminantů, které jsou transportovány v plynné formě.

Specifickou otázkou je přítomnost radonu v horninách. $Rn-222$ vzniká radioaktivní přeměnou $U-238$. Obecně lze říci, že v usazených, sedimentárních horninách se setkáváme s nižšími koncentracemi uranu než v horninách přeměněných, metamorfovaných tlakem a teplotou během dlouhé geologické historie jejich vzniku. Nejvyšší koncentrace uranu jsou obvyklé ve vyvěřelých, magmatických horninách, jako jsou např. žuly (<http://www.geology.cz/extranet/vav/geologicka-rizika/radon#>).

Vliv na bezpečnost:

Rozdíl hustoty mezi plynnou fází a dalšími přítomnými tekutými fázemi mohou ovlivnit rychlosti a směry pohybu plynu a následnou migraci radionuklidů a dalších kontaminantů obsažených v plynu. Vztlak plynu vzhledem k vodě může způsobit, že radionuklidy a jiné kontaminanty v plynné formě migrují obecně nahoru. Plyny se mohou také sorbovat na površích pevných fází, čímž brání nebo zpomalují migraci radionuklidů nebo jiných kontaminantů, které jsou transportovány v plynné formě.

Interakce mezi plynnou fází a jakýmkoli dalšími přítomnými fázemi mohou ovlivnit rozdělování radionuklidů a jiných kontaminantů mezi plyn a ostatní fáze. Některé plyny jsou například rozpustnější ve vodě než jiné; za příslušných podmínek je CO_2 rozpustnější ve vodě než CH_4 , takže ^{14}C ve formě CO_2 bude mít tendenci se více rozdělovat do koexistující vodné fáze než by ^{14}C ve formě CH_4 . Tyto interakce mezi plyny a jinými fázemi (včetně vývoje plynu z jiných tekutin nebo rozpouštění plynu v těchto tekutinách) budou záviset na změnách tlaku a/nebo teploty a/nebo chemického prostředí (např. pH, salinita) podél migrační dráhy. Přítomnost plynů ovlivňuje i pH a Eh interagujícího roztoku (Havlová et al. 2018).

Přítomnost O_2 a rozpuštěného CO_2 v kombinaci s nízkým pH může negativním způsobem ovlivňovat fungování inženýrských bariér, a to zejména korozi UOS, stabilitu jílových minerálů a betonových komponent HÚ (Havlová et al. 2018).

Přítomnost radonu ovlivňuje spíše provozní bezpečnost.

Dostupná data:

Vývoj obsahu plynů v podzemním prostředí (hloubkovou zonálnost) popisuje v kombinaci s hloubkovou a oxidačně redukční zonálností s odkazy na prostředí Českého masivu ve svých pracích Pačes (1972, 1983, 2011).

Rizikové oblasti radonu jsou vyznačeny na 214 mapách radonového indexu geologického podloží v měřítku 1:50 000, pokrývající celé území České republiky (<http://www.geology.cz/aplikace/geohazardy/katalog/geohazard-12/>)

Nejistoty:

Nelze najít mnoho přímých informací o složení plynu na potenciálních lokalitách pro umístění HÚ v ČR. I v detailním popisu z lokality Potůčky z 200 m hlubokého vrtu je možno najít popis základního chemismu vod v žulovém masivu, nikoli však obsah plynů (Pačes a Mikšová eds. 2013).

Reference:

HAVLOVÁ V., PERTOLDOVÁ J., BUKOVSKÁ Z., MIXA P., MILICKÝ M., ŘÍHA J., HROCH T., ŠTĚDRÁ V., ČERVINKA R. (2018a): Hierarchie kritérií či indikátorů vhodnosti lokalit a způsob hodnocení lokalit. – MS SÚRAO TZ 285/2018, Praha.

PAČES T. A MIKŠOVÁ J. eds (2013): Far field of the geological repository in the Bohemian Massif. Czech Geological Survey, 1st edition, 346 pp.

PAČES T. (1972): Chemické rovnováhy v přírodním systému voda-hornina-atmosféra. - Knihovna Ústředního ústavu geologického, Svazek 43. ÚUG Praha, pp.193.

PAČES T. (1983): Základy geochemie vod. 300 str., Academia, Praha.

PAČES T. (2011) Úvod do hydrogeochemie. Skripta. Technická univerzita v Liberci, pp. 79.

Geohazards <http://www.geology.cz/aplikace/geohazardy/katalog/geohazard-12/>

7 Procesy probíhající v různých fázích vývoje úložiště

Počátečním stavem pro popis vlastností horninového masivu byl stav před vědomým zásahem člověka. Procesy, které v horninovém masivu probíhají, mohou být výstavbou úložiště a jeho provozem ve větší či menší míře ovlivněny.

Výskyt procesů a jejich vliv na bezpečnost jsou popsány v několika charakteristických obdobích:

- Období výstavby úložiště;
- Období provozu a uzavírání úložiště;
- Období po uzavření úložiště.

7.1 Termální procesy

7.1.1 Procesy přenosu tepla v horninovém prostředí

Popis:

Procesy přenosu tepla v horninovém prostředí zahrnují následující základní procesy:

- kondukce tepla,
- konvekce tepla,
- advekce tepla,
- radiace tepla.

Kondukce neboli vedení tepla, je proces, při kterém částice s vyšší kinetickou energií (teplotou) předávají svoji energii okolním částicím s nižší kinetickou energií. Částice hmoty se v tomto případě nepřemisťují, ale pouze kmitají okolo své rovnovážné polohy a srážkami s okolními částicemi předávají svoji vyšší vnitřní energii okolním částicím.

V homogenním izotropním prostředí se přenos tepla kondukcí řídí dle obecné Fourierovy rovnice:

$$\frac{\delta T}{\delta t} = a \left(\frac{\delta^2 T}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta z^2} \right)$$

kde:

a je součinitel teplotní vodivosti (m²/s)

T je teplota (K)

t je čas (s)

Vedení tepla kondukcí probíhá pouze za neustáleného stavu, kdy v prostředí existuje teplotní spád (gradient). Čím větší je teplotní spád a čím větší je součinitel teplotní vodivosti prostředí, tím efektivnější je kondukce tepla. Přenos tepla kondukcí je možný v pevném, kapalném i plynném prostředí.

Konvekce je způsob přenosu tepla prouděním, kdy částice hmoty s vyšší kinetickou energií jsou v prostoru přemisťovány do svého okolí, kde se nachází částice s nižší kinetickou energií

(teplotou). Přenos tepla konvekcí není možný v pevných látkách, protože v pevných látkách se jednotlivé částice nemohou pohybovat a přesouvat. Konvekce se uplatňuje pouze v kapalinách a plynech. Hnací silou konvekce je gravitační síla a rozdílná hustota látky v poli s teplotním gradientem. Vedení tepla konvekcí je zpravidla rychlejší než vedení kondukcí. Na molekulární úrovni se molekuly látky po přivedení tepelné energie rozpínají. Jak roste teplota tekutiny dané hmotnosti, musí se ve stejném poměru zvětšovat i objem. Tento jev způsobuje vytlačování a tekutina s nižší hustotou následně stoupá a zatlačuje hustší chladnější kapalinu dolů. Tato řada událostí představuje vznik konvekčních proudů.

Rovnice pro rychlost přenosu tepla konvekcí se vypočítá následovně:

$$Q = h_k \cdot A \cdot (T_p - T_t)$$

kde

Q = teplo přenesené za jednotku času (J)

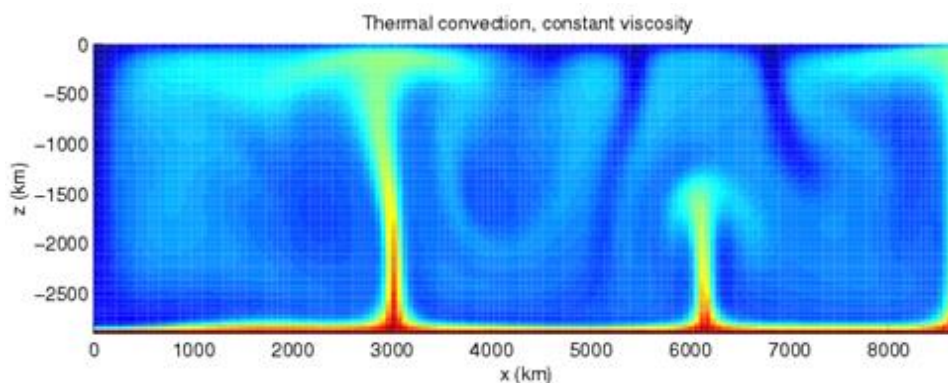
h_k = součinitel přenosu tepla konvekcí ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)

A = teplosměnná plocha povrchu (m^2)

T_p = teplota povrchu (K)

T_t = teplota tekutiny (K)

Konvektivní proudy tekutin v horninovém prostředí mají vertikální směr a jejich vznik je mimo jiné podmíněn velikostí (šířkou) puklin, která musí být dostatečná pro vytvoření turbulentního advektivního proudu (Obr. 9).



Obr. 9 Příklad termálního konvektivního proudu v zemském plášti. Obdobný mechanismus se projevuje i v mnohem menším měřítku v dostatečně širokých puklinách v horninovém prostředí. (H. Schmeling, 2002)

Advekce tepla je obdobně jako proces konvekce přenos tepla prouděním, avšak v tomto případě se jedná o přesun tekutin (tok) vynuceným vnějšími silami. V puklinách horninového prostředí většinou gradientem hydraulického pole. Z hlediska efektivity a rychlosti přenosu tepla ve zvodnělém horninovém prostředí hraje advekce zcela zásadní roli a je numericky řešena pomocí transportních úloh. Na teplo obsažené v podzemní vodě je následně nahlíženo jako na jakoukoliv jinou přítomnou konzervativní látku. Z povahy procesu se advekce může uplatňovat pouze v kapalinách a plynech.

Radiace neboli záření (sálání) tepla je způsob šíření tepla prostřednictvím vyzařovaných elektromagnetických vln o vlnových délkách $\lambda = 0,3$ až $100 \mu\text{m}$. Pohyb nabitých protonů a elektronů v hmotě vede k vyzařování elektromagnetického záření.

Při kolizi těchto elektromagnetických vln s hmotou dochází k interakci a přenosu tepla na hmotu. Všechny materiály s absolutní teplotou větší 0 K vyzařují tepelnou energii. Míra tepelného záření je závislá na teplotě, a čím teplejší je těleso, tím více tepelné energie vyzařuje. Teplota tělesa ovlivňuje vlnovou délku a kmitočet vyzařovaných vln. Se zvyšující se teplotou se zkracují vlnové délky v rámci spekter emitovaného záření a dochází k vyzařování kratších vlnových délek záření s vyšší frekvencí. Tepelné záření se vypočítá pomocí Stefan–Boltzmannova vztahu:

$$P = e \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_r^4 - T_c^4)$$

P = čistý vyzařený výkon (W)

A = vyzařující plocha (m^2)

T_r = teplota zářiče (K)

T_c = teplota okolí (K)

e = emisivita tělesa

σ = Stefan–Boltzmannova konstanta

Emisivita ideálního zářícího tělesa má hodnotu 1. Běžné materiály mají nižší hodnoty emisivity. Hodnota emisivity se liší nejen v závislosti na složení materiálu, ale je závislá též na jeho aktuální teplotě. Význam sálavého tepla je zejména na kontaktu tělesa (horniny) s vyšší teplotou s tělesem o nižší teplotě.

Procesy šíření tepla v horninovém prostředí budou probíhat na všech čtyřech kandidátních lokalitách HÚ obdobným způsobem. Vždy se bude jednat o kombinaci všech možných procesů termálního přenosu, avšak významnost jednotlivých procesů se bude lišit jak na různých lokalitách, tak i v rámci jediné lokality. Například v místech s přítomností zvodnělého tektonického porušení horninového prostředí bude převládat proces advekce či případně konvekce. Naopak v místech neporušeného horninového masivu bude významnější proces kondukce. Kvantifikace významnosti jednotlivých procesů přenosu tepla bude předmětem budoucího podrobnějšího výzkumu jak parametrů horninového prostředí, tak i matematického modelování šíření tepla na kandidátních lokalitách HÚ.

Vliv na bezpečnost:

Procesy přenosu tepla v horninovém prostředí mají vliv na bezpečnost provozu a konstrukcí HÚ. Vlastnosti horninového prostředí (petrologie, přítomnost tektoniky či zvodnění) ovlivňují procesy šíření tepla z HÚ do svého okolí a následně i design vlastního HÚ. Obecně platí, že čím nižší je variabilita horninového prostředí, tím lépe lze popsat procesy přenosu tepla z HÚ a modelovat, simulovat transport tepla, konstruovat vlastní úložiště. Přenos tepla v horninovém prostředí v okolí HÚ bude mít vliv na mechanické vlastnosti hornin, zejména jejich roztažnost a bude ovlivňovat též migraci fluid v puklinovém prostředí. Na bezpečnost je přímý vliv nicméně relativně malý, komplikace se mohou vyskytovat zejména při zjištěné významné variabilitě vlastností hornin, které mají vliv na procesy přenosu tepla.

Dostupná data:

Procesy přenosu tepla jsou dynamické jevy závislé na proměnlivých veličinách. Tyto procesy jsou obecně známy a popsány matematickými vztahy a existují softwarové nástroje pro jejich modelování. Některé z potřebných parametrů (veličin) výpočtů jsou specifické pro konkrétní místo a jeho vlastnosti, či jsou závislé na dalších dynamicky proměnných veličinách. Není tedy možné sestavit obecnou datovou sadu popisující procesy přenosu tepla v horninovém prostředí. Informace o stavu šíření tepla v horninovém prostředí budou získávány pomocí matematického modelování, které bude zohledňovat konkrétní scénáře stavu a časového vývoje prostředí HÚ a budou postupně zpřesňovány na základě nově získávaných dat v průběhu výzkumu, ale i výstavby a provozu HÚ

Nejistoty:

V prostorovém kontextu horninového prostředí lze nejistotu interpretovat s ohledem na posuzovanou oblast, jako množství chybějící informace (Wellmann a Regenauer-Lieb 2012). Za současného stavu omezeného poznání horninového prostředí zájmových lokalit nelze nejistotu ve vztahu k jednotlivým parametrům ovlivňující procesy šíření tepla v místě HÚ a jeho okolí kvantifikovat.

Doporučení:

Pro významné snížení popsaných nejistot doporučujeme realizaci rozsáhlejších průzkumných prací včetně vytvoření statisticky robustních datových sad parametrů platných pro jednotlivé kandidátní lokality, které jsou potřebné pro následné matematické modelování procesů šíření tepla z HÚ do svého okolí. V reálném prostředí se bude teplo šířit současně všemi možnými způsoby přenosu tepla. Je třeba kvantifikovat míru významnosti jednotlivých procesů šíření tepla a tyto procesy následně matematicky modelovat dle konkrétních scénářů.

Reference:

SCHMELING H. (2002): Numerisches Modell von Mantelkonvektion Quelle, Frankfurt University.

WELLMANN F., REGENAUER-LIEB K. (2012): Uncertainties have a meaning: Information entropy as a quality measure for 3-D geological models. Tectonophysics. 526-529. 207-216. 10.1016/j.tecto.2011.05.001.

Vyhláška č. 378/2016 Sb., o umístění jaderného zařízení, ve znění pozdějších předpisů.

7.2 Hydraulické procesy

7.2.1 Pukliny (rozpuštění a precipitace minerálů na puklinách, hydrotermální alterace na puklině)

Popis:

Změny minerálního složení hornin mohou nastat v důsledku působení různě teplých a různě mineralizovaných roztoků cirkulujících v horninovém masivu podél významných hydraulicky aktivních zlomových, puklinových a pórových systémů. Působení roztoků na horninové prostředí je závislé na chemismu a teplotě kolujících roztoků, vzdálenosti od zdroje tepla i prostupnosti horninového prostředí, které je roztoky ovlivňováno. Výšeteplotní minerální

změny horninového prostředí, probíhající v důsledku hydrotermálních změn podél lokalizovaných tektonických struktur, vázané na magmatické, vulkanické či tektonické endogenní děje, jsou popsány v kapitole 6.5.4. V rámci těchto dějů jsou vysráženy různé typy hydrotermálních minerálních asociací na stěnách křehkých poruch v důsledku precipitace z temperovaných fluid pocházejících ze zdrojů v hlubších krustálních polohách, nebo souvisejí s metamorfními procesy a postihují horninové prostředí penetrativně v celém objemu.

Nízkoteplotní roztoky, vznikající při pronikání povrchových vod do hloubky, mohou být postupně nabohacovány různými prvky a jejich ionty typu Fe, Mn, Ca, Na, K, Cl, SiO₂, CO₂, apod. Formy vysrážení minerálních sloučenin jsou omezeny na ojedinělé nízkoteplotní síranové, chloridové, zeolitové a karbonátové mineralizace či povlaky hydroxidů Fe a Mn. Čím vyšší je teplota cirkulujících roztoků a vliv pH, tím vyšší je jejich schopnost rozpouštět okolní minerály a transportovat je do jiných částí horninového masívu.

Vysrážení rozpuštěných složek probíhá v závislosti na změně fyzikálně-chemických podmínek, tedy na snížení teploty, změně tlaku či chemického složení okolní horniny, např. při mísení s podzemní vodou z jiného zdroje. Proudění výrazně chladnějších mělkých podzemních vod a slabých roztoků exogenního původu se také v omezené míře projevuje na změnách minerálního složení a výplni puklinových systémů, vždy v závislosti na reaktivitě horniny vůči proudícímu roztoku o určitém složení. Např. karbonáty jsou snadno rozpustné v kyselých roztocích, což má význam při selektivním krasovém rozpouštění karbonátových čoček a karbonátových poloh v erlanech. Naopak živce nebo akcesorické sulfidy a jiné sloučeniny kovů mohou být destabilizovány síranovými a uhličitánovými roztoky či chloridovými komplexy. Konkrétní litologicky podmíněné interakce mezi podzemními vodami a puklinovými systémy jsou dány složením podzemních vod, převažujícím v určitém prostředí (převážně síranové složení CaSO₄ ve vodách mělkého oběhu, hydrogenuhličitánové Ca-HCO₃ a Mg-HCO₃ ve vodách hlubšího oběhu, Ca-(Na-)SO₄ v zalesněných územích, s kontaminací dusičnanů v urbánních oblastech, uvedeným v hydrogeologických kapitolách hodnocení lokalit (Havlová et al. 2019).

Nejběžnější změnou hornin v přízlomových zónách je argilitizace, degradace alterovaných draselných živců a plagioklasů na jílové minerály (illit, kaolinit), které postupně vyplňují tektonické poruchy. Jílové minerály mohou případně znovu dále postupně rekrystalovat při změně tlakového či teplotního režimu. V terénech tvořených metamorfovanými horninami byly zjištěny přípovrchové puklinové zóny do hloubky 50 m, převážně bez druhotné mineralizace. Rozpukání granitového masívu dosahuje lokálně až do hloubky okolo 120 m (Březový potok). Jiné lokality mají poměrně dobře dokumentované zlomy a mylonitové zóny s drenážní funkcí a vyšší mineralizací podzemních vod vč. obsahů radioaktivních prvků, avšak nízkou hustotu puklin v horninovém masívu (Březový potok), na lokalitě Horka je díky melagranitovému (durbachitovému) prostředí rovněž relativně zvýšený obsah radioaktivních prvků a Mg, živce podél puklin a mylonitových zón jsou hematitizovány a prokřemeněny a protkány mladšími karbonátovými žilkami.

Kromě toho se epizodicky v přípovrchovém oběhu mohou hromadit i mechanické přeplavené, převážně jílové výplně, které mohou negativně ovlivňovat mechanickou propustnost puklinových i průlinových struktur. V území tvořeném granitoidy je propustnost podloží lepší než v oblastech tvořených migmatity a pararulami, kde jílovité eluvium částečně brání průsaku povrchových vod do puklinových systémů.

Vliv na bezpečnost:

Intenzita změn horninového prostředí v důsledku puklinového koloběhu podzemních a minerálních vod je závislá na hustotě a propojení puklinové a zlomové sítě a chemických a teplotních parametrech cirkulujících vod. Podle hodnocení lokalit (Havlová et al. 2020 a, e, f, g) je parametr rozpukání horninového masívu hodnocen převážně jako slabý (stupeň 1), maximálně stupeň 2. Významný objem cirkulujících chemicky reaktivních spodních vod nebyl z dosavadních průzkumných prací uváděn. V případě dalších průzkumných a ověřovacích prací by bylo vhodné sledovat cirkulaci a chemismus vod zejména v blízkosti karbonátových hornin s výskytem krasových jevů, případně míst s výskytem sulfidické mineralizace. Minerální změny hornin postižených rozsáhlým rozpukáním se zvýšenou prostupností podzemních vod mohou mít hypoteticky vliv na sorpční vlastnosti horninového masívu. Vzhledem k nízkým teplotám podzemních vod však není pravděpodobné, že by srážení a rozpouštění chemických látek významně ovlivňovalo horninové prostředí vybraných lokalit.

Dostupná data:

Konkrétní charakter a typy alterací postihující puklinové systémy jsou částečně dokumentovány popisem geologické stavby a geologickými modely a zhodnoceny pro konkrétní horninová prostředí jednotlivých tří lokalit Hrádek, Březový potok a Horka (Franěk et al. 2018; Švagera et al. 2016) a ETE-Jih (Navrátilová a Noll 2017). Hydrogeologické charakteristiky modelují směr proudění podzemních vod, dokumentují jejich chemismus a změny teploty (Havlová et al. 2020 a, e, f, g). Podrobný geofyzikální průzkum upřesnil rozsah tektonického porušení, přítomnost vodonosných zlomových struktur a zón intenzivního rozpukání a tím i zvýšené chemické ovlivnění a navětrání skalního masívu (Mixa et al. 2019; Beneš et al. 2019).

Nejistoty:

Interakce nízkoteplotních podzemních vod a horninového prostředí a náhlé změny chemismu vod i druhotná mineralizace rozpukaných hornin může být vázána na prostorově omezené anomální části jinak homogenních horninových bloků zejména v pokročile migmatitizovaných partiích moldanubika a okrajích granitových masívů s výskytem žilných hornin. Podrobný geologický, geochemický a hydrogeologický průzkum doplněný vrtnými pracemi a pracemi in situ v horninovém prostředí je nezbytný pro vyloučení všech typů anomálních situací včetně lokálních změn v minerální charakteristice tektonicky postiženého horninového masívu. Nejistotou je také komplikovanost odhadu stáří vysrážení či rekrytalizace puklinové mineralizace a tím i odhad možnosti opakování či periodicity chemických či tektonických procesů vedoucích k jejímu vzniku v budoucnu.

Doporučení:

Lze doporučit sledování chemického složení podzemních vod a jejich změny v závislosti na horninovém prostředí, zejména výskyt atypických sloučenin a příměsí zvyšujících agresivitu vod či naznačující zvýšenou výměnu chemických složek mezi vodou a horninou, které by mohly ovlivňovat bezpečnostní parametry tohoto prostředí. Výskyt alterací hornin a minerálů v puklinových zónách, v přípovrchových kolektorech a podél zlomových pásem může být faktorem snižujícím homogenitu horninového prostředí a při hodnocení je třeba jej respektovat.

Reference:

- BENEŠ, V., BELOV, T., JIRKŮ, J., BUNEŠ, J., BÁRTA, J. (2019): Ověření geologických struktur lokality Hrádek geofyzikálními metodami. Závěrečná zpráva. MS SÚRAO, TZ 435/2019, 76 str.
- FRANĚK J., BUKOVSKÁ Z., BURIÁNEK D., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ B., GRUNDLOCH J., HOLEČEK J., JELÉNEK J., JELÍNEK J., KLOMÍNSKÝ J., KRYŠTOFOVÁ E., KUČERA R., KUNCEOVÁ E., KŮRKOVÁ I., NAHODILOVÁ R., PACHEROVÁ P., PERTOLDOVÁ J., PEŘESTÝ V., RUKAVIČKOVÁ L., SOEJONO I., ŠVAGERA O., VERNER K., ŽÁČEK V. (2018): Závěrečná zpráva 3D strukturně – geologické modely potenciálních lokalit HÚ. MS SÚRAO, TZ 229/2018, Praha, 594 str.
- HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., BAIER, J., MILICKÝ, M., POLÁK, M., BUKOVSKÁ, Z., ČERNÝ, M., DUŠEK, K., FIFERNOVÁ, M., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., HOLEČEK J., JELÉNEK, J., JANKOVEC, J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., KUNCEOVÁ, E., PETYNYIAK, O., RAPPRIK, V., RUKAVIČKOVÁ, L., SOEJONO, I., ŠVAGERA, O., UHLÍK, J., VOJTĚCHOVÁ, H., ŽÁČKOVÁ, E. (2020a): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Březový potok. MS SÚRAO, TZ 447/2020, 62 str.
- HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., JANKOVEC, J., UHLÍK, J., ČERNÝ, M., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., BAIER, J., DUŠEK, K., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., HEJTMÁNKOVÁ, P., HOLEČEK J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., MILICKÝ, M., NAHODILOVÁ, R., PACHEROVÁ, P., PETYNYIAK, O., PEŘESTÝ, V., RAPPRIK, V., ŘIHOŠEK, J., RUKAVIČKOVÁ, L., ŠVAGERA, O., POLÁK, M., VOJTĚCHOVÁ, H., ŽÁČKOVÁ, E. (2020e): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Janoch (ETE-jih). MS SÚRAO, TZ 451/2020, 63 str.
- HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., UHLÍK, J., JANKOVEC, J., MILICKÝ, M., BAIER, J., BURIÁNEK, D., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ, B., DUŠEK, K., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., GRUNDLOCH, J., HOLEČEK J., JELÉNEK, J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., KUNCEOVÁ, E., PETYNYIAK, O., POLÁK, M., RAPPRIK, V., RUKAVIČKOVÁ, L., ŠVAGERA, O., VOJTĚCHOVÁ, H. (2020f): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Horka. MS SÚRAO, TZ 452/2020, 63 str.
- HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., BAIER, J., MILICKÝ, M., BUKOVSKÁ, Z., ČERNÝ, M., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ, B., DUŠEK, K., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., HOLEČEK J., JANKOVEC, J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., KUNCEOVÁ, E., PETYNYIAK, O., POLÁK, M., RAPPRIK, V., RUKAVIČKOVÁ, L., ŠVAGERA, O., URÍK, J., VOJTĚCHOVÁ, H., ŽÁČKOVÁ, E. (2020g): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Hrádek. MS SÚRAO, 453/2020, 63 str.
- MIXA P., SKÁCELOVÁ Z., PERTOLDOVÁ J., BUKOVSKÁ Z., BURIÁNEK D., DUDÍKOVÁ B., FRANĚK J., HRDLIČKOVÁ K., JELÍNEK J., NAHODILOVÁ R., SOEJONO I., VERNER K., ŽÁČEK V. (2019): Shrnutí výsledků geologických a geofyzikálních výzkumných prací provedených v období 9/2017–6/2019 pro aktualizaci hodnocení potenciálních lokalit hlubinného úložiště RAO. MS SÚRAO, TZ 412/2019, Praha, 427 str.
- NAVRÁTILOVÁ, V., NOLL, O., KAŠPAR, R., LANČA, D., MIŠUREC, J., NEDVĚD, J., RAJCHL, M., SOSNA, K., ŠINDELÁŘ, M., TLAMSA, J., VOJTĚCHOVSKÁ A. (2017): Zpráva o provedení geologicko-výzkumných prací na lokalitě ETE-jih. Závěrečná zpráva, MS SÚRAO, 280 str.

ŠVAGERA, O., BUKOVSKÁ, Z., ČEJCHANOVÁ, A., FRANĚK, J., JELÉNEK, J., MLČOCH, B., PERTOLDOVÁ, J., SKÁCELOVÁ, Z., SOEJONO, I., VERNER, K., MILICKÝ, M., BARTÁŠKOVÁ, L. (2016): Regionální 3D strukturně geologický model lokality Březový potok. Technická zpráva MS S

7.2.2 Změna proudění podzemní vody v puklinách vlivem geologických procesů

Popis:

Podzemní voda v dominantní části geologického prostředí, které představuje z hlediska bezpečnosti HÚ geologickou bariéru, proudí v puklinové síti. Velikost proudění (ve smyslu objemové hustoty toku) je závislá na hydraulickém odporu prostředí a velikosti hydraulického gradientu. Hydraulický odpor v puklinovém prostředí je dán efektivním hydraulickým rozevřením jednotlivých puklin. Soubor puklin sítě, který ve směru poklesu hydraulického gradientu vykazuje nejnižší hydraulický odpor, vytváří preferenční konduktivní dráhu. V nasycené hydrogeologickém puklinovém prostředí podzemní voda proudí propojeným systémem dílčích drah, které se od sebe v závislosti na odporu odlišují objemovou hustotou toku, a tedy i skutečnou rychlostí a velikostí průtoku podzemní vody.

Podle § 18, odst. 2, písm. g), i), či j) vyhlášky č. 378/2016 Sb. musí být posouzen výskyt endogenních a exogenních jevů. Posouzení těchto jevů je třeba provést nejen z hlediska stability samotného úložiště, ale i z hlediska režimu proudění podzemní vody (a tedy i transportu potenciální kontaminace). V průběhu vývoje hydrogeologického masivu se obecně hydraulická vodivost masivu mění v závislosti na geologických procesech, které v něm probíhají a jejich intenzitě. Rozdílnost současných hydrogeologických parametrů na kandidátních lokalitách se do značné míry odvíjí od geologických procesů, které se na lokalitě odehrály v minulosti. Změny hydraulického odporu puklinového prostředí (tedy změny konduktivity puklinové sítě) vlivem endogenních procesů souvisí především se změnou tlakových podmínek v masivu (působení litostatického, hydrostatického a orientovaného tlaku). V původní magmatické hornině docházelo ke vzniku puklin při jeho chladnutí. K dalšímu rozšiřování a změnám geometrie a parametrů puklinové sítě do současného stavu docházelo v důsledku hydrotermálních procesů, orogenezí, metamorfních procesů, vyklenování a odlehčování povrchu a seismické činnosti. Tyto procesy se výjimkou geodynamických jevů zahrnujících odlehčování povrchu a seismickou činnost v následujících statisících až milionu letech na území českého masivu nepředpokládají.

Změny proudění v puklinové síti mohou způsobit i procesy, které lze označit jako exogenní geologické procesy. Jedná se hlavně o zvětrávání a na něj navazující procesy jako eroze a denudace povrchu. Důsledkem těchto procesů jsou změny konfigurace terénu a tím změny infiltračních a drenážních vlastností lokality. V důsledku toho se mění hydraulický gradient oblasti, což má vliv na konfiguraci konduktivních preferenčních drah pro proudění podzemní vody, přestože k vlastní změně geometrie puklinové sítě v hlubokém masivu nedochází.

Vliv na bezpečnost:

V současných podmínkách prostředí českého masivu s minimální hydrotermální aktivitou a vysokou seismickou stabilitou jsou významné změny propustnosti hostitelského prostředí vlivem změn efektivního hydraulického rozevření puklin v důsledku endogenních geologických procesů málo pravděpodobné. Potenciální změnu hydraulických parametrů vlivem

zemětřesení není možné na základě dostupných informací kvantifikovat. Exogenní geologické procesy (např. eroze), které v budoucnosti na kandidátních lokalitách nastanou, budou určitou měrou měnit proudění v puklinové síti. Podle studie (Nývlt, D., Dobrovolný, P., 2015) zpracovávající předpokládaný vývoj klimatu by ale změny neměly mít na hydrogeologii zásadní charakter.

Dostupná data:

V rámci projektu *Výzkumná podpora pro bezpečnost hlubinného úložiště* byla realizována studie Klimatická stabilita území (Nývlt, D., Dobrovolný, P., 2015). Autoři předpokládají, že vliv klimatických podmínek v potenciálním období glaciálu i interglaciálu na hydrogeologický režim HÚ zůstane obdobný dnešním podmínkám. Zhodnocení seismického ohrožení (Málek, J. et al., 2018) bylo provedeno pravděpodobnostní metodou. Jako výchozí podklad byl použit katalog historických zemětřesení. Získané výsledky z hlediska seismického ohrožení nevyklučují výstavbu HÚ v kandidátních lokalitách za předpokladu, že bude zajištěna odpovídající seismická odolnost prováděných staveb.

Posouzení exogenních geologických procesů, které budou mít vliv na reliéf terénu, a tedy i charakter drenážních bází a infiltračních oblastí bylo provedeno v rámci hodnocení potenciálních lokalit (kritérium K7c, in Vondrovic a kol. 2019). Obecný vliv možných změn na hydrogeologické podmínky, bez vazby na potenciální lokality, je zčásti hodnocen ve výzkumném úkolu TAČR TA04020506 GEOTRAN.

Nejistoty:

Potenciální změnu hydraulických parametrů puklinové sítě vlivem zemětřesení není možné na základě dostupných informací kvantifikovat. Stejně tak nelze předvídat vývoj změn způsobených proudění v puklinové síti vlivem erozních a denudačních procesů v dlouhodobém časovém horizontu. Je možné změny režimu proudění podzemní vody pomocí prediktivních transienčních simulací s vývojem okrajových podmínek analyzovat, v současnosti ale není k dispozici dostatečné množství dat pro stávající podmínky, aby měli prediktivní simulace dostatečnou validitu.

Reference:

NÝVLT, D., DOBROVOLNÝ, P. (2015): Klimatická stabilita území – Závěrečná zpráva, Česká geologická služba, TZ 22/2015 SÚRAO.

MÁLEK, J., PRACHAŘ, I., VACKÁŘ, J., MAZANEC, M. (2018): Pravděpodobnostní hodnocení seismického ohrožení lokalit vybraných pro umístění hlubinného úložiště, SÚRAO – TZ 232/2018.

VONDROVIC ET AL. (2020): Výběr potenciálních lokalit hlubinného úložiště v ČR pro navazující etapu prací po roce 2020. – MS SÚRAO, TZ 465/2020.

7.2.3 Změna proudění vlivem klimatických změn

Popis:

Při ukládání VJP je nezbytné zohlednit dlouhodobý vývoj klimatu, aby bylo možné vyhodnotit odolnost systému geologického bariéry vůči potenciálním změnám. Během kvartéru (cca 2,6 mil. roků) dochází k cyklicky se opakujícím globálním změnám klimatu. Důsledkem jsou na

severní polokouli doby ledové v trvání cca 100 tisíc let a meziledové, trvající cca 20 tisíc let. Nástup doby ledové provází vznik a rozšíření zalednění a permafrostu a rozsáhlé změny v hydrologických a hydrogeologických poměrech území díky odlišné infiltraci, drenáži, dynamice zvětrávání a denudace a změně výskytu vegetace. V průběhu pleistocénu byl na území ČR vyvinut permafrost do hloubky maximálně 250 m (Czudek, 1968; Růžičková et Zeman, 1992). Predikce vývoje klimatu na následujících 100 000 let ukazují, že území ČR bude s pravděpodobně mimo dosahu zalednění (Boulton et al., 2001, Lord et al., 2019).

Vliv změn klimatu na režim proudění podzemní vody v HÚ a jeho okolí spočívá především ve změně intenzity a prostorovém rozložení infiltrace. Změny velikosti a druhu srážek (tj. deště nebo sněhu) potenciálně ovlivní rychlost eroze a ukládání sedimentů, což povede ke změně velikosti hydraulického gradientu díky změně režimu drenáže v širší oblasti HÚ. Změny v režimu proudění ovlivní transport radionuklidů z úložiště do míst drenáže podzemních vod.

V období s výskytem periglaciálních jevů změna proudění podzemní vody souvisí se sezónním cyklem od zimního zamrznání k letnímu tání s velkými pohyby povrchové vody a s potenciální erozí. Voda z tajícího sněhu nemůže permafrostem infiltrovat a sytí povrchovou vrstvu a toky – dochází k výrazné erozi a soliflukci. Zároveň permafrost částečně izoluje režim proudění podzemní vody od povrchové hydrologie. Zamrznání půdy tak ovlivňuje množství podzemní vody v horninovém masivu HÚ a jeho okolí i hydraulický gradient a prostorovou distribuci toku podzemní vody. Oddělení hlubokého a mělkého proudění podzemní vody permafrostem by z hlediska potenciální bezpečnosti HÚ mělo spíše pozitivní přínos.

V klimatických obdobích interglaciálů se subtropickým až pouštním podnebím bude docházet k omezení velikosti infiltrace podzemní vody, která může mít za následek změnu hydraulického gradientu vlivem poklesu hladiny podzemní vody a změny polohy drenážních bází oblasti. Dojde ke snížení intenzity proudění podzemní vody v geologické bariéře. Doplnování zásob podzemní vody bude definováno zřídka se vyskytujícími bouřkovými událostmi. V případě vývoje klimatu směrem k tropickému podnebí se mohou vyskytovat extrémní výkyvy počasí (monzuny, hurikány), které mohou mít za následek určité zvýšení infiltrace podzemní vody a intenzifikaci jejího proudění.

Vliv na bezpečnost:

Změny proudění podzemní vody vlivem změny klimatu by mohly ovlivnit bezpečnost úložiště v důsledku změny režimu proudění podzemní vody v úložišti a jeho okolí. Změny v množství srážek a výparu a sezónní ledové a sněhové pokrývky změní režim doplňování podzemních vod. Kromě změny intenzity a rychlosti proudění dojde patrně i ovlivnění chemického složení podzemní vody. Změny klimatu výrazně ovlivní procesy na rozhraní geologické bariéry a biosféry vzhledem ke změnám polohy a charakteru drenážních bází.

Dostupná data:

V rámci projektu *Výzkumná podpora pro bezpečnost hlubinného úložiště* byla realizována studie *Klimatická stabilita území* (Nývt, D., Dobrovolný, P., 2015). V rámci této studie byl formulován závěr, že: „Detailní průběh počasí a klimatu je na škále 100 tisíc let nepredikovatelný. Jediné, co lze s větší jistotou říci, je značné zvýšení variability klimatu v prostoru Střední Evropy.“ Autoři nicméně předpokládají, že vliv klimatických podmínek v potenciálním období glaciálu i interglaciálu na hydrogeologický režim HÚ zůstane obdobný dnešním podmínkám. Modelování vlivu potenciálních změn klimatu na režim proudění podzemní vody a transport kontaminace z prostoru HÚ se aktuálně zabývá projekt

TA04020506 GEOTRAN, kde jsou možné dopady změn hydrogeologického režimu v důsledku různých klimatických scénářů vývoje modelovány pomocí programů MODFLOW, MT3D, FLOW123d a FEFLOW.

Nejistoty:

Vývoj klimatu, a tedy i jeho vliv na proudění podzemní vody v geologické bariéře lze s pomocí klimatických a na ně navázaných hydrogeologických modelů uspokojivě predikovat v rámci následujících stovek let. Předpověď vývoje klimatu v řádů tisíců a statisíců let je zatížena vysokou mírou nejistoty. Komplexní analýzu potenciálních změn režimu proudění podzemní vody lze realizovat pomocí prediktivních vývojových hydrogeologických modelů. Podmínkou realizace takových modelů je zpracování konkrétních klimatických scénářů a na ně navazujících geologických a hydrologických analýz. Při současné míře poznání lokalit (bez hloubkového průzkumu) jsou ale i modelové simulace současného stavu zatíženy vyšší mírou nejistoty, která se přenesení i do výsledků predikcí.

Reference:

LORD N.S., LUNT D., THORNE M. (2019): Modelling changes in climate over the next 1 million years. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management. TR-19-09.PDF

CZUDEK, T. (1986): Pleistocenní permafrost na území Československa, Geograf. Čas, 38, 45-252, Bratislava

RŮŽIČKOVÁ, E., ZEMAN, E. (1992): The Blahutovice – 1 borehole near Hranice na Moravě: weathering effects in Badenian deposits. SCRIPTA, 22: 128-132.

BOULTON, G.S., KAUTSKY, U., MORÉN, L., WALLROTH, T. (2001): Impact of long-term climate change on a deep geological repository for spent nuclear fuel. SKB Technical Report, TR-99-05

NUCLEAR ENERGY AGENCY (2019): International Features, Events And Processes (IFEP) List For The Deep Geological Disposal Of Radioactive Waste, Version 3.0

NÝVLT, D., DOBROVOLNÝ, P. (2015): Klimatická stabilita území – Závěrečná zpráva, Česká geologická služba, TZ 22/2015 SÚRAO

7.2.4 Změna proudění podzemní vody vlivem činnosti člověka

Popis:

Proudění podzemní vody ve všech osídlených oblastech v současnosti významně ovlivňuje činnost člověka. V prostoru HÚ a inženýrských bariér, stejně jako v zóně biosférických procesů, představuje činnost člověka zásadní faktor. V případě prostředí geologické bariéry HÚ je vzhledem k volbě kandidátních lokalit riziko ovlivnění proudění po uzavření HÚ menší.

Změna proudění podzemní vody v horninovém masivu geologické bariéry HÚ vlivem člověka je potenciálně možná přímo při zásazích do hydraulického režimu struktury spojených s hlubinnou těžbou, podzemními stavbami nebo hlubokými vrtnými pracemi (např. pro tepelná čerpadla), nebo zprostředkovaně zásahem do procesu infiltrace nebo drenáže podzemní vody. Proces výběru lokality je nastaven tak, aby k přímému zásahu do režimu proudění v geologické bariéře lokality HÚ nebyl důvod (v kandidátních lokalitách nejsou těžitelná ložiska

nerostných surovin nebo zdroje minerálních a termálních vod). Lokalizace HÚ v prostředí hydrogeologického masivu snižuje i riziko nepřímého ovlivnění proudění podzemní vody vodohospodářským využitím, protože toto prostředí ani v drenážních oblastech neumožňuje intenzivní vodohospodářské využití, které by vyvolalo významnější změnu směru, velikosti a rychlosti proudění v geologické bariéře.

Největší změnou proudění v horninovém masivu vyvolanou lidskou činností bude vlastní realizace HÚ. V etapě budování HÚ bude s postupující hornickou činností vytvářena deprese v hydraulickém tlakovém poli při přirozené drenáži podzemní vody do důlního díla. Největší míru ovlivnění přirozeného režimu lze očekávat v období provozu úložiště, kdy se postupně vytvoří kvazi-ustálený stav, ve kterém bude báze HÚ představovat hlavní drenážní bázi a tlakové pole bude charakteristické výrazným hydraulickým gradientem (hladinou podzemní vody v infiltračních oblastech a bází HÚ s atmosférickým tlakem). Po uzavření HÚ bude po určité období docházet k ustalování režimu proudění podzemní vody, který po ustálení bude obdobný jako před zahájením stavby. Rozdílem bude zvýšení hydraulického odporu v prostoru uzavřeného izolovaného HÚ. Vzhledem k předpokládaným hydraulickým vodivostem (tedy odporovým parametrům konektivní sítě puklin) v prostoru bezprostředního okolí HÚ bude ale změna oproti původním poměrům málo významná. Dalším rozdílem bude potenciální snížení hydraulického odporu v prostředí EDZ, která vznikne při výstavbě úložiště. (kap. 7.6). Nelze ale zcela vyloučit možnost, že i prostorově velmi omezená hydraulicky vodivá zóna EDZ umožní při nepříznivých parametrech okolního prostředí vznik preferenční cesty proudění. Možný vliv EDZ na proces proudění podzemní vody je podrobněji popsán v kap. 7.6.3.

Vliv na bezpečnost:

Kandidátní lokality byly vybrány i s ohledem na bezpečnost geologické bariéry vzhledem k zásahům lidské činnosti. To se týká i režimu proudění, kdy ve zvolených oblastech není předpokládána činnost, která by ho mohla významnou měrou ovlivnit. V dlouhodobém horizontu vývoje využití území však nelze zcela vyloučit možné zásahy do hydrogeologického režimu v geologické bariéře, které by spolu s degradací obalových souborů a těsnících bariér mohly zvyšovat riziko šíření kontaminace.

Dostupná data:

Kritéria hodnocení lokalit včetně charakteristik, které by mohly vést k narušení bezpečnosti HÚ budoucími aktivitami člověka, jako jsou přítomnost zdrojů nerostných surovin, podzemní vody či geotermálních zdrojů jsou popsány ve zprávě (Vondrovic a kol., 2019). Vlastnosti kandidátních lokalit vzhledem k těmto kritériím a režim proudění vody při současné úrovni znalostí, zhodnocený pomocí hydrogeologických matematických modelů, je přehledně uveden v (Havlová et al., 2020 a, e, f, g).

Nejistoty:

Tlakové poměry proudění v lokalitě HÚ lze komplexně popsat pomocí matematického modelu proudění podzemní vody. Případný vliv konkrétní činnosti člověka na proudění podzemní vody lze predikovat těmito modely a snížit tak riziko negativního vývoje. Nejistota hodnocení pak spočívá v nejistotách modelu daných nejčastěji nedostatkem kvalitních vstupních a kalibračních dat.

Reference:

- HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., BAIER, J., MILICKÝ, M., POLÁK, M., BUKOVSKÁ, Z., ČERNÝ, M., DUŠEK, K., FIFERNOVÁ, M., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., HOLEČEK J., JELÍNEK, J., JANKOVEC, J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., KUNCEOVÁ, E., PETYNYIAK, O., RAPPRIK, V., RUKAVIČKOVÁ, L., SOEJONO, I., ŠVAGERA, O., UHLÍK, J., VOJTĚCHOVÁ, H., ŽÁČKOVÁ, E. (2020a): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Březový potok. MS SÚRAO, TZ 447/2020, 62 str.
- HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., JANKOVEC, J., UHLÍK, J., ČERNÝ, M., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., BAIER, J., DUŠEK, K., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., HEJTMÁNKOVÁ, P., HOLEČEK J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., MILICKÝ, M., NAHODILOVÁ, R., PACHEROVÁ, P., PETYNYIAK, O., PEŘESTÝ, V., RAPPRIK, V., ŘIHOŠEK, J., RUKAVIČKOVÁ, L., ŠVAGERA, O., POLÁK, M., VOJTĚCHOVÁ, H., ŽÁČKOVÁ, E. (2020e): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Janoch (ETE-jih). MS SÚRAO, TZ 451/2020, 63 str.
- HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., UHLÍK, J., JANKOVEC, J., MILICKÝ, M., BAIER, J., BURIÁNEK, D., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ, B., DUŠEK, K., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., GRUNDLOCH, J., HOLEČEK J., JELÍNEK, J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., KUNCEOVÁ, E., PETYNYIAK, O., POLÁK, M., RAPPRIK, V., RUKAVIČKOVÁ, L., ŠVAGERA, O., VOJTĚCHOVÁ, H. (2020f): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Horka. MS SÚRAO, TZ 452/2020, 63 str.
- HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., BAIER, J., MILICKÝ, M., BUKOVSKÁ, Z., ČERNÝ, M., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ, B., DUŠEK, K., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., HOLEČEK J., JANKOVEC, J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., KUNCEOVÁ, E., PETYNYIAK, O., POLÁK, M., RAPPRIK, V., RUKAVIČKOVÁ, L., ŠVAGERA, O., URÍK, J., VOJTĚCHOVÁ, H., ŽÁČKOVÁ, E. (2020g): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Hrádek. MS SÚRAO, 453/2020, 63 str.
- VONDROVIC ET AL. (2019): Metodika zúžení počtu lokalit pro hlubinné úložiště v ČR v letech 2019-2020. – MS SÚRAO, TZ 423/2019

7.3 Mechanické procesy

7.3.1 Tektonika (reaktivace křehkých struktur – pohyby na zlomech)

Popis:

Tektonika se zabývá studiem strukturní stavby zemské kůry v lokálním i regionálním měřítku, primárně pak její dynamikou a poruchami. Spadá pod ní studium deformace, ať už křehké nebo plastické a zabývá se otázkami, jako je například stavba litosféry a astenosféry. V regionálním měřítku se tento obor nazývá geotektonika. Existuje samozřejmě i mikrotektonika, řešící principy deformace v mikroskopickém měřítku. Tektonika tedy zahrnuje teoretické studium mechanismu deformací, stejně jako projevy a druhy deformace, a to ve všech měřítkách. Do pojmu tektoniky se dají zařadit i pohyby na zlomech a zlomová analýza.

Zlomem rozumíme křehkou strukturu (poruchu, plochu nespojitosti/diskontinuity) v hornině pod různými úhly, kde je zřejmé, že podél ní došlo k pozorovatelnému pohybu. Délka zlomů je velmi variabilní a může být v řádech několika metrů, ale u stovek kilometrů. Přemístění podél zlomové plochy se rovněž pohybuje ve variabilních řádech od decimetrů až po kilometry. Zároveň rozeznáváme zlomy aktivní, na kterých je stále akomodováno napětí a dochází k pohybu a pasivní, u kterých se pohyb zastavil. Pohyby na zlomu můžeme shrnout do třech základních typů. A sice pokles, násun a horizontální posun. Pohyb na zlomu se chápe v tom smyslu, že máme dva bloky horniny, které jsou odděleny zlomem (poruchou). Blok, který je „pod“ zlomem (podložní blok) zůstává statický a pohyb na zlomu popisujeme u bloku „nad zlomem“ (nadožní blok). Ten vůči podložnímu bloku může vykonávat pohyb nahoru, rozumějme násun, pohyb dolů, tím se rozumí pokles, nebo pohyb doleva/doprava, tím se rozumí horizontální posun. Pokud jsme z kinematických indikátorů na zlomové ploše schopni určit, že se blok pohyboval doleva, říkáme tomu sinistrální kinematika, pohyboval-li se blok doprava, jedná se o dextrální kinematiku. Toto jsou tři základní pohyby na zlomech. V přírodě ale bývá běžné, že dochází ke kombinaci těchto základních pohybů a výsledná kinematika na zlomu je tak složitější. Míra přemístění podél zlomu může být v řádech decimetrů, ale i kilometrů. Směr a charakter pohybu na zlomech můžeme nejčastěji pozorovat podle striací, což je „rýhování“ na ploše zlomu paralelní se směrem pohybu. Následně je často nutné pozorovat další kinematické indikátory, které nám pomohou určit, jestli je zlom násunového/poklesového charakteru, nebo se jedná o horizontální posun, či o kombinaci již zmíněných.

Z hlediska zlomové tektoniky je Český masív složitou mozaikou ker různé velikosti, důležitosti i stáří, ovlivněnou poslední, tedy neoidní (saxonskou) tektogenezí. Nejstarší zlomový systém Českého masívu probíhal ve směru V-Z, podřízený systém ve směru S - J. Během kadomského geotektonického cyklu se vytvořil základní zlomový systém hlubokých zlomů směru SV-JZ a SZ-JV, jako např. jáchymovský, labská zóna, středočeský, přibyslavský, litoměřický a sázavský. Základní zlomové systémy Českého masívu (SZ-JV, SV-JZ, V-Z a S-J) podmiňují tedy jeho složitou mozaikovou (blokovou) stavbu a na tomto základě můžeme dále rozlišovat bloky krušnohorský, tepelsko-barrandienský, moldanubický, labský, sudetský, slezský a blok, který leží již v podloží Karpatské soustavy. Bloková stavba Českého masívu je výsledkem tektogeneze kadomského, variského a v závěrečné a konečné podobě, neoidního cyklu.

Křehké struktury (jak puklinové, tak zlomové systémy) mohou být takzvaně reaktivovány. Tím se rozumí působení nového napěťového pole (které ale může být stejného charakteru jako původní napěťové pole) na již vzniklé puklinové a zlomové systémy. Tento jev je pozorovatelný primárně na zlomech (ale i na puklinách) a zároveň na foliačních plochách, kdy následně může dojít k novému pohybu podél těchto ploch. Foliační plochou se rozumí planární stavba horniny vzniklá v rámci plastické/duktilní deformace, kdy se jednotlivé minerály, ze kterých je hornina složena, texturně i orientací přizpůsobují deformaci/metamorfóze, dochází k rekrystalizaci a vytvoření planární (plošné) stavby v hornině. Tato stavba se podobá vrstevnatosti, jakou mají sedimentární horniny, ale na rozdíl od nich je geneze foliace spojena s deformací, a ne sedimentací. Zároveň je nutné vědět, že jednotlivé foliační plochy nejsou vyplněny žádným sekundárním minerálem. Při působení nového napěťového pole na již vzniklé horniny, které mají výraznou foliaci (anizotropii), může dojít právě k reaktivaci této foliace a pohybu v rámci foliačních ploch. Tento pohyb nemusí být nijak výrazný. Tyto plochy se „otevrou“ a je tak v rámci jednotlivých foliačních ploch umožněn pohyb fluid a následné „vysrážení“ minerálů na

foliačních plochách, jelikož fluida bývají nabohacena různými prvky, nejčastěji CaCO_3 a oxidy Fe, což dává za příčinu „vysrážení“/vykrytalizování nejčastěji kalcitu a pyritu (případně jiných železitých sulfidů). Poznávacím znakem reaktivované foliační plochy je tedy přítomnost sekundární minerální výplně, a někdy i rýhování – tzv. striace, a to ve směru pohybu jednotlivého bloku. Stejným principem funguje reaktivace na zlomech, pouze v tom rozdílu, že zlomová plocha je již primárně vyplněna sekundární minerální výplní (často s výraznou mocností, která je ale v rámci plochy zlomu proměnlivá) a v drtivé většině případů obsahuje striace ve směru pohybu jednotlivých bloků a další kinematické indikátory, které pomáhají určit kinematiku na zlomu ve smyslu poklesu, násunu, nebo horizontálního posunu.

Nejvýraznější zlomové systémy kategorie 1 a 2 dle klasifikace SKB (Andersson et al., 2000) na lokalitě Březový potok primárně odpovídají průběhům ZSZ–VJV a SZ–JV (komušínský, babínský zlom). Jejich rozmístění je relativně rovnoměrné. V okolí lokality ETE-Jih se jedná primárně o systémy s průběhem SV–JZ (V–Z) a SZ–JV (hlubocký zlom). Systém s průběhem SV–JZ je paralelní s vltavotýnskou střížnou zónou v severozápadním cípu území, podél které došlo během variských orogenních pochodů k jihovýchodnímu násunu severně ležícího podolského komplexu přes jednotvárnou a pestrou sérii moldanubika. Lokalita Horka je charakteristická směry zlomových pásem SSV–JJZ (vlčatínský zlom a velkomeziříčský zlom), SV–JZ (vidonínský zlom a valdíkovská mylonitová zóna), SSZ–JJV (heřmanický zlom), ZSZ–JVJ (pyšelský zlom). Na lokalitě Hrádek se nachází primárně zlomy s průběhy SSV–JJZ (v okolí Jihlavy, z části označované jako přibyslavská mylonitová zóna) které se vyskytují ve východní části vymezeného území a dále paralelně orientované zlomové pásmo severně od zájmové oblasti lokality Hrádek. Druhou skupinou výrazného křehkého porušení v regionálním měřítku jsou zlomy a zlomové zóny s průběhem ZSZ–VJV, které se nacházejí jižně od lokality v okolí Žirovnice a Nové Včelnice, táhnoucí se k Telči, a severně od lokality v okolí Humpolce.

Vliv na bezpečnost:

Aktuální systémy křehké tektoniky zachycené v daných lokalitách se v rámci výstavby, provozu a uzavření HÚ nebudou nijak razantně měnit. Proces vzniku nových a konjugovaných systému je vázán na napěťový stav, který je pro oblast Českého masivu dobře známý a zároveň stabilní v řádech tisíců až miliónů let. Křehké struktury mohou nicméně vznikat jako odezva na ražbu a práce spojené s budováním HÚ. Obecně platí, že zlomové systémy mohou být a často jsou vyplněny různorodým, intenzivně deformovaným materiálem, který je výrazně méně stabilní, než pevná okolní hornina. Z hlediska bezpečnosti je tedy žádoucí, mít povědomí o výskytu zlomových zón a práce tomu přizpůsobit.

Dostupná data:

Případně historické zprávy z archivu Geofondu (přehled literatury – mapy). Rozsáhlý soubor archivních geovědních zpráv a map je přehledně shrnutý ve zprávách, které doprovázejí detailní 3D geologické modely 7 lokalit (Franěk et al., 2018, z vybraných 4 lokalit se toto týká Horky, Hrádku a Březového potoka), a 3D geologický model ETE-Jih (Navrátilová a Noll, 2017). Data získaná v letech 2017-2019 díky geofyzikálním a geologickým výzkumům jsou pak pro všechny tyto 4 lokality shrnuta v rozsáhlé práci Mixy et al. (2019). Zároveň jsou všechny tyto podklady přehlednou a stručnější formou shrnuty ve zprávách týkajících se hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti (Havlová et al., 2020 a, e, f, g).

Nejistoty:

Posouzení bezpečnosti HÚ představuje komplexní úlohu, která vyžaduje celou řadu vstupních dat zatížených různou mírou nejistoty. Při hodnocení lokalit je důležité identifikovat a kvantifikovat různé zdroje nejistot. V prostorovém kontextu horninového prostředí lze nejistotu interpretovat s ohledem na posuzovanou oblast, jako množství chybějící informace (Wellmann a Regenauer-Lieb 2012). Za současného stavu omezeného poznání horninového prostředí zájmových lokalit nelze nejistotu ve vztahu k jednotlivým geologickým indikátorům zodpovědně kvantifikovat. Proto byly nejistoty dosud popisovány expertním odhadem.

Ohledně tektoniky a křehkých struktur je největší nejistota spojena s výskytem, průběhem, výplní, mocností výplně a propojením takovýchto struktur. Jelikož zlom může mít mocnost od desítek centimetrů až po kilometry a tato mocnost může být v rámci zlomové plochy proměnlivá, je složité takovéto zóny popisovat a studovat ve větším rozsahu. Rovněž nelze bezpečně ověřit ani průběh a propojení zlomu jako takového, jelikož můžeme narazit na konjugovaný systém s proměnlivou orientací i sklonem. Znalost celkového charakteru zlomu (a křehké tektoniky všeobecně) je tak i za přispění veškerých dostupných metod těžko predikovatelná.

Doporučení:

Ke snížení výše zmíněných nejistot doporučujeme podrobné geologické mapování povrchu, kdy se zlomy a zlomové zóny regionálnějšího charakteru projevují například přítomností sekrečního křemene, nebo zvodnělých zón v délce zlomu, případně dalšími indikacemi. Tato informace nám dá základní představu o regionálních strukturách prostupujících až k povrchu a o jejich pravděpodobném směru. Ke zjištění orientace zlomu může pomoci realizace hlubokých vrtů v kombinaci s geofyzikálními metodami, které mohou v případě mocnějších zón přinést zevrubnou informaci i o charakteru výplně. Dalším doporučením je území porovnání s digitálním modelem reliéfu (DMR), který může odhalit průběhy výraznějších zlomových zón a dále je doporučeno studium seismotektonické databáze. Kombinací těchto přístupů lze, ač s variabilní přesností, modelovat výskyt zachycených zlomových zón, jejich pravděpodobné propojení, průběhy, orientaci a mocnost v rámci 3D geologických modelů. Je ale nezbytné vést v patrnosti, že modelovaná data často nemohou zachytit přesnou informaci o zlomu. Konvenční modelovací metody pracují se zlomy jako se semi-rovinnými plochami. To v přírodě často neodpovídá skutečnosti, ale vzhledem k množství vstupních parametrů, jejich proměnlivosti a náročnosti jejich získání je toto aktuálně adekvátní metodika. Se znalostí regionálního napětového pole daného území je následně možné uvažovat o potenciální predikci zlomové sítě do 1 milionu let, kdy je predikce zatížená nejistotami popsány výše.

Reference:

- ANDERSSON J., STRÖM A., SVEMAR C., ALMÉN K.-E., ERICSSON L. E. (2000): What requirements does the KBS-3 repository make on the host rock? Geoscientific suitability indicators and criteria for siting and site evaluation. – SKB Technical Report TR-00-12, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, Stockholm, Sweden, 148 s.
- BENEŠ V., BELOV T., JIRKŮ J., BUNEŠ J., BÁRTA J. (2019): Ověření geologických struktur lokality Hrádek geofyzikálními metodami. Závěrečná zpráva. MS SÚRAO, TZ 435/2019, 76 str.
- FRANĚK J., BUKOVSKÁ Z., BURIÁNEK D., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ B., GRUNDLOCH J., HOLEČEK J., JELÉNEK J., JELÍNEK J., KLOMÍNSKÝ J., KRYŠTOFOVÁ E., KUČERA R., KUNCEOVÁ E.,

- KŮRKOVÁ I., NAHODILOVÁ R., PACHEROVÁ P., PERTOLDOVÁ J., PEŘESTÝ V., RUKAVIČKOVÁ L., SOEJONO I., ŠVAGERA O., VERNER K., ŽÁČEK V. (2018): Závěrečná zpráva 3D strukturně – geologické modely potenciálních lokalit HÚ. MS SÚRAO, TZ 229/2018, Praha, 594 str.
- FRANĚK J., BUKOVSKÁ Z., ČEJCHANOVÁ A., JELÉNEK J., MLČOCH B., PERTOLDOVÁ J., SKÁCELOVÁ Z., SOEJONO I., ŠVAGERA O., VERNER K., MILICKÝ M., BARTÁŠKOVÁ L. (2015): Regionální 3D strukturně geologický model lokality Horka. Technická zpráva MS SÚRAO Praha.
- HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., BAIER, J., MILICKÝ, M., POLÁK, M., BUKOVSKÁ, Z., ČERNÝ, M., DUŠEK, K., FIFERNOVÁ, M., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., HOLEČEK J., JELÉNEK, J., JANKOVEC, J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., KUNCEOVÁ, E., PETYNIÁK, O., RAPPRIČH, V., RUKAVIČKOVÁ, L., SOEJONO, I., ŠVAGERA, O., UHLÍK, J., VOJTĚCHOVÁ, H., ŽÁČKOVÁ, E. (2020a): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Březový potok. MS SÚRAO, TZ 447/2020, 62 str.
- HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., JANKOVEC, J., UHLÍK, J., ČERNÝ, M., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., BAIER, J., DUŠEK, K., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., HEJTMÁNKOVÁ, P., HOLEČEK J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., MILICKÝ, M., NAHODILOVÁ, R., PACHEROVÁ, P., PETYNIÁK, O., PEŘESTÝ, V., RAPPRIČH, V., ŘIHOŠEK, J., RUKAVIČKOVÁ, L., ŠVAGERA, O., POLÁK, M., VOJTĚCHOVÁ, H., ŽÁČKOVÁ, E. (2020e): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Janoch (ETE-jih). MS SÚRAO, TZ 451/2020, 63 str.
- HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., UHLÍK, J., JANKOVEC, J., MILICKÝ, M., BAIER, J., BURIÁNEK, D., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ, B., DUŠEK, K., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., GRUNDLOCH, J., HOLEČEK J., JELÉNEK, J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., KUNCEOVÁ, E., PETYNIÁK, O., POLÁK, M., RAPPRIČH, V., RUKAVIČKOVÁ, L., ŠVAGERA, O., VOJTĚCHOVÁ, H. (2020f): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Horka. MS SÚRAO, TZ 452/2020, 63 str.
- HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., BAIER, J., MILICKÝ, M., BUKOVSKÁ, Z., ČERNÝ, M., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ, B., DUŠEK, K., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., HOLEČEK J., JANKOVEC, J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., KUNCEOVÁ, E., PETYNIÁK, O., POLÁK, M., RAPPRIČH, V., RUKAVIČKOVÁ, L., ŠVAGERA, O., URÍK, J., VOJTĚCHOVÁ, H., ŽÁČKOVÁ, E. (2020g): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Hrádek. MS SÚRAO, 453/2020, 63 str.
- MIXA P., SKÁCELOVÁ Z., PERTOLDOVÁ J., BUKOVSKÁ Z., BURIÁNEK D., DUDÍKOVÁ B., FRANĚK J., HRDLIČKOVÁ K., JELÍNEK J., NAHODILOVÁ R., SOEJONO I., VERNER K., ŽÁČEK V. (2019): Shrnutí výsledků geologických a geofyzikálních výzkumných prací provedených v období 9/2017–6/2019 pro aktualizaci hodnocení potenciálních lokalit hlubinného úložiště RAO. MS SÚRAO, TZ 412/2019, Praha, 427 str.
- NAVRÁTILOVÁ V., NOL O., KAŠPAR R., LANČA D., MIŠUREC J., NEDVĚD J., RAJCHL M., SOSNA K., ŠINDELÁŘ M., TLAMSA J., VOJTĚCHOVSKÁ A. (2017): Zpráva o provedení geologicko-výzkumných prací na lokalitě ETE-jih. Závěrečná zpráva, MS SÚRAO, 280 str.
- ŠVAGERA O., BUKOVSKÁ Z., ČEJCHANOVÁ A., FRANĚK J., JELÉNEK J., MLČOCH B., PERTOLDOVÁ J., SKÁCELOVÁ Z., SOEJONO I., VERNER K., MILICKÝ M., BARTÁŠKOVÁ L. (2016): Regionální

3D strukturně geologický model lokality Březový potok. Technická zpráva MS SÚRAO, Praha.

WELLMANN F., REGENAUER-LIEB K. (2012): Uncertainties have a meaning: Information entropy as a quality measure for 3-D geological models. *Tectonophysics*. 526-529. 207-216. 10.1016/j.tecto.2011.05.001.

Vyhláška č. 378/2016 Sb., o umístění jaderného zařízení, ve znění pozdějších předpisů.

mapy:

<http://www.geology.cz/extranet/sluzby/archivy/archiv-geofond>

<https://mapy.geology.cz/geocr25/>

<https://mapy.geology.cz/geocr50/>

<https://mapy.geology.cz/geocr500/>

7.3.2 Pomalé plastické deformace

Popis:

Plastická deformace, na rozdíl od deformace křehké, probíhá za vyšších teplot nebo při nižších rychlostech deformace. Deformovaný materiál na napěťové pole nereaguje křehce, to znamená, že nedochází ke vzniku puklin a zlomů, ale reaguje plasticky. To znamená, že dochází k deformaci bez porušení soudržnosti materiálu (v pevných horninách např. ke vzniku vrásových struktur).

Plastická deformace reaguje na napěťový režim pomalou plastickou odezvou. Ve zpevněných horninách k plastické deformaci dochází obvykle za vyšších teplot a omezujících tlaků v hloubkách vyšších jednotek až nižších desítek kilometrů. Tyto podmínky v řádu 1 milionu let v českém masivu v současné svrchní kůře (ve které bude umístěno HÚ) prakticky vůbec nemohou nastat. Poslední regionální metamorfóza a související plastické deformace krystalinických hornin probíhaly v českém masivu (resp. v horninách, které v současnosti utváří svrchní kůru českého masivu) v období variské orogeneze před cca 380–300 miliony let. V případě nezpevněných nebo málo zpevněných hornin však může k pomalým plastickým deformacím docházet i za podmínek zemského povrchu nebo v mělkých hloubkách. Tyto deformace však nejsou způsobeny tektonickými procesy, ale primárně gravitačními silami na svazích. Gravitační pohyby vznikají při porušení stability svahu působením zemské tíže, přičemž těžiště pohybujících se hmot vykonává dráhu zhruba po svahu dolů. Jejich vznik a vývoj je podmíněn místními přírodními poměry (sklon svahu, geologické poměry, zvodnění hornin, klimatické podmínky atd.) a případně lidskou činností (změny reliéfu krajiny, změny vodního hospodářství atd.). Pomalé svahové pohyby nazýváme „ploužení“, kterým rozumíme dlouhodobý, zpravidla nezrychlující se (mm/rok) pohyb horninových hmot, přičemž hranice vůči pevnému podloží je ve většině případů nezřetelná. Velikost posunů hmot je vzhledem k prostorovým rozměrům postiženého horninového masivu zanedbatelná. Pokud se tento pohyb vlivem různých faktorů (klimatické, antropogenní) zrychlí, přechází do sesouvání nebo stékání. Ploužení tak může být iniciální fází pro sesouvání, stékání nebo dokonce řícení. Ploužení je nejobtížněji pozorovatelný a vymezitelný, ale zároveň nejrozšířenější typ svahového gravitačního pohybu v ČR. Výsledkem takového pomalého gravitačního pohybu může být svahová deformace nezpevněných nebo málo zpevněných hornin.

Plastická deformace krystalinických hornin v oblastech potencionálních lokalit pro HÚ je v horizontu 1 milionu let téměř zcela vyloučená. Vzhledem ke geomorfologii vybraných lokalit a absenci rozsáhlých akumulací sedimentů lze předpokládat jen lokální a drobnější gravitační pohyby a následné plastické deformace nezpevněných hornin.

Vliv na bezpečnost:

V daném časovém horizontu 1 milionu let je plastická deformace krystalinických hornin na všech 4 uvažovaných lokalitách prakticky zcela vyloučena, a tudíž nemůže jakkoliv ovlivnit bezpečnost HÚ v době výstavby, během provozu, ani po jeho uzavření. Při výstavbě, ale i během provozu může ovšem docházet k sesedání nezpevněných hornin na povrchu a při povrchu a vzniku pomalých gravitačních pohybů s následnou plastickou deformací dotčených hornin. Vzhledem k tomu, že tento typ deformací se týká pouze povrchových partií do hloubky několika metrů a neovlivňuje homogenitu krystalinického podkladu, nejsou tyto deformace pro výstavbu a provoz podzemní části úložiště nebezpečné. V daném časovém horizontu 1 milionu let se ale může vrstva nezpevněných hornin prohlubovat, např. zvětráváním a erozí. Pokud by se podzemní prostory úložiště kvůli těmto procesům přiblížily budoucímu zemskému povrchu, pak tyto deformace mohou v budoucnosti začít ovlivňovat bezpečnost úložiště po jeho uzavření.

Dostupná data:

Pomalé plastické deformace krystalinických hornin jsou vázány na zvýšené tlakově – teplotní podmínky, kdy dochází k regionální metamorfóze. Různé možnosti vzniku metamorfního režimu pro krystalinické horniny poskytují geodetická a paleomagnetická data o pohybu litosférických desek, publikovaná v odborných časopisech, která naznačují jejich dlouhodobý pohyb a indikují tak budoucí možné zóny subdukce nebo kolize, nebo zóny extenze s možným rozvojem metamorfních procesů a vulkanismu. Pro nezpevněné nebo málo zpevněné horniny pak jako popis aktuální situace potenciálně nebezpečných svahových pohybů slouží průběžně aktualizovaná databáze ČGS – Svahové pohyby, která umožňuje sledovat lokalizaci a vývoj svahových pohybů v českém masivu, je dostupná na www.geology.cz.

Rozsáhlý soubor archivních geovědních zpráv a map je přehledně shrnutý ve zprávách, které doprovázejí detailní 3D geologické modely 7 lokalit (Franěk et al., 2018, z vybraných 4 lokalit se toto týká Horky, Hrádku a Březového potoka), a 3D geologický model ETE-Jih (Navrátilová a Noll, 2017). Geofyzikální a geologický výzkum v letech 2017-2019 poskytl data i o všech patrných metamorfních fenoménech na těchto 4 lokalitách, jejich závěry jsou shrnuty v rozsáhlé práci Mixy et al. (2019). Zároveň jsou všechny tyto poznatky přehlednou a stručnější formou shrnuty ve zprávách týkajících se hodnocení potencionálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti (Havlová et al., 2020 a, e, f, g), a to i z hlediska vlivu jak minulých (paleozoických) metamorfních a deformačních procesů a jejich důsledků na homogenitu horninového prostředí, tak i z hlediska kvartérních i současných svahových pohybů a jejich vlivu na dlouhodobou bezpečnost HÚ.

Nejistoty:

Vzhledem k extrémní nepravděpodobnosti vzniku pomalých plastických deformací v krystalinických horninách všech lokalit vybraných pro vybudování HÚ, a to na základě reaktivace regionální metamorfózy v českém masivu, je v uvažovaném časovém horizontu 1 milion let pojem nejistota téměř irelevantní. Drobný stupeň nejistoty panuje jen pro případ sesedání nezpevněných hornin na povrchu a při povrchu a vzniku pomalých gravitačních

pohybů s následnou plastickou deformací dotčených hornin při výstavbě a během provozu úložiště. Vzhledem k tomu, že tento typ deformací se týká pouze povrchových partií do hloubky několika metrů a neovlivňuje homogenitu krystalinického podkladu, nejsou tyto deformace pro výstavbu a provoz úložiště nebezpečné – lze je snadno eliminovat vhodnou lokalizací povrchového areálu nebo běžnými inženýrskými opatřeními. V daném časovém horizontu 1 milionu let se ale může vrstva nezpevněných hornin prohlubovat, např. zvětváváním a erozí. Pokud by se podzemní prostory úložiště kvůli těmto procesům přiblížily budoucímu zemskému povrchu, pak tyto deformace mohou v budoucnosti začít ovlivňovat bezpečnost úložiště po jeho uzavření.

Doporučení:

Pro upřesnění mocnosti nezpevněných hornin v oblasti potenciálního hlubinného úložiště doporučujeme realizaci průzkumných vrtů a adekvátní geofyziky.

Reference:

FRANĚK J., BUKOVSKÁ Z., BURIÁNEK D., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ B., GRUNDLOCH J., HOLEČEK J., JELÉNEK J., JELÍNEK J., KLOMÍNSKÝ J., KRYŠTOFOVÁ E., KUČERA R., KUNCEOVÁ E., KŮRKOVÁ I., NAHODILOVÁ R., PACHEROVÁ P., PERTOLDOVÁ J., PEŘESTÝ V., RUKAVIČKOVÁ L., SOEJONO I., ŠVAGERA O., VERNER K., ŽÁČEK V. (2018): Závěrečná zpráva 3D strukturně – geologické modely potenciálních lokalit HÚ. MS SÚRAO, TZ 229/2018, Praha, 594 str.

FRANĚK J., BUKOVSKÁ Z., ČEJCHANOVÁ A., JELÉNEK J., MLČOCH B., PERTOLDOVÁ J., SKÁCELOVÁ Z., SOEJONO I., ŠVAGERA O., VERNER K., MILICKÝ M., BARTÁŠKOVÁ L. (2015): Regionální 3D strukturně geologický model lokality Horka. Technická zpráva MS SÚRAO Praha.

HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., BAIER, J., MILICKÝ, M., POLÁK, M., BUKOVSKÁ, Z., ČERNÝ, M., DUŠEK, K., FIFERNOVÁ, M., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., HOLEČEK J., JELÉNEK, J., JANKOVEC, J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., KUNCEOVÁ, E., PETYNIÁK, O., RAPPRIČH, V., RUKAVIČKOVÁ, L., SOEJONO, I., ŠVAGERA, O., UHLÍK, J., VOJTĚCHOVÁ, H., ŽÁČKOVÁ, E. (2020a): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Březový potok. MS SÚRAO, TZ 447/2020, 62 str.

HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., JANKOVEC, J., UHLÍK, J., ČERNÝ, M., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., BAIER, J., DUŠEK, K., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., HEJTMÁNKOVÁ, P., HOLEČEK J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., MILICKÝ, M., NAHODILOVÁ, R., PACHEROVÁ, P., PETYNIÁK, O., PEŘESTÝ, V., RAPPRIČH, V., ŘIHOŠEK, J., RUKAVIČKOVÁ, L., ŠVAGERA, O., POLÁK, M., VOJTĚCHOVÁ, H., ŽÁČKOVÁ, E. (2020e): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Janoch (ETE-jih). MS SÚRAO, TZ 451/2020, 63 str.

HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., UHLÍK, J., JANKOVEC, J., MILICKÝ, M., BAIER, J., BURIÁNEK, D., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ, B., DUŠEK, K., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., GRUNDLOCH, J., HOLEČEK J., JELÉNEK, J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., KUNCEOVÁ, E., PETYNIÁK, O., POLÁK, M., RAPPRIČH, V., RUKAVIČKOVÁ, L., ŠVAGERA, O., VOJTĚCHOVÁ, H. (2020f): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Horka. MS SÚRAO, TZ 452/2020, 63 str.

HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., BAIER, J., MILICKÝ, M., BUKOVSKÁ, Z., ČERNÝ, M., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ, B., DUŠEK, K., FRANĚK, J., GVOŽDÍK,

- L., HOLEČEK J., JANKOVEC, J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., KUNCEOVÁ, E., PETYNYIAK, O., POLÁK, M., RAPPRIK, V., RUKAVIČKOVÁ, L., ŠVAGERA, O., URÍK, J., VOJTĚCHOVÁ, H., ŽÁČKOVÁ, E. (2020g): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Hrádek. MS SÚRAO, 453/2020, 63 str.
- MIXA P., SKÁCELOVÁ Z., PERTOLDOVÁ J., BUKOVSKÁ Z., BURIÁNEK D., DUDÍKOVÁ B., FRANĚK J., HRDLIČKOVÁ K., JELÍNEK J., NAHODILOVÁ R., SOEJONO I., VERNER K., ŽÁČEK V. (2019): Shrnutí výsledků geologických a geofyzikálních výzkumných prací provedených v období 9/2017–6/2019 pro aktualizaci hodnocení potenciálních lokalit hlubinného úložiště RAO. MS SÚRAO, TZ 412/2019, Praha, 427 str.
- NAVRÁTILOVÁ V., NOL O., KAŠPAR R., LANČA D., MIŠUREC J., NEDVĚD J., RAJCHL M., SOSNA K., ŠINDELÁŘ M., TLAMSA J., VOJTĚCHOVSKÁ A. (2017): Zpráva o provedení geologicko-výzkumných prací na lokalitě ETE-jih. Závěrečná zpráva, MS SÚRAO, 280 str.
- ŠVAGERA O., BUKOVSKÁ Z., ČEJCHANOVÁ A., FRANĚK J., JELÍNEK J., MLČOCH B., PERTOLDOVÁ J., SKÁCELOVÁ Z., SOEJONO I., VERNER K., MILICKÝ M., BARTÁŠKOVÁ L. (2016): Regionální 3D strukturně geologický model lokality Březový potok. Technická zpráva MS SÚRAO, Praha.

7.3.3 Napěťový stav horninového masivu a jeho změny (diferenciální a litostatické napětí)

Popis:

Napětí v horninovém masivu je vyjádřeno symetrickým tenzorem – maticí 3 x 3 o 6ti nezávislých veličinách. Napětí v horninovém masivu v okolí HÚ lze rozdělit na primární a sekundární.

Primární napjatost (v neporušeném horninovém masivu) se dále dělí na:

- 1) gravitační (vyvolána objemovou tíhou hornin)
- 2) tektonickou
 - a) recentní (vyvolaná tektonickými silami v masivu)
 - b) reziduální (vyvolaná objemovou tíhou již neexistujících hornin nadloží, které bylo v geologické minulosti odneseno procesy zvětvávání a eroze, nebo ledovce který roztál).

Gravitační primární napjatost není v horninách izotropní, tzv. Poissonovo číslo definuje, jaký bude v hloubce poměr mezi napětím vertikálním a horizontálním. Tento vztah je nutno upravit v případě anizotropního (např. vrstevnatého) prostředí.

Sekundární napjatost představuje v případě HÚ redistribuci napjatosti v okolí zhruba kruhového částečně / zcela nevystrojeného výrubu.

Napětí způsobuje deformace horninového masivu. Mechanický projev horninového prostředí na působící napětí je obecně velmi složitý. Podle velikosti působícího napětí a dosažení jednotlivých mezí pevnosti horniny rozeznáváme několik typů deformace. Konkrétní deformační mechanismy, které napětí v jednotlivých částech horninového masivu vyvolá, jsou kromě samotného napěťového pole dále závislé na mnoha fyzikálně – mechanických parametrech dané horniny.

Napětí v horninovém masivu není v prostoru ani v čase stálé, ale podléhá dlouhodobým i krátkodobým změnám. Nejdůležitějším zdrojem nárůstu nebo obecně změny napětí v horninovém prostředí jsou vzdálené tektonické síly, které vycházejí hlavně z pohybu litosférických desek a jejich vzájemných interakcí. Ziegler et al. (2007) podrobně analyzují ve střední a západní Evropě pohyby zemské kůry a související sedimentární, vulkanický a geomorfologický vývoj v kontextu současného uspořádání tektonických desek nebo jejich částečně mechanicky nezávislých segmentů. Jejich závěry kromě jiného ukazují, že napěťové pole ve střední Evropě je posledních minimálně několik milionů let stabilní, bez výraznějších změn, řízené hlavně souhrou Alpinské kolize na J a V od českého masívu, a rozpínáním severní poloviny Atlantiku na Z od českého masívu. Oba tyto procesy jsou natolik dlouhodobé, že lze i pro následující minimálně jednotky milionů let předpokládat, že současné generelní napěťové pole v horninách svrchní kůry českého masívu bude stejné jako současné, a k žádným výrazným změnám tedy v řádu prvních stovek tisíc let v generelním měřítku v budoucnu nedojde. Toto se samozřejmě týká všech lokalit HÚ, které se všechny nacházejí v horninách českého masívu.

Tektonicky vyvolané změny napětí však mohou být vyvolány na lokální úrovni, a to pohybem na nějakém regionálně významnějším zlomu poblíž HÚ. V takovém případě dochází v širším okolí daného zlomu k přeuspořádání napětí, které může lokálně vyústit i v nárůst napětí. Tyto procesy, často doprovázené seismickými událostmi, však nelze v řádu stovek tisíc až jednotek milionů let pro žádnou ze 4 konkrétních lokalit věrohodně predikovat. Dosavadní vyšší seismická aktivita zaznamenaná monitoringem v průběhu 20. a 21. století však žádné podobné události neevokuje, resp. je vylučujícím kritériem pro výběr lokality HÚ. Pravděpodobnost výskytu těchto tektonických událostí v horizontu budoucích stovek tisíc až prvních milionů let pak zhruba kopíruje výsledky pravděpodobnostní analýzy seismických událostí.

Termální expanze vlivem zvýšení teploty vede ke zvýšení napětí v hornině úměrně změně teploty a jejím termálním vlastnostem (např. termální expanzivitě). V plánovaném HÚ bude tepelná produkce RAO obzvláště v počátečních fázích vysoká. Související ohřátí okolní horniny i v dlouhodobém časovém měřítku a výsledná změna napětí způsobená termální expanzí ohřáté části horninového masívu bude tedy nutno řešit formou termo – mechanické numerické simulace. Dalším zdrojem změn napětí v důsledku změn teploty by mohla být výrazná klimatická změna, která má v případě zvýšení / snížení teploty horninového prostředí stejný efekt na změnu napětí jako prohřátí vlivem radiogenního tepla z uloženého odpadu. Lokální a dílčí vliv na napětí v okolí HÚ může mít i expanze bentonitových výplní v prostorách HÚ během hydratace bentonitu.

Dalším procesem, který způsobuje nárůst napětí, je pohřbení pod novými sedimenty. Všechny potenciální lokality HÚ se však nacházejí v denudačních částech současného reliéfu, tudíž k významnějšímu zvyšování napětí vlivem pohřbení pod sedimenty v žádné z nich v řádu stovek tisíc až prvních milionů let s velkou pravděpodobností nedojde. Naopak pravděpodobně dojde ke snížení litostatického napětí vlivem zvětrávání a eroze nadložního sloupce hornin. Glaciální/interglaciální cyklus, který může vést k postupu či ústupu ledovcového příkrovu na povrchu v relativní blízkosti úložiště, bude mít v geosféře obdobný dopad na lokální napětí jako pohřbení pod sedimenty.

Vliv na bezpečnost:

Napěťový stav v horninovém prostředí i jeho změny mají vliv na provozní i dlouhodobou bezpečnost HÚ. Dále ovlivňují mechanické, hydraulické i transportní procesy v HÚ a jeho okolí.

Při dostatečném nárůstu napětí dochází k iniciální drobné deformaci horniny. V počáteční fázi deformace se v hornině uzavírají trhliny a póry. Průběh porušování je nejprve plastický, ve střední části pružný a v konečné fázi opět plastický (např. rozpukané nebo navětralé magmatické horniny). Pokud napětí i po těchto fázích dále roste, může postupně začít docházet k deformaci výraznější – k reaktivaci existujících křehkých struktur, případně ke vzniku nových křehkých struktur.

Mechanické procesy v geosféře mohou ovlivnit účinnost jak inženýrských bariér, tak bariéry okolního horninového masivu. Tyto procesy mohou mít krátké trvání, například pohyb zlomu během zemětřesení, nebo dlouhé trvání, jako je postupné zatěžování a odlehčování během cyklů zalednění a odlednění. Při výstavbě a provozu úložiště ovlivní napětí v geosféře a následné deformace charakteristiky porušené zóny, která se kolem úložiště vytvoří, což může ovlivnit migraci radionuklidů a dalších kontaminantů po uzavření úložiště.

Během provozu a v období po uzavření ovlivní napětí v horninovém prostředí kolem úložiště napětí na komponentách inženýrských bariér a potenciálně jejich deformaci. Taková deformace může ovlivnit integritu bariérových materiálů a/nebo objem a rozložení prázdného prostoru v úložišti. Může být ovlivněna rychlost resaturace úložiště, stejně jako vývoj tlaků plynu v prázdném prostoru. Napětí v horninovém prostředí také ovlivní jeho deformaci. To může způsobit změny v distribuci porozity a následné změny v hydraulických gradientech. Tyto účinky mohou řídit pohyb kapalin (jako je voda, nevodné kapaliny nebo plyny) horninovým prostředím. Změna porozity v důsledku deformace, například podél zlomů, může ovlivnit směry a charakteristiky cest, po kterých mohou radionuklidy a další kontaminanty migrovat z úložiště horninovým prostředím. Některé mechanické procesy, jako je katakláza podél zlomových ploch, by mohly potenciálně změnit schopnost horniny zpomalovat tyto radionuklidy a další kontaminanty. Například v některých lokalitách může náhlé snížení tlaku, ke kterému může přechodně dojít při zemětřesení, vést k vývoji samostatných plynných fází, jako je CO₂ nebo CH₄. Takové účinky by mohly ovlivnit distribuci radionuklidů a jiných kontaminantů mezi různé fáze.

Dostupná data:

V podrobnosti, která by byla potřeba pro vyhodnocení napěťového stavu horninového masivu a jeho změn v čase, žádná data pro žádnou ze 4 lokalit neexistují.

Nárůst, resp. změnu napětí, ovlivňují zejména tyto procesy: tektonické pohyby a orogeneze, obecně deformace, seismicita, regionální eroze a sedimentace, lokálně také rozsáhlejší vrtné práce, těžba a jiné podzemní činnosti. Data o těchto procesech tedy mohou nepřímo pomoci v analýze nárůstu, resp. změn napětí v horninovém masivu.

Generelní údaje o globální distribuci napětí ve svrchní zemské kůře poskytuje webová stránka <https://www.world-stress-map.org/>.

Primární litostatické napěťové pole horninového masivu může být výrazně ovlivněno a deformováno tektonickými, popřípadě reziduálními silami. Tento předpoklad je však možno ověřit pouze přímými měřeními napětí horninového masivu in situ. Kvalifikovaným způsobem lze na lokalitách odhadnout pouze velikost vertikální složky napětí, která při objemové hmotnosti nezvětralých krystalinických hornin přibližně 2600–2700 kg.m⁻³ může v předpokládané úložné hloubce 500 m pod povrchem dosahovat cca 12,5–13,5 MPa. Dle evropské databáze napětí (Heidbach et al. 2016) lze očekávat generální trend působení maximální složky horizontálního napětí ve směru přibližně S–J.

Napětí ve vrtech v PVP Bukov na Z Moravě, v krystalinických horninách v hloubce cca 600 m, měřili na české poměry velmi podrobně Souček et al. (2018). Měření probíhala několika metodicky nezávislými postupy. Dle jejich výsledků měření sondami CCBO dosahuje a velké při variabilitě směrů napěťových os maximální hlavní napětí S1 hodnot až 20,2 MPa při obvyklých hodnotách 8-16 MPa, naopak nejnižší hodnoty minimálního hlavního napětí S3 dosahují cca 2-7 MPa. Měření metodou hydrofrakturace poskytlo hodnoty horizontálního napětí -17 až -38 MPa při variabilním směru horizontální složky v rozsahu azimutů k S až SV: 358° až 45°, hodnoty zhruba srovnatelné s jejich měřením konvergence a následnou inverzní analýzou napěťového stavu.

Nejistoty:

Napětí v horninovém masivu se v prostoru i čase mění a distribuce napětí podléhá zákonitostem a parametrům, které nelze pro celý horninový masiv v širším okolí úložiště v dostatečné podrobnosti a přesnosti stanovit (např. popis heterogenit v horninovém masivu – petrograficky i z hlediska fyzikálně-mechanických vlastností, rotace hlavních směrů a velikostí napětí v okolí křehkých struktur apod.). Dále, kvantitativní měření napěťového stavu v daném místě v horninovém masivu je metodicky, časově i finančně nákladná úloha. Z toho vyplývá vysoká nejistota v určení napěťového stavu horninového masivu i jeho změn v čase.

Doporučení:

Pro významné snížení popsanych nejistot doporučujeme realizaci rozsáhlejších výzkumných prací včetně realizace hlubokých vrtů a následného monitoringu napětí v několika hlubokých úrovních horninového masivu na pečlivě vybraných místech (homogenní reprezentativní hornina bez porušení křehkými strukturami). Dále doporučujeme monitoring pohybu na významných křehkých strukturách v lokalitě HÚ, se zaměřením na struktury vhodně orientované ve smyslu reaktivace pohybu ve zjištěném napěťovém poli.

Reference:

HEIDBACH O., CUSTODIO S., KINGDON A., MARIUCCI M.T., MONTONE P., MÜLLER B., PIERDOMINICI S., RAJABI M., REINECKER J., REITER K., TINGAY M., WILLIAMS J., ZIEGLER M. (2016): Stress Map of the Mediterranean and Central Europe 2016, GFZ Data Service, [doi:10.5880/WSM.2016.001](https://doi.org/10.5880/WSM.2016.001).

SOUČEK K., VAVRO M., STAŠ L., KALÁB Z., KONÍČEK P. (2018): Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov – část II geotechnická charakterizace, závěrečná zpráva. SÚRAO ZZ 221/2018. 219 s. MS SÚRAO.

ZIEGLER P.A., DÉZES P. (2007): Cenozoic uplift of Variscan Massifs in the Alpine foreland: Timing and controlling mechanisms. *Global and Planetary Change*, 58, 1–4, 237-269.

Vyhláška č. 378/2016 Sb., o umístění jaderného zařízení, ve znění pozdějších předpisů.

7.3.4 Seismická stabilita území a její vývoj

Popis:

V důsledku uvolnění energie v zemském tělese dojde k otřesům. Podle hloubky ohniska lze rozlišit zemětřesení mělká, středně hluboká a hluboká. Mělká zemětřesení vznikají v zemské kůře a svrchní části pláště v hloubce do 60 km. Patří sem všechny rýťivé, vulkanické i většina

tektonických otřesů, spolu s projevy různých dalších procesů jako je řícení skal, pád lavin nebo odpal náloží. Středně hluboká zemětřesení jsou charakteristická hloubkou hypocentra 60–300 km. Vznikají tedy výhradně v zemském plášti a jsou vázána především na okraje litosférických desek (subdukční zóny). Hluboká zemětřesení (nad 300 km) jsou generována výhradně ve významných subdukčních zónách, především v tichomořské oblasti. Nejhlubší světové zemětřesení bylo, zaznamenáno v oblasti Indonésie v roce 1934. Hloubka ohniska byla vypočtena na 720 km. Nejhlubší evropské zemětřesení se datuje do roku 1954 na území Sierra Nevady (655 km).

K vyjádření síly otřesů se používají dvě rozdílné veličiny, magnitudo a makroseismická intenzita. **Magnitudo** se určuje z maximální výchylky seismometru, zatímco **makroseismická intenzita** se určuje ze statistického vyhodnocení účinků zemětřesení na osoby, budovy a krajinu. Každé zemětřesení je charakterizováno jednou hodnotou magnituda, ale více hodnotami makroseismické intenzity v závislosti na poloze vůči hypocentru.

Posuzování území k umístění jaderného zařízení z hlediska jeho porušení zlomem je dáno vyhl. 378/2016 Sb. § 5.

V období od roku 1900 nevznikl na území ČR tektonický otřes s magnitudem větším než 5,1. V historickém období je nejintenzivnější zemětřesení popsáno z 15. září 1590 z oblasti Niederösterreich (Rakousko), jeho uváděná intenzita je $I_0 = 8-9$ ($M_w = 6,06 \pm 0,47$).

Obecně platí, že špičkové hodnoty vibrací zemětřesení (zrychlení kmitání (PGA), rychlost kmitání (PGV) nebo posunutí (PGD)) se snižují s hloubkou, tento pokles je rychlejší v mělkých vrstvách oproti hlubším partiím. Snižování amplitudy v závislosti na hloubce je ovlivněno velikostí magnituda zemětřesení a lokální geologickou stavbou. V sedimentárním prostředí je pokles větší pro intenzivnější zemětřesení.

Vliv na bezpečnost:

Seismicita v ČR a okolí je nízká. Na základě zpracovaných rešerší a numerického modelování lze konstatovat, že vliv seismických událostí (vibrací) na stabilitu horninových masivů v hloubce 500 m a na úložné prostory v horizontu 100 000 let bude velmi nízký. Maximální odhadovaný projev nepřesáhl hodnotu akcelerace $0,518 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ na povrchu, v hloubce 500 m je hodnota akcelerace $0,22 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Do odhadu nelze zahrnout další související informace, jako je degradace horninového masivu, výplně okolí UOS a vlastních UOS v důsledku probíhajících geochemických procesů a stárnutí. Nelze očekávat, že by v některé z lokalit vzniklo zemětřesení s magnitudem 5 a více, a proto i zatížení daného podzemního díla vibracemi zřejmě nebude zásadní a poškozující (Kaláb et al. 2015).

Dostupná data:

Základním zdrojem dat historických zemětřesení do roku 1990 je seismický portál <http://www.seismicportal.eu/>, který byl spuštěn v rámci projektu NERA: „Network of European Research Infrastructures for Earthquake Risk Assessment and Mitigation“.

Databáze seismických jevů vedené na Geofyzikálním ústavu AV ČR, v.v.i. <https://www.ig.cas.cz/vyzkum-a-vyuka/observatore/lokalni-seismicka-sit-webnet/>

Zdrojem dat současných seismických jevů od roku 1991 je datový portál CzechGeo (<http://czechgeo.cz>), který byl spuštěn v rámci projektu LM2010008 – CzechGeo/EPOS –

Distribuovaný systém observatorních a terénních měření geofyzikálních polí v České republice (2010-2015).

V (Kaláb et al. 2015) byla pro hodnocení seismicity a hodnocení vlivu seismických účinků v hloubkách hypotetického úložiště v období dalších 100 000 let využita neo-deterministická metoda. Na základě dostupných informací o vlastnostech prostředí syntetizovala vlnové pole generované konkrétním zemětřesením v zájmové lokalitě a stanovila z něho žádané inženýrské parametry. Studie se zaměřila na 7 lokalit, z vybraných 4 lokalit se toto týká Horky, Hrádku a Březového potoka. Lokalita ETE-Jih (Janoch) nebyla do tohoto hodnocení zahrnuta.

S ohledem na to, že čtvrtá vybraná lokalita ETE – Jih (Janoch) je relativně blízko areálu JE Temelín, bude možné využít volně dostupná data, např. ČEZ (2012), případně po dohodě s ČEZ a.s. i ta, která nejsou volně dostupná.

Nejistoty:

Z geologického hlediska se pleistocén (2,58 miliónů let) vyznačuje mj. střídáním dob ledových a meziledových. Navazující holocén je nejmladší geologické období, které začalo koncem poslední doby ledové před 12 000–10 500 lety. Konec doby ledové je rozsáhlou klimatickou změnou – oteplením. S vědomím skutečnosti, že doby ledové se opakují (trvají cca 100 000 let) a jsou střídány kratšími dobami meziledovými, je holocén nejnovější dobou meziledovou. Seismicita v ČR a okolí je nízká a nejsou indicie, že by rapidně narostla.

Reference:

ČEZ (2012): Zadávací bezpečnostní zpráva pro nový jaderný zdroj 3.a 4. blok v lokalitě Temelín, Revize 0. Kolektiv autorů ČEZ a.s., ÚJV Řež a.s.- divize Energoprojekt Praha, ÚJV Řež a.s., Praha.

HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., BAIER, J., MILICKÝ, M., POLÁK, M., BUKOVSKÁ, Z., ČERNÝ, M., DUŠEK, K., FIFERNOVÁ, M., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., HOLEČEK J., JELÍNEK, J., JANKOVEC, J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., KUNCEOVÁ, E., PETYNIÁK, O., RAPPRIČH, V., RUKAVIČKOVÁ, L., SOEJONO, I., ŠVAGERA, O., UHLÍK, J., VOJTĚCHOVÁ, H., ŽÁČKOVÁ, E. (2020a): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Březový potok. MS SÚRAO, TZ 447/2020, 62 str.

HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., JANKOVEC, J., UHLÍK, J., ČERNÝ, M., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., BAIER, J., DUŠEK, K., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., HEJTMÁNKOVÁ, P., HOLEČEK J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., MILICKÝ, M., NAHODILOVÁ, R., PACHEROVÁ, P., PETYNIÁK, O., PEŘESTÝ, V., RAPPRIČH, V., ŘIHOŠEK, J., RUKAVIČKOVÁ, L., ŠVAGERA, O., POLÁK, M., VOJTĚCHOVÁ, H., ŽÁČKOVÁ, E. (2020e): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Janoch (ETE-jih). MS SÚRAO, TZ 451/2020, 63 str.

HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., UHLÍK, J., JANKOVEC, J., MILICKÝ, M., BAIER, J., BURIÁNEK, D., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ, B., DUŠEK, K., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., GRUNDLOCH, J., HOLEČEK J., JELÍNEK, J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., KUNCEOVÁ, E., PETYNIÁK, O., POLÁK, M., RAPPRIČH, V., RUKAVIČKOVÁ, L., ŠVAGERA, O., VOJTĚCHOVÁ, H. (2020f): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Horka. MS SÚRAO, TZ 452/2020, 63 str.

HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., BAIER, J., MILICKÝ, M., BUKOVSKÁ, Z., ČERNÝ, M., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ, B., DUŠEK, K., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., HOLEČEK J., JANKOVEC, J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., KUNCEOVÁ, E., PETYNIÁK, O., POLÁK, M., RAPPRIČH, V., RUKAVIČKOVÁ, L., ŠVAGERA, O., URÍK, J., VOJTĚCHOVÁ, H., ŽÁČKOVÁ, E. (2020g): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Hrádek. MS SÚRAO, 453/2020, 63 str.

KALÁB Z., ŠÍLENÝ J., LEDNICKÁ M., JECHUMTÁLOVÁ Z. (2015): Seismická stabilita území. MS SÚRAO, TZ 26/2015, Praha.

Vyhláška č. 378/2016 Sb., o umístění jaderného zařízení, ve znění pozdějších předpisů.

7.4 Chemické procesy

7.4.1 Metamorfóza

Popis:

Jedná se o soubor procesů, kdy se hornina musí přizpůsobovat nově nastalým vnějším podmínkám (především se jedná o změnu teploty, tlaku a přítomnosti/aktivitě fluid) čímž dochází ke změnám textury, minerálního a částečně i chemického složení. Spodní hranicí metamorfózy je 150–200 °C a její svrchní hranicí je počátek tavení, který je pro každý minerál, potažmo horninu rozdílný. Proces metamorfózy může postihnout jakýkoliv druh horniny, kdy původní nemetamorfovaná hornina se nazývá protolit.

Z hlediska hlavních typů existuje metamorfóza i) regionální, která postihuje velké oblasti a bývá nejčastěji spojena s pohybem litosférických desek (např. subdukční zóny nebo kontinentální kolize). Patří sem i metamorfóza pohřbením, která je spojena se sedimentárními pánvemi a s pozvolným přechodem od procesů diagenese do metamorfózy vlivem nárůstu zatížení nadložních sedimentů v aktivních sedimentárních pánvích; ii) šoková metamorfóza, která je spojovaná s nárazem impaktového tělesa; iii) kontaktní metamorfóza charakteristická pro kontakty s horkými intruzemi magmatických těles; iv) dynamická metamorfóza, typicky se vyskytující ve zlomových oblastech, která je ovlivněná primárně tlakem.

Standardně se metamorfní procesy projevují při zvyšování teplotně-tlakových podmínek (prográdní metamorfóza), ale existuje i retrográdní metamorfóza, kde se magmatická nebo již jednou metamorfovaná hornina, nacházející se v určité hloubce v zemské kůře, dostane do nižších teplotně-tlakových podmínek.

Lokality, vybrané pro potencionální umístění HÚ, jsou situovány ve stabilních oblastech českého masívu, kde je regionální metamorfóza v časovém horizontu prvních stovek tisíc let zcela vyloučená a kontaktní metamorfóza velmi nepravděpodobná. Pravděpodobnost šokové metamorfózy je dána pravděpodobností impaktu dostatečně velkého meteoritu a pravděpodobnost dynamometamorfózy souvisí s pravděpodobností výrazného pohybu na nějakém blízkém zlomu.

Pro návrh HÚ se jeví velmi vhodné magmatické horniny, ideálně zastoupené jedním litologickým typem jako je např. granit, granodiorit nebo syenit. Pravdou ovšem je, že i tyto granitoidy intrudovaly většinou do metamorfovaných komplexů, někde vytvořily homogenní magmatické intruze (např. lokalita Březový potok nebo Horka), jinde jsou patrné prstovité

průniky do metamorfitů a poměrně vysoký počet částečně asimilovaných xenolitů metamorfovaných hornin v granitu, což negativně ovlivňuje homogenitu horninového prostředí (např. lokalita Hrádek). Mají tak tvar obvykle zhruba paralelní ve vztahu k regionální stavbě celého území. Okraje intruzí většinou vykazují penetrativní regionální stavbu okolních metamorfovaných hornin. V některých případech mohou být magmatity lokálně křehce porušeny, což je výsledek závěrečných fází výzdvihu hornin hlavně v období karbonu, kdy docházelo k lokalizaci deformace a přechodu od duktilního ke křehkému chování. Jedná se zejména o střížné zóny, zlomové a puklinové poruchy, které byly spojeny s projevy lokální extenze, vmístěním žilných těles granitoidů, pegmatitů a křemenných žil. Obecně platí, že magmatické komplexy jsou z hlediska homogenity nejstabilnější prostředí pro vybudování HÚ. Určitou míru nehomogenity mohou způsobovat kontakty těchto intruzí s okolními metamorfovanými horninami nebo proniky pozdějších žilných hornin.

Z hlediska soudržnosti horninového prostředí se pro umístění hlubinného úložiště jeví vhodný i masiv jednoho litologického typu metamorfitu ve vyšším stupni metamorfni přeměny, za předpokladu, že metamorfni procesy byly dávno ukončeny. Sem patří např. granulity, granulitové ruly, ale i migmatity nebo např. migmatizované pararuly. Předpokladem vysoké homogenity horninového prostředí je penetrativní stavba, upadající dominantně jedním směrem. Různé petrologické variety jednoho litologického druhu metamorfitu nesnižují nutně soudržnost prostředí, neboť jejich hranice jsou většinou neostré a volně do sebe přechází. Určitou míru nehomogenity metamorfovaného horninového prostředí způsobují čočky pestrých hornin (např. erlanů, kvarcitů, amfibolitů a mramorů) a žíly pozdně magmatických hornin.

Vliv na bezpečnost:

Vzhledem k tomu, že v daném časovém horizontu 1 milionu let jsou regionální metamorfni procesy na všech 4 uvažovaných lokalitách prakticky zcela vyloučeny, nemůže regionální metamorfóza jakkoliv ovlivnit bezpečnost HÚ v době výstavby, během provozu, ani po jeho uzavření. Zcela hypoteticky lze uvažovat, že by v daném časovém horizontu 1 milionu let mohlo dojít k výraznějšímu znovuoživení vulkanické aktivity v SZ části českého masivu, potom by zde mohly nastat lokální kontaktní metamorfni procesy. Tato možnost je ale velmi nepravděpodobná. Stejně hypoteticky by mohlo dojít k šokové metamorfóze po pádu meteoritu na území českého masivu. Díky kritériím výběru lokalit mimo hlavní zlomové struktury a místa s vyšší pravděpodobností seismických událostí lze na uvažovaných lokalitách v daném časovém horizontu téměř vyloučit také dynamickou metamorfózu.

Dostupná data:

Geodetická a paleomagnetická data o pohybu litosférických desek, publikovaná v odborných časopisech, která naznačují jejich dlouhodobý pohyb a indikují tak budoucí možné zóny subdukce nebo kolize, nebo zóny extenze s možným rozvojem metamorfni procesů a vulkanismu.

Rozsáhlý soubor archivních geovědních zpráv a map je přehledně shrnutý ve zprávách, které doprovázejí detailní 3D geologické modely 7 lokalit (Franěk et al., 2018, z vybraných 4 lokalit se toto týká Horky, Hrádku a Březového potoka), a 3D geologický model ETE-Jih (Navrátilová a Noll, 2017). Geofyzikální a geologický výzkum v letech 2017-2019 poskytl data i o všech patrných metamorfni fenoménech na těchto 4 lokalitách, jejich závěry jsou shrnuty v rozsáhlé práci Mixy et al. (2019). Zároveň jsou všechny tyto poznatky přehlednou a stručnější

formou shrnuty ve zprávách týkajících se hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti (Havlová et al., 2020 a, e, f, g), a to i z hlediska vlivu dokončených (paleozoických) metamorfních procesů a jejich důsledků na homogenitu horninového prostředí.

Nejistoty:

Vzhledem k extrémní nepravděpodobnosti výskytu regionálních i dalších metamorfních procesů v uvažovaném časovém horizontu 1 milion let je pojem nejistota téměř irelevantní. Drobný stupeň nejistoty panuje jen pro případ kontaktní metamorfózy ve spojení se zcela hypotetickým oživením vulkanické aktivity v SZ části českého masívu nebo pro případ šokové metamorfózy po pádu meteoritu na území českého masívu.

Reference:

- FRANĚK J., BUKOVSKÁ Z., BURIÁNEK D., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ B., GRUNDLOCH J., HOLEČEK J., JELÉNEK J., JELÍNEK J., KLOMÍNSKÝ J., KRYŠTOFOVÁ E., KUČERA R., KUNCEOVÁ E., KÚRKOVÁ I., NAHODILOVÁ R., PACHEROVÁ P., PERTOLDOVÁ J., PEŘESTÝ V., RUKAVIČKOVÁ L., SOEJONO I., ŠVAGERA O., VERNER K., ŽÁČEK V. (2018): Závěrečná zpráva 3D strukturně – geologické modely potenciálních lokalit HÚ. MS SÚRAO, TZ 229/2018, Praha, 594 str.
- FRANĚK J., BUKOVSKÁ Z., ČEJCHANOVÁ A., JELÉNEK J., MLČOCH B., PERTOLDOVÁ J., SKÁCELOVÁ Z., SOEJONO I., ŠVAGERA O., VERNER K., MILICKÝ M., BARTÁŠKOVÁ L. (2015): Regionální 3D strukturně geologický model lokality Horka. Technická zpráva MS SÚRAO Praha.
- HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., BAIER, J., MILICKÝ, M., POLÁK, M., BUKOVSKÁ, Z., ČERNÝ, M., DUŠEK, K., FIFERNOVÁ, M., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., HOLEČEK J., JELÉNEK, J., JANKOVEC, J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., KUNCEOVÁ, E., PETYNYIAK, O., RAPPRIK, V., RUKAVIČKOVÁ, L., SOEJONO, I., ŠVAGERA, O., UHLÍK, J., VOJTĚCHOVÁ, H., ŽÁČKOVÁ, E. (2020a): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Březový potok. MS SÚRAO, TZ 447/2020, 62 str.
- HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., JANKOVEC, J., UHLÍK, J., ČERNÝ, M., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., BAIER, J., DUŠEK, K., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., HEJTMÁNKOVÁ, P., HOLEČEK J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., MILICKÝ, M., NAHODILOVÁ, R., PACHEROVÁ, P., PETYNYIAK, O., PEŘESTÝ, V., RAPPRIK, V., ŘIHOŠEK, J., RUKAVIČKOVÁ, L., ŠVAGERA, O., POLÁK, M., VOJTĚCHOVÁ, H., ŽÁČKOVÁ, E. (2020e): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Janoch (ETE-jih). MS SÚRAO, TZ 451/2020, 63 str.
- HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., UHLÍK, J., JANKOVEC, J., MILICKÝ, M., BAIER, J., BURIÁNEK, D., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ, B., DUŠEK, K., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., GRUNDLOCH, J., HOLEČEK J., JELÉNEK, J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., KUNCEOVÁ, E., PETYNYIAK, O., POLÁK, M., RAPPRIK, V., RUKAVIČKOVÁ, L., ŠVAGERA, O., VOJTĚCHOVÁ, H. (2020f): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Horka. MS SÚRAO, TZ 452/2020, 63 str.
- HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., BAIER, J., MILICKÝ, M., BUKOVSKÁ, Z., ČERNÝ, M., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ, B., DUŠEK, K., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., HOLEČEK J., JANKOVEC, J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., KUNCEOVÁ, E., PETYNYIAK, O., POLÁK, M., RAPPRIK, V., RUKAVIČKOVÁ, L., ŠVAGERA, O., URÍK, J.,

- VOJTĚCHOVÁ, H., ŽÁČKOVÁ, E. (2020g): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Hrádek. MS SÚRAO, 453/2020, 63 str.
- MIXA P., SKÁCELOVÁ Z., PERTOLDOVÁ J., BUKOVSKÁ Z., BURIÁNEK D., DUDÍKOVÁ B., FRANĚK J., HRDLIČKOVÁ K., JELÍNEK J., NAHODILOVÁ R., SOEJONO I., VERNER K., ŽÁČEK V. (2019): Shrnutí výsledků geologických a geofyzikálních výzkumných prací provedených v období 9/2017–6/2019 pro aktualizaci hodnocení potenciálních lokalit hlubinného úložiště RAO. MS SÚRAO, TZ 412/2019, Praha, 427 str.
- NAVRÁTILOVÁ V., NOL O., KAŠPAR R., LANČA D., MIŠUREC J., NEDVĚD J., RAJCHL M., SOSNA K., ŠINDELÁŘ M., TLAMSA J., VOJTĚCHOVSKÁ A. (2017): Zpráva o provedení geologicko-výzkumných prací na lokalitě ETE-jih. Závěrečná zpráva, MS SÚRAO, 280 str.
- ŠVAGERA O., BUKOVSKÁ Z., ČEJCHANOVÁ A., FRANĚK J., JELÉNEK J., MLČOCH B., PERTOLDOVÁ J., SKÁCELOVÁ Z., SOEJONO I., VERNER K., MILICKÝ M., BARTÁŠKOVÁ L. (2016): Regionální 3D strukturně geologický model lokality Březový potok. Technická zpráva MS SÚRAO, Praha.

7.4.2 Zvětrávání, eroze, zpětná eroze, denudace

Popis:

Zvětrávání představuje mechanické a chemické změny hornin a minerálů v důsledku interakce horninového prostředí s povrchovými činiteli (atmosféra, biosféra). Dochází tak k přizpůsobení horninového materiálu povrchovým podmínkám, které jsou odlišné od podmínek, ve kterých dané horniny vznikají (tlak, teplota, přítomnost vody). Při zvětrávání dochází jak k fyzikálním, tak chemickým změnám vlastností hornin a minerálů (více o zvětrání v části FEP povrchové alterace) Charakter a intenzita zvětrávání je závislá na klimatických podmínkách. V teplém a humidním klimatu převažuje zvětrávání chemické jehož produkty jsou v oblasti Českého masivu vázány zejména na kředkvarterní období (mezozoikum, terciér). V aridních podmínkách převažuje zvětrávání mechanické, jehož produkty jsou vázány zejména na období glaciálů v průběhu kvartéru.

Eroze jsou výsledkem přímého působení exogenních činitelů na zemský povrch spočívající v rozrušování a transportu materiálu na zemském povrchu (půda, horniny). Příčinou eroze je mechanické působení pohybujících se okolních látek – proudící vody, větru a ledu. Z hlediska působících činitelů lze erozi rozdělit na (i) aluviální (způsobenou činností tekoucí vody), (ii) eolickou (způsobenou větrem) a (iii) periglaciální (způsobenou činností ledovce).

Intenzita a typ eroze závisí na především na těchto faktorech:

- Litologických a strukturních podmínky hornin předurčující rezistentnost horninového prostředí vůči erozi, přítomnost a charakter diskontinuit v horninovém prostředí, které mohou představovat zóny oslabení náchylnější k erozním procesům
- Topografie území a spádové poměry jednotlivých povodí, kde obecně platí, že vyšší topografický gradient s vyššími spádovými poměry představuje území s vyššími rychlostmi eroze
- Hydrologická pozice území a pohyb erozní báze, které představuje klíčový parametr pro působení aluviální eroze v dlouhodobém časovém horizontu z pohledu procesů zpětné eroze;

- Nadmořská výška, která v našich zeměpisných šířkách předurčuje klimatickou charakteristiku území a možnou přítomnost výskytu glaciálních a periglaciálních procesů a přítomnost jevů související s periglaciální erozí
- Vegetační pokryv, jehož přítomnost snižuje rychlosti erozních procesů.
- Klima, charakter a skupenství srážek, které ovlivňuje průtoky v říčních tocích a jejich erozní efekt proudící vody.

Zpětná eroze je proces postupného zahlubování dna toků postupující ve směru proti proudu toku. Pro intenzitu procesů zpětné eroze je klíčová:

1. Pozice a pohyb erozní báze (dolní hranice erozních procesů, zpravidla úroveň, kde fluviální systém přechází z erozního režimu do režimu akumulárního). Erozní báze tak určuje spádové poměry říčního systému a předurčuje charakter aluviálních procesů (eroze/akumulace) v konkrétních částech povodí. Erozní báze je často vázána na strukturní poměry a litologické poměry v daném povodí, její pohyb je řízen jednak pohybem absolutní erozní báze (světovou hladinou oceánu) a vertikálními pohyby povrchu. Čím vyšší spádové poměry, tím je hloubková komponenta eroze intenzivnější předurčuje vyšší intenzitu erozních procesů a větší zahloubení drenážního systému v daném povodí. Zjednodušeně platí, že relativní pokles erozní báze způsobuje zintenzivnění hloubkové eroze, naopak relativní růst úrovně erozní báze má za následek narovnání spádové křivky a potlačení vertikální komponenty eroze a zvýšení laterální složky eroze a akumulace materiálu.
2. Hydrologická pozice území (pozice v rámci dílčího povodí vztah k rozvodí), kde z dlouhodobého hlediska platí, že zpětnou erozí jsou nejvíce postižena území blíže erozní bázi, zatímco území přilehlá k rozvodím jsou méně citlivá na změny erozní báze a vykazují nižší dopad zpětné eroze.

Denudace soubor pochodů, které vedou ke snižování (zarovnávání) zemského povrchu a zmenšování tak nadmořské výšky a výškových rozdílů v terénu. Tento soubor pochodů je složen z procesů zvětrávání, odnosu (erozi) rozrušených hornin jako důsledek působení větru, mrazu, svahových pohybů.

Lokality hlubinného uložení RAO vykazují z pohledu dlouhodobé eroze a denudace podobné podmínky. Lokality jsou umístěny na místech tvořenými magmatickými nebo metamorfovanými horninami obecně s vyšší odolností proti erozi. Lokality jsou umístěny v podobné geomorfologické pozici – ve středních nebo vyšších částech povodí s vysokým podílem zarovnaných povrchů, kde jsou erozní procesy nižší intenzity, a nelze předpokládat, že hodnoty rychlostí eroze se bude na jednotlivých lokalitách lišit. Rychlosti denudace se dle dostupné literatury na Českém Masivu pohybují v řádu setin až prvních desetin milimetrů za rok (např. Hroch et al. 2015, Havlová et al. 2020 a, e, f, g). Nejvyšší hodnoty eroze v průběhu kvartéru v řádu desetin milimetrů za rok jsou známy z období středního pleistocénu. Tyto vyšší hodnoty zřejmě souvisí s výraznými glaciálními eventy, kdy při přechodu z glaciálu do interglaciálu zvýšenou erozi a denudaci přeurčovali následující faktory:

- zvýšená vodnost toků v důsledku akumulované vody v pevném skupenství,
- mechanicky porušené horninové prostředí jako výsledek mechanického zvětrávání,
- pokles erozní báze v důsledku izostáze způsobené odlehčením povrchu deglaciací.

Vliv na bezpečnost:

Procesy eroze a denudace mají přímý vliv na bezpečnost uložení v několika aspektech. Jednak v důsledku změn reliéfu a snižování povrchu může dojít v dlouhodobém měřítku ke

snížení hloubky uložiště a v extrémním případě k jeho obnažení. Změny reliéfu a zahlubování drenážního systému mají přímý vliv na hydrologii území, změny drenážní báze a rychlost proudění podzemní vody. Při výrazném prohloubení drenážního systému může dojít ke změně délek transportních cest mezi uložištěm a povrchem (biosférou) a k ovlivnění charakteru a rozložení environmentálních receptorů včetně biosféry, pokud by radionuklidy nebo jiné kontaminanty opustily uložiště.

Dostupná data

Údaje o erozních a denudačních procesech jsou uvedena v práci Hrocha et al. (2015) kde jsou shrnuta data o rychlosti denudace snižování povrchu na základě datování teras a datování pomocí radionuklidů. Diskutovány tu jsou výstupy měření změn povrchu pomocí citlivých stanic GPS. V této práci jsou také udávána data o rychlosti denudace na základě hmotové bilance z malých povodí. Data o rychlostech eroze a denudace a základních geomorfologických parametrech pro dlouhodobou erozi jako je pozice erozní báze a území přetvořené mladými cykly zpětné eroze je uvedena ve zprávách týkajících se hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti (Havlová et al., 2020 a, e, f, g).

Nejistoty

Stanovené hodnoty předpokládané rychlosti erozních a denudačních procesů jsou zatíženy značnými nejistotami, které spočívají v heterogenitě a nedostatku relevantních dat. Nejistoty vyplývají zejména z nízkého počtu údajů o stáří zachovaných povrchů a teras, většina těchto údajů pochází z nižších částí povodí hlavních říčních toků. Údaje o rychlosti zahlubování drenážního systému na základě datování pomocí radionuklidů jsou dostupné ve velmi omezeném počtu jen z širší oblasti Českého masivu. Další nejistotou představuje problematika možnosti recentních pohybů na zlomech, které jsou jedním z řídicích faktorů vertikálních pohybů povrchu a změn erozní báze.

Doporučení:

Pro přesnější stanovení rychlosti eroze a denudace vyplývá potřeba podrobnějšího výzkumu zahrnující ověření studium potenciálně aktivních tektonických struktur včetně aplikace metod DPZ; zhotovení podrobných geomorfologických interpretací vývoje reliéfu, analýzu kvartérních sedimentů a zvětralinového pokryvu a aplikaci datovacích meto pro přesnější stanovení zahlubování říčních systémů v geologické minulosti pro jednotlivá povodí.

Reference:

HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., BAIER, J., MILICKÝ, M., POLÁK, M., BUKOVSKÁ, Z., ČERNÝ, M., DUŠEK, K., FIFERNOVÁ, M., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., HOLEČEK J., JELÍNEK, J., JANKOVEC, J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., KUNCEOVÁ, E., PETYNIAC, O., RAPPRIK, V., RUKAVIČKOVÁ, L., SOJONO, I., ŠVAGERA, O., UHLÍK, J., VOJTĚCHOVÁ, H., ŽÁČKOVÁ, E. (2020a): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Březový potok. MS SÚRAO, TZ 447/2020, 62 str.

HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., JANKOVEC, J., UHLÍK, J., ČERNÝ, M., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., BAIER, J., DUŠEK, K., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., HEJTMÁNKOVÁ, P., HOLEČEK J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., MILICKÝ, M., NAHODILOVÁ, R., PACHEROVÁ, P., PETYNIAC, O., PEŘESTÝ, V., RAPPRIK, V., ŘIHOŠEK, J., RUKAVIČKOVÁ, L., ŠVAGERA, O.,

POLÁK, M., VOJTĚCHOVÁ, H., ŽÁČKOVÁ, E. (2020e): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Janoch (ETE-jih). MS SÚRAO, TZ 451/2020, 63 str.

HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., UHLÍK, J., JANKOVEC, J., MILICKÝ, M., BAIER, J., BURIÁNEK, D., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ, B., DUŠEK, K., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., GRUNDLOCH, J., HOLEČEK J., JELÉNEK, J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., KUNCEOVÁ, E., PETYNIÁK, O., POLÁK, M., RAPPRIČH, V., RUKAVIČKOVÁ, L., ŠVAGERA, O., VOJTĚCHOVÁ, H. (2020f): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Horka. MS SÚRAO, TZ 452/2020, 63 str.

HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., BAIER, J., MILICKÝ, M., BUKOVSKÁ, Z., ČERNÝ, M., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ, B., DUŠEK, K., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., HOLEČEK J., JANKOVEC, J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., KUNCEOVÁ, E., PETYNIÁK, O., POLÁK, M., RAPPRIČH, V., RUKAVIČKOVÁ, L., ŠVAGERA, O., URÍK, J., VOJTĚCHOVÁ, H., ŽÁČKOVÁ, E. (2020g): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Hrádek. MS SÚRAO, 453/2020, 63 str.

HROCH T., PAČES T., HOŠEK, J., NÝVLT, D., ŠEBESTA, J., HEJTMÁNKOVÁ, P. (2015b): Erozní stabilita lokalit. Závěrečná zpráva. – MS SÚRAO ZZ 25/2015, Praha.

7.4.3 Chemické a mineralogické změny

7.4.3.1 Interakce hornina – podzemní voda

Popis:

Geochemická interakce mezi přírodními vodami a horninovým prostředím je ireverzibilním, komplexním procesem, při kterém se mohou ustálit parciální rovnovážné stavy (Pačes a Mikšová eds 2013). Je nutno předpokládat, že hlavním geochemickým činitelem, jímž má být ovlivněno horninové prostředí, je podzemní voda. Voda, vstupující do horninového prostředí, reaguje s krystalinickými horninami, které jsou tvořeny alumosilikátovými minerály, jako jsou živce. Tyto vody živce rozpouštějí ireverzibilně a stávají se přesycené jílovými minerály. Ze vzniklého roztoku nejprve ireverzibilně krystalují minerály termodynamicky metastabilní, jako je halloysit, který stárnutím přechází do termodynamicky stabilní formy, kterou je kaolinit. Během tohoto ireverzibilního procesu může být chemické složení vod udržováno konstantní reverzibilním srážením amorfních metastabilních alumosilikátů (Pačes a Mikšová eds. 2013).

Procesy jsou významně ovlivněny složením podzemní vody (viz 6.7.4), vlastnostmi horniny (viz 6.7.3) a vlastnostmi pukliny a puklinové výplně (viz 6.7.2). Současně roli může hrát i obsah plynu (viz 6.7.5).

Význam těchto interakcí je dán jak jejich potenciálem ovlivnit hydrogeochemický vývoj geosféry, tak jejich vlivem na migraci radionuklidů geosférou řadou mechanismů:

- mají vliv na celkový hydrogeochemický systém v geosféře, zejména redoxní stav, a mají tedy hlavní vliv na rozpustnost a speciaci radionuklidů uvolněných z pole blízkých interakcí;
- srážení a rozpouštění puklinových minerálů může změnit systém proudění podzemní vody a jejich průtok, a tak ovlivnit dobu transportu radionuklidů geosférou;

- radionuklidy mohou být sorbovány (viz kap. 7.5.1.3) nebo inkorporovány do sekundárních produktů přeměny tvořených interakcí horniny a vody (viz kap. 7.4.3.2), a tím zpomalovat transport.

Procesy, které budou dlouhodobě působit, jsou:

- prosté rozpouštění a srážení minerálů),
- hydratace minerálů,
- hydrolytické rozpouštění a srážení minerálů,
- oxidace a redukce složek, které v přírodě vyskytují v několika valencích, jako je kyslík, železo, mangan, síra a uran,

Přítomnost nestabilních minerálů (např. pyrit) v hornině může významně ovlivnit geochemickou rovnováhu prostředí. Negativní ovlivnění prostředí, včetně inženýrských bariér, představuje v tomto případě především oxidace přítomných akcesorických sulfidů vedoucí k oxyselení prostředí a změně chemismu podzemní vody (významný nárůst koncentrací síranů).

Podzemní voda v geosféře bude interagovat s povrchy minerálů v puklinách, se kterými je v kontaktu. Pukliny jsou nejdůležitější cestou pro proudění podzemní vody v geosféře, a proto interakce mezi podzemní vodou a minerály puklinových výplní a mísení mezi typy podzemních vod budou dominovat změnám v hydrogeochemickém systému relevantním pro dlouhodobou bezpečnost. Minerály puklinových výplní nemusí být reprezentativní pro celkovou mineralogii horniny, protože samy o sobě pevnými produkty předchozích interakcí horniny a vody.

Většina reakcí nedosahuje chemické rovnováhy, protože řada těchto procesů probíhá pomalu a je ireversibilní. Rovnovážného stavu, zejména v hloubce, dosahují reakce mezi vodou a karbonáty a také ionto-výměnné reakce na povrchu jílových minerálů. Koncentrace a transport mnoha kovových a dalších stopových prvků bývá zásadně ovlivněno adsorpcí na jílové minerály a srážením se železem a manganem v oxidačním prostředí. V oxidačním pásmu se udržuje rovnováha s limonitem nebo goetitem. V hloubce, kde klesá redox potenciál, se voda blíží rovnováze se sideritem, hematitem a magnetitem. Tyto reakce, pokud není ve vodě přítomen sulfan, obvykle určují redox potenciál podzemní vody v granitech (Pačes a Mikšová eds. 2013).

Složení minerálů v hornině (viz kap. 6.7.3) může mít i vliv na záchyt plynů, rozpuštěných v podzemní vodě. Typickým příkladem je např. spotřeba kyslíku po uzavření úložiště či konsumpce kyslíku při průniku málo mineralizovaných vod, bohatých kyslíkem (Malstroem et al. 1995, Kotelnikova & Pedersen, 1998; Puigdomenech et al., 2001) Malmstroem et al., (1995) například studovali kinetiku rozpouštění silikátových minerálů obsahujících Fe(II) (biotitu a chloritu) a předložili jednoduchý výpočet doby potřebné pro spotřebu kyslíku ve granitu v důsledku oxidace Fe. (II) obsažené v silikátech. Výsledky ukázaly doby spotřeby O₂ v rozmezí od 50 do 300 let v závislosti na minerálu a na tom, zda byl kyslík považován za vyčerpaný přímou spotřebou na povrchu minerálu nebo oxidací Fe(II) dříve uvolněného z minerálu.

Vývoj chemismu prostředí HÚ v období po jeho uzavření bude záviset zejména na dvou hlavních faktorech – komponentách inženýrských bariér (materiál(y) UOS, materiál(y) těsnění a zásypu a materiál(y) speciálních konstrukcí (např. betonové směsi zátek)) a složení podzemní vody pronikající do HÚ. Důležitým faktorem ovlivňujícím chemismus prostředí je čas a kinetika reakcí mezi jednotlivými interagujícími prvky a kvantitativní zastoupení jednotlivých

reagujících složek. V čase po uzavření HÚ je důležitá termální fáze vývoje úložiště a rychlost saturace bentonitové bariéry v této fázi.

Vliv na bezpečnost:

Procesy budou ve vzdáleném poli probíhat po celou dobu existence úložiště. Ihned po jeho vybudování bude tento systém v dynamické a termodynamické nerovnováze, protože se bude ustalovat hydrodynamický režim narušený důlními pracemi. Během operační fáze budou do důlních prostor vtékat podzemní vody různého složení, což může vést ke srážení sekundárních minerálů. Numerické výpočty ukázaly, že tyto novotvořené sekundární minerály nemají negativní vliv na bezpečnostní funkci úložiště (Doménech et al., 2006).

Po určité době, kterou dohadujeme řádově na 10 až 100 let se tento režim ustálí a celý hydrodynamický a hydrochemický systém dosáhne stacionárního stavu. Tento stav bude trvat tak dlouho, dokud nedojde ke změně externích podmínek jako je teplota nebo infiltrace vody o jiném složení, než bylo původně.

Horninové prostředí musí být fyzikálně i chemicky kompatibilní s inženýrskými bariérami a projektové řešení úložiště musí být navrženo tak, aby zajistilo bezpečnost po celou dobu trvání životnosti úložiště. Je tedy nutné, aby chemické změny v hornině neprobíhaly tak, aby ovlivnily inženýrské bariéry či pozměňovaly horninu tak, aby docházelo např. ke vzniku preferenčních cest či uvolňování nežádoucích látek do prostředí HÚ (např. přítomnost rozpustných karbonátů či pyritu).

Negativním ovlivněním se podle vyhlášky č. 378/2016 Sb. tomto případě myslí jakékoliv ovlivnění zejména inženýrských bariér HÚ, které by mohlo přímo (např. erozí materiálu zásypu) či nepřímo vést k předčasnému selhání bezpečnostních funkcí těchto bariér.

Dostupná data:

Pačes (1983) obecně popisuje procesy interakce podzemní vody v krystalinických horninách, vztahených k Českému masivu, a to i včetně procesů rozpouštění a srážení, oxidace a redukce. V publikaci Pačes a Mikšová eds (2013) rozšiřuje na podrobný popis potenciální geochemické zonálnosti granitického masivu v ČR, a to včetně expertního odhadu přítomných fází a Eh charakteristik. Nicméně tato data jsou založena jednak na starších archivních datech z průzkumných prací, jednak na pozorování v důlních dílech (např. Pačes 1972, 1983 a starší). Kromě toho nebyly parametry, jako je např. Eh a pH měřeny moderními postupy, in situ a dlouhodobě. Nová data nejsou dostupná, jen limitovaně (např. Havlová et al. 2019; Bukovská et al. 2020).

Základní charakteristiky horninového prostředí na lokalitách Březový potok, Hrádek, Horka a Janoch je shrnuto a přehledně popsáno ve zprávách Havlová et al. (2020a-d). Hydrochemickou zonálnost vod v PVP Bukov až do hloubky cca 1200 m studovala Rukavičková v práci Bukovská et al. (2017) a Bukovská eds. (2020). Vyhodnocení složení podzemní vod na potenciálních lokalitách reportovala Havlová et al. (2015) a Červinka a Gondolli (2016), ačkoli většina dat pocházela z hloubek do 100 m.

Nejistoty:

Procesy interakce mezi horninou a podzemní vodou jsou poměrně dobře známy. Neznámou jsou složení pevné i kapalně fáze v hloubce a jejich heterogenita jak v hloubce nad 100 m, tak

napříč masivy. Mineralogické složení puklinových minerálů je mnohdy komplikované a nejsou dostupná termodynamická data pro modelování těchto procesů.

Reference:

- BUKOVSKÁ Z. ED. (2020): Získání dat z hlubokých horizontů dolu Rožná. – MS SÚRAO ZZ 464/2020, Praha.
- BUKOVSKÁ Z., VERNER K., BRÁZDA L., BURIÁNEK D., DOBEŠ P., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ B., ERBAN V., FRANĚK J., HALODOVÁ P., HANÁK J., HAVLOVÁ V., HOLEČEK J., JAČKOVÁ I., JELÉNEK J., KAŠPAR V., KOLOMÁ K., KOPAČKOVÁ V., KOUČKA L., KUČETA P., LAUFER 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. – MS SÚRAO, ZZ 191/2017, Praha.
- ČERVINKA R., GONDOLLI J. (2016): Výběr reprezentativních podzemních vod a příprava jejich syntetických ekvivalentů. - TZ 41/2016. SÚRAO Praha, 122 str.
- ČUBOVÁ K., BABOROVÁ L., NĚMEC M., JOHN J. (2017): Speciace radionuklidů v prostředí úložného systému úložiště pro odpady nepřijatelné do přípovrchových úložišť. – MS SÚRAO TZ 207/2017, Praha.
- DOMÉNECH C., ARCOS D., DURO L., GRANDIA F. (2006): Effect of the mineral precipitation-dissolution at tunnel walls during the operational and post-operational phases. SKB Technical Report TR 06-108.
- HAVLOVÁ V., VIDENSKÁ K., GONDOLLI J., MILICKÝ M., GVOŽDÍK L., KRÁLOVCOVÁ J., RUKAVIČKOVÁ L. (2015): Migrační procesy radionuklidů v prostředí krystalických hornin a migrační parametry hornin Českého masivu. TZ 13/2015. SÚRAO Praha, 122 str.
- HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., BAIER, J., MILICKÝ, M., POLÁK, M., BUKOVSKÁ, Z., ČERNÝ, M., DUŠEK, K., FIFERNOVÁ, M., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., HOLEČEK J., JELÉNEK, J., JANKOVEC, J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., KUNCEOVÁ, E., PETYNIÁK, O., RAPPRIČH, V., RUKAVIČKOVÁ, L., SOEJONO, I., ŠVAGERA, O., UHLÍK, J., VOJTĚCHOVÁ, H., ŽÁČKOVÁ, E. (2020a): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Březový potok. MS SÚRAO, TZ 447/2020, 62 str.
- HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., BAIER, J., MILICKÝ, M., BUKOVSKÁ, Z., ČERNÝ, M., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ, B., DUŠEK, K., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., HOLEČEK J., JANKOVEC, J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., KUNCEOVÁ, E., PETYNIÁK, O., POLÁK, M., RAPPRIČH, V., RUKAVIČKOVÁ, L., ŠVAGERA, O., URÍK, J., VOJTĚCHOVÁ, H., ŽÁČKOVÁ, E. (2020g): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Hrádek. MS SÚRAO, 453/2020, 63 str.
- HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., UHLÍK, J., JANKOVEC, J., MILICKÝ, M., BAIER, J., BURIÁNEK, D., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ, B., DUŠEK, K., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., GRUNDLOCH, J., HOLEČEK J., JELÉNEK, J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., KUNCEOVÁ, E., PETYNIÁK, O., POLÁK, M., RAPPRIČH, V., RUKAVIČKOVÁ, L., ŠVAGERA, O., VOJTĚCHOVÁ, H. (2020f): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Horka. MS SÚRAO, TZ 452/2020, 63 str.

HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., JANKOVEC, J., UHLÍK, J., ČERNÝ, M., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., BAIER, J., DUŠEK, K., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., HEJTMÁNKOVÁ, P., HOLEČEK, J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., MILICKÝ, M., NAHODILOVÁ, R., PACHEROVÁ, P., PETYNYIAK, O., PEŘESTÝ, V., RAPPRIK, V., ŘIHOŠEK, J., RUKAVIČKOVÁ, L., ŠVAGERA, O., POLÁK, M., VOJTĚCHOVÁ, H., ŽÁČKOVÁ, E. (2020e): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Janoch (ETE-jih). MS SÚRAO, TZ 451/2020, 63 str.

KOTELNIKOVA, S., & PEDERSEN, K. (1998). Microbial O₂ consumption in the Aespoe tunnel. SKB Report TR 99-17. SKB Stockholm.

MALMSTROEM, M., BANWART, S., DURO, L., WERSIN, P., & BRUNO, J. (1995). Biotite and chlorite weathering at 25 degrees C: the dependence of pH and (bi)carbonate on weathering kinetics, dissolution stoichiometry, and solubility; and the relation to redox conditions in granitic aquifers. SKB Report TR 95-01. SKB Stockholm.

PAČES T. (1983): Základy geochemie vod. 300 str., Academia, Praha.

PUIGDOMENECH, I., AMBROSI, J. P., EISENLOHR, L., LARTIGUE, J. E., BANWART, S. A., BATEMAN, K., MILODOWSKI, A. E., WEST, J. M., GRIFFAULT, L., GUSTAFSSON, E., HAMA, K., YOSHIDA, H., KOTELNIKOVA, S., PEDERSEN, K., MICHAUD, V., TROTIGNON, L., RIVAS PEREZ, J., & TULLBORG, E. L. (2001). O₂ depletion in granitic media The Rex project. SKB Report TR 01-05. SKB Stockholm.

PAČES T. A MIKŠOVÁ J. eds (2013): Far field of the geological repository in the Bohemian Massif. Czech Geological Survey, 1st edition, 346 pp.

7.4.3.2 Srážení a spolusrážení

Popis:

Procesy srážení a spolusrážení (koprecipitace) jsou velmi silně závislé na rozpustnosti radionuklidů (viz kap.7.4.4.1). Vzhledem k očekávaným velmi malým rychlostem uvolňování radionuklidů z blízkého pole interakcí a následnému zředění v geosféře se očekává, že koncentrace radionuklidů v geosféře budou na stopových úrovních a je nepravděpodobné, že by někdy dosáhly mezí rozpustnosti za očekávaných hydrogeochemických podmínek. Neočekává se tedy, že by vysrážení jednotlivých pevných fází radioaktivního prvku bylo významným imobilizačním procesem v geosféře, ale může dojít ke spolusrážení (koprecipitaci).

Koprecipitace je srážení radionuklidu s přirozeně se vyskytujícím hlavním druhem prvku (např. Ca) za vzniku pevného roztoku. K tomu může dojít v geosféře na rozhraní mezi podzemními vodami s různým složením, kde se srážejí minerály (např. hranice oxické/anoxické vody).

Precipitace a koprecipitace, ke kterým dochází na povrchu puklin, by mohly zpomalit transport radionuklidů. Mechanismus je považován za nevratný, pokud změna geochemických podmínek nezpůsobí opětovné rozpuštění vysrážených minerálních fází. Je možné, že srážení by mohlo způsobit tvorbu suspendovaných koloidů přímo z roztoku, a pokud by k tomu došlo, mohlo by to zvýšit transport radionuklidů v závislosti na pohyblivosti koloidní fáze (viz kap. 7.5.1.5)

Vliv na bezpečnost:

Spolusrážení radionuklidů se uvažuje v rámci inženýrských bariér, například o společném vysrážení ^{226}Ra s Ba (Bosbach et al. 2010), ale existují omezené informace o potenciálu společného vysrážení radionuklidů v geosféře. Spolusrážení se obvykle při hodnocení bezpečnosti nezohledňuje (Bruno et al. 2007).

Dostupná data:

Informace o procesech lze nalézt v zahraniční literatuře (Bosbach et al. 2010; Bruno et al. 2007). O procesech srážení minerálů na puklinách, které by mohly ovlivnit migraci radionuklidů, či koprecipitaci radionuklidů s pevnými fázemi v podmínkách Českého masivu nejsou informace.

Nejistoty:

Obecně platí, že nejistoty, které platí pro rozpustnost a speciaci (kap. 7.4.4.1), platí také pro precipitaci a koprecipitaci. Je nepravděpodobné, že by srážení byly významným procesem v geosféře, ale koprecipitace je možná. Existuje však značná nejistota ohledně povahy koprecipitujících fází, které se mohou tvořit v geosféře.

Reference:

- BOSBACH, D., BÖTTLE, M. & METZ, V. (2010): Experimental study on Ra^{2+} uptake by barite (BaSO_4). Stockholm, Sweden: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (SKB). Technical Report TR-10-43. 106 p. ISSN 1404-0344.
- BRUNO, J., BOSBACH, D., KULIK, D. & NAVROTSKY, A. (2007): Chemical thermodynamics of solid solutions of interest in nuclear waste management. A state-of-the-art report. Paris, France: OECD/Nuclear Energy Agency (NEA). Chemical Thermodynamics Series, Volume 10. NEA Thermochemical Database Project Publication. 266 p.

7.4.4 Chemické rovnováhy a kinetiky

7.4.4.1 Speciace a rozpustnost radionuklidů v podzemní vodě

Popis:

Některé radionuklidy uvolněné z porušeného kontejneru budou difundovat přes inženýrské bariéry a budou dostupné pro transport v geosféře. Proudění podzemní vody a advektivní transport v geosféře probíhá převážně v hydraulicky aktivních deformačních zónách (hydrogeologických zónách) a puklinách. Radionuklidy přítomné v geosféře budou přítomny buď ve vodné fázi, nebo budou sorbovány na výplňové minerály puklin nebo budou difundovat do matrice horniny, kde mohou být dále sorbovány na minerální povrchy. Menší část radionuklidů přítomných v geosféře může být také spojena s koloidy nebo s plynnou fází.

Pro studium migračních charakteristik radionuklidů v materiálech bariér hlubinného úložiště je nutné znát formu (speciati), v jaké se budou radionuklidy v prostředí těchto bariér nacházet. Obecně, látky rozpuštěné ve vodném roztoku se mohou vyskytovat v nabitě či nenabitě formě. Nabitě, ale i nenabitě částice mohou v roztoku elektrostaticky působit na ostatní přítomné nabitě či nenabitě částice. Rozpuštěné látky tvoří komplexy, které mohou být opět rozpuštěné nebo nerozpuštěné. Komplex vzniká ve chvíli, kdy se molekulární jednotka (například iont)

chová jako centrální skupina, která na sebe váže další molekuly či atomy (Sposito, 1989). Asociované ionty, například H^+ či OH^- , se pak nazývají ligandy.

Rozpustnost označuje maximální možnou koncentraci prvku ve vodě ve všech rozpuštěných chemických formách v podzemní vodě, které jsou v rovnováze mezi sebou navzájem a minerály v kontaktu s podzemní vodou (Posiva 2012). Probíhající reakce mezi vodou a horninou povedou k tomu, že složení horninové matrice se kolem pukliny a zlomů změní v důsledku interakce, a proto relevantní minerální povrchy pro řízení rozpustnosti a speciace budou spíše minerály sekundární alterace, které pokrývají stěny puklin, než minerály v horninové matrici (POSIVA 12-07).

Radionuklidy mohou být ve vodě přítomny v různých fyzikálně-chemických formách ovlivňujících transport/mobilitu a biologickou dostupnost. Forma radionuklidů závisí na zdrojích a podmínkách uvolňování a na transformačních procesech vyskytující se v prostředí. Speciace radionuklidů a rozpustnost v geosféře jsou obecně řízeny složením podzemní vody. Důležité pro rozpustnost a speciaci radionuklidů jsou pH, redoxní podmínky a koncentrace rozpuštěných plynů, anorganických aniontů, jako je uhličitán a chlorid, a organických komplexantů. Rozpustnost může být dále řízena společným srážením a tvorbou pevných roztoků.

Vliv na bezpečnost:

Je zásadní znát, v jaké formě se budou vyskytovat uvolněné RN z UOS, neboť náboj a velikost specie předurčuje její transportní chování. Zejména formy aniontové a nesorbující se mohou významným způsobem přispět k výsledné dávce na obyvatele, žijícího na lokalitě.

Z hlediska dlouhodobého vývoje HÚ je nutné brát také v potaz dlouhodobé procesy, které mohou ovlivnit stav a bezpečnost úložiště. Mezi tyto dlouhodobé změny patří:

- klimatické změny (viz kap. 8.2),
- denudace a eroze (viz kap. 7.4.2).

Vlivem těchto změn může dojít ke změně složení podzemní vody (viz kap. 6.7.4) či ke zvýšení či ke snížení koncentrace radionuklidů v přípovrchových vrstvách v důsledku snížení či zvýšení jejich ředění ostatními zdroji podzemní vody (Vokál et al. 2010a). Byla by tedy ovlivněna především speciace radionuklidů a jejich forma v roztoku.

Lze předpokládat, že pouze velmi malá část celkového inventáře radionuklidů migruje z blízkého pole do geosféry, a typicky to budou pouze radionuklidy s dlouhým poločasem rozpadu, málo se sorbující, sorbující a vysoce rozpustné radionuklidy v aniontové formě (např. ^{129}I , ^{14}C). V důsledku toho je mnohem méně pravděpodobné, že koncentrace radionuklidů v podzemních vodách v geosféře budou omezeny rozpustností ve srovnání s inženýrskými bariérami (např. v UOS, výplňových a tlumících materiálech). Je spíše nepravděpodobné, že by srážení bylo významným imobilizačním procesem v geosféře, ačkoli může dojít ke společnému vysrážení s hlavními prvky (např. $BaSO_4$ pro Ra) – viz kap. 7.4.3.2.

Dostupná data:

Definování rozpustnosti radionuklidů bylo aplikováno v mnoha rozsáhlých studiích zaměřených na výpočetní stanovení rozpustnosti radionuklidů provedených např. pro švédskou společnost SKB (Bruno et al. 1997; Duro et al. 2006; Grivé et al. 2010), finskou Posivu (Grivé et al. 2008; Wersin et al. 2014), kanadskou NWMO (Duro et al. 2010) nebo

belgickou SCK·CEN (Salah a Wang 2014) a byl také detailně recenzován v práci Bennetta (2014). Uvedené studie také obsahují doporučené pevné fáze limitující rozpustnost radionuklidů, které se napříč reporty příliš neliší.

Jako příklad přístupu k hodnocení speciace a rozpustnosti radionuklidů lze uvést např. zprávy Havlová et al. (2015) a Klajmon et al. (2017). Pro krystalické horniny byly výpočty speciace a rozpustnosti radionuklidů v podzemní vodě, relevantních pro hodnocení bezpečnosti. Speciace byla hodnocena souhrnně pro referenční složení podzemní vody dle Červinka a Gondolli (2016). Havlová et al. (2017) pak hodnotili speciaci radionuklidů v průměrných podzemních vodách lokalit v rámci procesu hodnocení lokalit (Havlová et al. 2019). Tato zpráva má však limitovanou výpovědní hodnotu, neboť byly z velké části hodnoceny podzemní vody do hloubky 50 m. Složení vody z hlubších polohy daných lokalit nebylo k dispozici.

Nejistoty:

Základní problémem je nedostatek dat pro složení podzemní vody v prostředí HÚ, tj. 500 m pod zemským povrchem, a to včetně pH, Eh, celkového obsahu látek, obsahu koloidů. Jedinou známou lokalitou, kde jsou tato data k dispozici, je podzemní laboratoř Bukov (např. Bukovská et al. 2017; Havlová et al. 2019), kdy byla definována oxidačně redukční zonálnost v dané lokalitě. Je však nutno si uvědomit, že PVP Bukov, potažmo bývalý uranový důl Rožná, je specifické pracoviště se specifickou mineralizací, horninovou heterogenitou, zatížené významným antropogenním postižením, čímž zcela neodpovídá představě o prostředí předpokládaného masivu pro umístění HÚ.

Lze předpokládat, že radionuklidy podstoupí při svém transportu několikero změn speciace vlivem složení roztoku dané bariéry. V případě horninového prostředí lze uvažovat především následující roztoky, s nimiž se radionuklidy mohou dostat do kontaktu:

- Pórová voda v horninové matici (viz kap. 6.7.4). Zda podléhá vlivu zonálnosti je diskutabilní. Lze předpokládat, že spíše má vliv složení horniny.
- Podzemní voda v puklinovém systému (viz kap. 6.7.4)
 - hlubšího oběhu
 - mělkého oběhu
- Interagující voda po změně vnějších podmínek
 - méně mineralizovaná voda ledovcová
 - silně mineralizovaná solanka

Lze předpokládat, že při průniku „nové“ vody do pórového prostředí začnou působit reakce s minerály a postupem času dojde k vytvoření pórové vody obdobného složení jako původní.

Pokud však dojde k průniku podzemní vody do puklinového prostředí, pak může dojít jednak k mísení těchto vod, jednak mohou vody intruzivní převládnout. Speciace radionuklidů však může být ve vodách, vzniklých mísením, i ve vodách intruzivní jiná než např. v Kolomá et al. (2018) nebo Havlová et al. (2019).

Dalšími nejistotami mohou být nejistoty analytické (chybně stanovené složení, včetně nevypořádaných nesrovnalostí v bilanci aniontů/kationtů), chybějící nebo chybné údaje (koncentrace, pH, Eh, TDS apod.), nesprávné použití složení roztoků, které neodpovídá účelu použití (např. použití složení mělkých podzemních vod pro hodnocení rozpustnosti/speciace radionuklidů ve vodách v hloubce kolem 500 m nebo vod z jiných geologických formací).

Reference:

- BENNETT, D.G. (2014): Radionuclide Solubility Limits in SKB's Safety Case. Main Review Phase. Report Number 2014:11. – Swedish Radiation Safety Authority (SSM), Sweden.
- BRUNO, J., CERA, E., DE PABLO, J., DURO, L., JORDANA, S., SAVAGE, D. (1997): Determination of Radionuclide Solubility Limits to Be Used in SR 97. Uncertainties Associated to Calculated Solubilities. SKB Technical Report TR-97-33. – SKB, Sweden.
- BUKOVSKÁ Z. ED. (2020): Získání dat z hlubokých horizontů dolu Rožná. – MS SÚRAO ZZ 464/2020, Praha.
- BUKOVSKÁ, Z., VERNER, K., BRÁZDA L., BURIÁNEK D., DOBEŠ P., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ B., ERBAN V., FRANĚK J., HALODOVÁ P., HANÁK J., HAVLOVÁ V., HOLEČEK J., JAČKOVÁ I., JELÉNEK J., KAŠPAR V., KOLOMÁ K., KOPAČKOVÁ V., KOUCKÁ L., KUČETA 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. – MS SÚRAO, ZZ 191/2017, Praha.
- ČERVINKA R., GONDOLLI J. (2016): Výběr reprezentativních podzemních vod a příprava jejich syntetických ekvivalentů. – Technická zpráva č. 41/2016, SÚRAO, Praha.
- ČUBOVÁ K., BABOROVÁ L., NĚMEC M., JOHN J. (2017): Speciace radionuklidů v prostředí úložného systému úložiště pro odpady nepřijatelné do přípovrchových úložišť. – MS SÚRAO TZ 207/2017, Praha.
- DURO L., MONTOYA V., COLÀS E., GARCÍA D. (2010): Groundwater Equilibration and Radionuclide Solubility Limits. NWMO Report TR-2010-02. – Nuclear Waste Management Organization (NWMO). Canada.
- DURO, L., GRIVÉ, M., CERA, E., GAONA, X., DOMÉNECH, C., BRUNO, J. (2006): Determination and Assessment of the Concentration Limits to Be Used in SR-Can. SKB Technical Report TR-06-32. – SKB, Sweden.
- GRIVÉ, M., DOMÉNECH, C., MONTOYA, V., GARCÍA, D., DURO, L. (2010): Determination and Assessment of the Concentration Limits to Be Used in SR-Can. Supplement to TR-06-32. SKB Report R-10-50. – SKB, Sweden.
- GRIVÉ, M., MONTOYA, V., DURO, L. (2008): Assessment of the Concentration Limits for Radionuclides for Posiva. Posiva Working Report 2007-103. – Posiva Oy, Finland.
- HAVLOVÁ V., KOLOMÁ K., BRÁZDA L., RUKAVIČKOVÁ L. (2017): Odhad hodnot transportní charakteristiky krystalinických hornin Českého masivu. - MS SÚRAO TZ 102/2017. SÚRAO Praha.
- HAVLOVÁ V., VIDENSKÁ K., GONDOLLI J., MILICKÝ M., GVOŽDÍK L., KRÁLOVCOVÁ J., RUKAVIČKOVÁ L. (2015): Migrační procesy radionuklidů v prostředí krystalických hornin a migrační parametry hornin Českého masivu. – MS SÚRAO, TZ 13/2015, Praha.
- HAVLOVÁ V., ZUNA M., BRÁZDA L., KOLOMÁ K., GALEKOVÁ E., ROSENDORF T., JANKOVSKÝ F. (2019): Migrační procesy radionuklidů v prostředí krystalických hornin a migrační parametry hornin Českého masivu. Revize 1. – MS SÚRAO, ZZ 333/2018, Praha.

- KLAJMON M., ČERVINKA R., HAVLOVÁ V., KOLOMÁ K., RUKAVIČKOVÁ L. (2017). Migrační procesy radionuklidů v prostředí krystalických hornin a migrační parametry hornin českého masivu. – MS SÚRAO, TZ 104/2017, Praha
- KOLOMÁ K., KLAJMON M., HAVLOVÁ V. (2018): Rozpustnosti, speciace a sorpční chování radionuklidů pro účely hodnocení vhodnosti lokalit pro umístění HÚ. Technická zpráva, – MS SÚRAO, Praha.
- NÝVLT D., DOBROVOLNÝ P. (2015): Klimatická stabilita území. Závěrečná zpráva. MS SÚRAO ZZ 22/2015, Praha. – MS SÚRAO TZ 232/2018, Praha.
- PAČES T. (1972): Chemické rovnováhy v přírodním systému voda-hornina-atmosféra. - Knihovna Ústředního ústavu geologického, Svazek 43. ÚUG Praha, pp.193.
- PAČES T. (1983): Základy geochemie vod. 300 str., Academia, Praha.
- PAČES T. A MIKŠOVÁ J. eds (2013): Far field of the geological repository in the Bohemian Massif. Czech Geological Survey, 1st edition, 346 pp.
- POSIVA (2012) Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto, Features, Events, and Processes. Posiva Report 2012-07.
- SALAH S., WANG L. (2014): Speciation and Solubility Calculations for Waste Relevant Radionuclides in Boom Clay (First Full Draft). Report SCK·CEN-ER-198. – Belgian Nuclear Research Centre (SCK·CEN). Belgium
- SPOSITO, G. (1989). The Chemistry of Soils. New York: Oxford University Press.
- VOKÁL A., HAVLOVÁ V., HERCÍK M., LANDA J., LUKIN D., VEJSADA J. (2010a): Aktualizace referenčního projektu hlubinného úložiště radioaktivních odpadů v hypotetické lokalitě. III. Etapa. Studie zadávací bezpečnostní zprávy. C. Dokumentační část. C.2 Hodnocení dlouhodobé bezpečnosti HÚ. Zpráva ÚJV Řež, a.s. EGP 5014-F-101420, 12/2010.
- WERSIN P., KICZKA M., ROSCH D. (2014): Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto: Radionuclide Solubility Limits and Migration Parameters for the Canister and Buffer. Posiva Report 2012-39. – Posiva Oy. Finland.

7.4.5 Mikrobiální činnost

Popis:

Biologické/biochemické procesy, které ovlivňují matrici, výplňový materiál, ale i celkový biologický/biochemický vývoj úložiště (pH, Eh, vývoj plynu apod.). Jde o biologické procesy ovlivňující úložiště, jako jsou např. degradace organických látek, ovlivnění cyklu dusičnanových a síranových iontů, růst biofilmu a vznik a únik plynů.

Mikrobiálně/biologicky zprostředkované procesy mohou vést k vývoji chemických gradientů v horninovém prostředí. Mikrobiálně/biologicky zprostředkované procesy mohou mít vliv na migraci radionuklidů a jiných kontaminantů, a to možným ovlivněním charakteristik transportních cest a/nebo sil, které pohánějí advekci tekutiny a/nebo difúzi rozpuštěných látek a plynů.

Mikrobiální aktivita má potenciál měnit fyzikální a (geo)chemické podmínky prostředí. Vliv mikrobiálně/biologicky zprostředkovaných procesů na chemické podmínky v úložišti (např. Eh,

pH, obsah rozpuštěného anorganického uhlíku) může ovlivnit rozdělování radionuklidů a dalších kontaminantů mezi různé imobilní pevné fáze a potenciálně mobilní tekuté fáze. Tento vliv zase může ovlivnit zpomalení migrace radionuklidů a jiných kontaminantů,

Mikrobi budou mít vliv především na funkčnost inženýrských bariér, nicméně vlastnosti horninového prostředí mohou mít vliv na jejich přítomnost a růst, kdy geochemické složení vody je jedním z určujících faktorů podmiňujících případnou mikrobiální aktivitu.

Obecně lze stanovit několik nepřímých kritérií indikujících budoucí nízkou míru mikrobiální aktivity:

- Nízký obsah či úplná absence (v podzemní vodě a horninovém prostředí) donorů elektronů (především organické sloučeniny – včetně metanu; vodík, sulfidy) (např. Halbeck a Pedersen 2008; POSIVA 2013),
- Nízký obsah či úplná absence (v podzemní vodě a horninovém prostředí) terminálních akceptorů elektronů (kyslík, dusičnany, sloučeniny manganu, železitany, sírany, elementární síra, CO₂) (např. Halbeck a Pedersen 2008; POSIVA 2013),
- Nízká rychlost proudění podzemní vody (Stroes-Gascoyne et al. 2007),
- Homogenní horninové prostředí – absence chemických gradientů prostředí, které podporují mikrobiální aktivitu (Pedersen 1997).

V geosféře se mikroby s největší pravděpodobností budou nacházet na površích puklinových minerálů, a mohou proto ovlivňovat interakce horniny a vody (viz kap. 7.4.3.1). Jsou považovány za významné pro kontrolu geochemických podmínek a zejména pro mikrobiální redukci síranů na sulfidy, a tím mohou ovlivnit korozi měděného přebalu. Obecně však platí, že mikrobiální populace a procesy v geosféře budou pravděpodobně méně významné než v blízkém poli interakcí (POSIVA 2012).

Mikrobiologické procesy v geosféře zůstanou potenciálně aktivní po celou dobu životnosti úložiště. Mikrobiální populace budou mít tendenci reagovat na všechny dostupné živiny nebo pronikající časem do geosféry z povrchu země, z větších hloubek nebo z uměle vytvořeného bariérového systému.

Vliv na bezpečnost:

Biologické/biochemické procesy ovlivňují matici, výplňový materiál, ale i celkový biologický/biochemický vývoj úložiště (pH, Eh, vývoj plynu apod.). Biologické procesy ovlivňující úložiště, jako je degradace organických látek, dusičnanových a síranových iontů, růst biofilmu a těkání.

Pouze některým mikrobům přítomným při uzavření úložiště budou následné podmínky vhodné pro jejich růst. Kromě toho, že vyžadují určité typy živin, budou jednotlivé mikrobiální populace fungovat pouze za určitých podmínek teploty, pH, Eh a salinity.

Dostupná data:

Mikrobiálnímu screeningu horninového prostředí v PVP Bukov se věnovala studie Steinové et al (2019). Průzkum prokázal výskyt metabolicky i fylogeneticky různorodých skupin mikroorganismů sekvenční analýzou amplikonů ¹⁶S rDNA i kultivačními metodami.

Mikrobiálním procesům v hlubinném úložišti se věnuje např. souhrnná práce Pedersen (2017).

Nejistoty:

Je zřejmé, že životaschopné mikrobiální populace se budou vyskytovat v geosféře a že jsou důležité pro řízení redoxního systému v hornině. Není však jisté, jak důležitý může být tento vliv na fungování systému úložiště. Očekává se však, že vliv mikrobů na transport radionuklidů v geosféře bude omezený (POSIVA 2012).

Existuje značná nejistota ohledně povahy a populací mikrobů, které by byly v geosféře dlouhodobě životaschopné. Není zcela jasné, jaké procesy jsou aktivně ovlivňovány přítomností mikrobů, nebo jako budou ovlivňovány při výstavbě a provozu úložiště a po uzavření zařízení.

A konečně kvantifikace mikrobiální aktivity není zcela verifikována.

Reference:

HALLBECK L., PEDERSEN K. (2008): Microbial life in deep granitic rock – Applied geochemistry 23: 1796-1819.

PEDERSEN K. (1997): Microbial life in deep granitic rock – FEMS Microbiol Rev. 20 (3-4): 399-414.

POSIVA (2012) Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto, Features, Events, and Processes. Posiva Report 2012-07.

POSIVA (2013): Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto – Performance Assessment 2012. – POSIVA Report 2012-04, POSIVA Oy, Olkiluoto, Finland.

STEINOVÁ J., BURKARTOVÁ M., ZUNA M., ČERNÍK M. (2019): Mikrobiální screening PVP Bukov a dolu Rožná. – MS SURAO ZZ 385/2019, Praha.

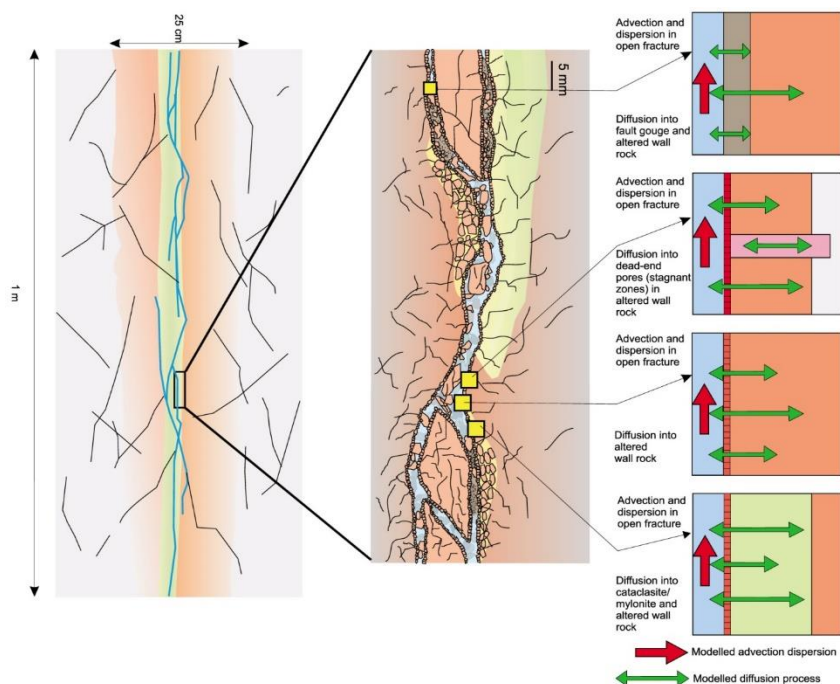
STROES-GASCOYNE S., SCHIPPERS A., SCHWYN B., POULAIN S., SERGEANT C., SIMONOFF M., LE MARREC C., ALTMANN S., NAGAOKA T., MAUCLAIRE L., MCKENZIE J., DAUMAS S., VINSOT A., BEAUCAIRE C. & MATRAY J. M. (2007): Microbial Community Analysis of Opalinus Clay Drill Core Samples from the Mont Terri Underground Research Laboratory, Switzerland – Geomicrobiology journal 24: 1-17.

7.5 Transportní procesy

7.5.1 Transport v kapalné fázi

Základní procesy transportu radionuklidu v kapalné fázi v puklině krystalinických hornin jsou zobrazeny na následujícím obrázku.

Advekce probíhá v hlavní části pukliny, zatímco do porušené zóny a horninové matrice jsou radionuklidy transportovány difúzí.



Obr. 10 Procesy transportu radionuklidů v puklinovém prostředí krystalinických hornin (Poteri et al. 2002); červená šipka advektivní transport; zelená šipka difúze.

7.5.1.1 Advektivní transport

Popis:

Kontaminace z prostoru HÚ, situovaného 500 m pod terénem, může být do biosféry transportována prostřednictvím podzemní vody. Ze všech transportních procesů je v prostředí geologické bariéry, reprezentované hydrogeologickým masivem krystalinických hornin, nejvýznamnější proces advekce. Advekční transport by se dal označit za proces unášení látek v roztoku transportního media vlivem hydraulického gradientu v geologickém prostředí. Rychlost advekčního transportu popisuje veličina nazvaná střední postupová rychlost v_s , která je definována pomocí objemové hustoty toku (tzv. darcyovská rychlost) a efektivní pórovitosti n_e jako:

$$v_s = \frac{1}{n_e} v = -\frac{K}{n_e} \nabla H.$$

V prostředí geologické bariéry HÚ je efektivní pórovitost velmi nízká, závislá na parametrech efektivně propojené sítě puklin. Efektivní pórovitost pro výpočet střední advektivní rychlosti tak bude vždy odlišná, nižší než laboratorně stanovená celková pórovitost. Reálná advekční rychlost je rovněž při detailním popisu jednotlivých pórů, kanálků či puklinových ploch od střední postupové rychlosti odlišná. Je to dáno rozdílným profilem rychlosti v pórovém průřezu, daným působením setrvačných sil mezi proudící kapalinou a stěnami póru/pukliny.

V regionálním pojetí analýzy možností transportu potenciální kontaminace z HÚ prostředím geologické bariéry v rámci koncepce ekvivalentního kontinua je popis transportní rychlosti pomocí střední postupové doby relevantní. V jednotlivé puklině nebo diskretní puklinové síti, kde je advekční rychlost dominantním transportním procesem, je efektivní pórovitost prostředí dána rozevřením (vzdáleností stěn pukliny). V případě transportu se pro výpočet obvykle používá tzv. transportní rozevření pukliny, které se od hydraulického rozevření liší. Advektivní

transport lze hydrogeologickým modelem v jakémkoli programu popsat pomocí metody označované jako particle tracking, která je založena na sledování konkrétního hmotného bodu modelovou doménou při využití vypočteného pole objemové hustoty toku a zadané efektivní pórovitosti. Tento algoritmus je součástí všech běžných modelových kódů, včetně kódů používaných v rámci přípravy HÚ v ČR (MODPATH pro MODFLOW, FEFLOW, CONNECTFLOW, FLOW123d).

Vliv na bezpečnost:

Tlakové poměry zájmové lokality spolu s odporovými parametry geologického prostředí tvoří proudové pole. Díky tomu může potenciální kontaminace z prostoru HÚ pronikat do prostoru biosféry prostřednictvím procesu advektivního transportu. Platí tedy přímá úměra, že čím intenzivnější bude proces proudění podzemní vody mezi HÚ a drenáží v zóně biosféry, tím větší je riziko advektivního transportu kontaminace. Omezení advektivního transportu je jedním z cílů realizace HÚ v hloubce hydrogeologického masivu a jednou z klíčových vlastností geologické bariéry. Výpočet advekční rychlosti transportu byl součástí realizovaných modelových hodnocení při zužování výběru kandidátních lokalit HÚ.

Dostupná data:

Doby dotoku a poměry ředění, kterými byla v modelech v regionálním měřítku analyzována rychlost advektivního transportu v geologické bariéře kandidátních lokalit, jsou pro kandidátní lokality přehledně uvedeny v (Havlová et al., 2020 a, b, c, d). Metodika zpracování matematických modelů proudění a navazujícího advektivního transportu je uvedena v (Uhlík et al., 2018) a (Říha et al., 2019). V (Říha et al., 2019) jsou rovněž uvedeny výsledky modelů advektivního transportu pro kandidátní lokality a je zde hodnocena rychlost transportu a míra předpokládaného ředění kontaminace z prostoru HÚ s ohledem na proudové pole jednotlivých lokalit. Modely jsou k dispozici včetně datových souborů pro spuštění výpočtu softwarem MT3D, FLOW123d a FEFLOW a sady výstupních souborů simulací.

Nejistoty:

Advektivní transport v geologické bariéře lokality HÚ lze popsat pomocí matematického modelu proudění podzemní vody a navazujícího modelu transportu. Nejistota vypočtené advektivní rychlosti transportu narůstá s nedostatkem kvalitních vstupních a kalibračních dat modelu. V současnosti nejsou k dispozici téměř žádné informace o odporových parametrech a zvodnění horninového prostředí kandidátních lokalit z hloubek pod vodohospodářsky využitelnou přípoверхovou vrstvou. Další nejistoty plynou z nedostatečné znalosti hydrologického režimu a režimu proudění podzemní vody (prozatím není realizován periodický hydrologický a hydrogeologický monitoring lokalit). Řada parametrů, které jsou nezbytné pro výpočet transportu, je tak v současnosti zadávána na základě kvalifikovaného odhadu a analogie s jinými průzkumnými lokalitami.

Pro snížení nejistoty výsledků a tím i snížení rizik neočekávaného vývoje při realizaci úložiště je třeba doplnit dosavadní informace o výsledky z hloubkového geologického a hydrogeologického průzkumu a režimního hydrologického a hydrogeologického monitoringu.

Reference:

HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., BAIER, J., MILICKÝ, M., POLÁK, M., BUKOVSKÁ, Z., ČERNÝ, M., DUŠEK, K., FIFERNOVÁ, M., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., HOLEČEK

- J., JELÉNEK, J., JANKOVEC, J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., KUNCEOVÁ, E., PETYNIÁK, O., RAPPRIČH, V., RUKAVIČKOVÁ, L., SOEJONO, I., ŠVAGERA, O., UHLÍK, J., VOJTĚCHOVÁ, H., ŽÁČKOVÁ, E. (2020a): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Březový potok. MS SÚRAO, TZ 447/2020, 62 str.
- HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., JANKOVEC, J., UHLÍK, J., ČERNÝ, M., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., BAIER, J., DUŠEK, K., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., HEJTMÁNKOVÁ, P., HOLEČEK J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., MILICKÝ, M., NAHODILOVÁ, R., PACHEROVÁ, P., PETYNIÁK, O., PEŘESTÝ, V., RAPPRIČH, V., ŘIHOŠEK, J., RUKAVIČKOVÁ, L., ŠVAGERA, O., POLÁK, M., VOJTĚCHOVÁ, H., ŽÁČKOVÁ, E. (2020d): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Janoch (ETE-jih). MS SÚRAO, TZ 451/2020, 63 str.
- HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., UHLÍK, J., JANKOVEC, J., MILICKÝ, M., BAIER, J., BURIÁNEK, D., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ, B., DUŠEK, K., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., GRUNDLOCH, J., HOLEČEK J., JELÉNEK, J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., KUNCEOVÁ, E., PETYNIÁK, O., POLÁK, M., RAPPRIČH, V., RUKAVIČKOVÁ, L., ŠVAGERA, O., VOJTĚCHOVÁ, H. (2020b): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Horka. MS SÚRAO, TZ 452/2020, 63 str.
- HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., BAIER, J., MILICKÝ, M., BUKOVSKÁ, Z., ČERNÝ, M., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ, B., DUŠEK, K., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., HOLEČEK J., JANKOVEC, J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., KUNCEOVÁ, E., PETYNIÁK, O., POLÁK, M., RAPPRIČH, V., RUKAVIČKOVÁ, L., ŠVAGERA, O., URÍK, J., VOJTĚCHOVÁ, H., ŽÁČKOVÁ, E. (2020c): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Hrádek. MS SÚRAO, 453/2020, 63 str.
- ŘÍHA, J., UHLÍK, J., GRECKÁ, M., (2019): Transportní modely – Závěrečná zpráva. – MS SÚRAO, TZ 324/2019
- UHLÍK J., ČERNÝ M., BAIER J., MILICKÝ M., POLÁK M., GVOŽDÍK L., KRÁLOVCOVÁ J., GRECKÁ M., RUKAVIČKOVÁ L. (2018): Detailní hydrogeologické modely lokalit. – MS SÚRAO, TZ 323/2018, Praha.
- VONDROVIC ET AL. (2019): Metodika zúžení počtu lokalit pro hlubinné úložiště v ČR v letech 2019-2020. – MS SÚRAO, TZ 423/2019.

7.5.1.2 Difúze

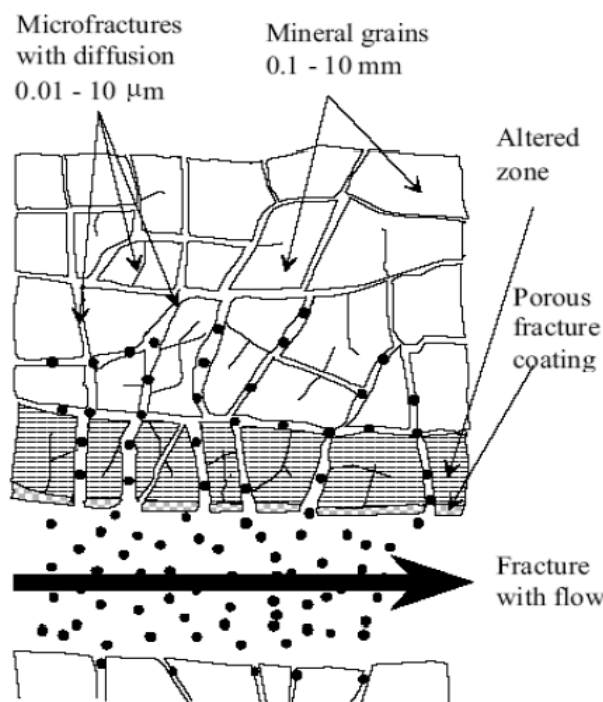
Popis:

Základním předpokladem pro uvažování difúze radionuklidů v horninovém prostředí je uvolnění radionuklidů z ukládacího obalového souboru až v „chladném“ období vývoje HÚ, kdy dojde k ztrátě soudržnosti materiálu UOS a migraci radionuklidů přes inženýrské bariéry. Z tohoto důvodu lze difúzi radionuklidů v provozní fázi a období po uzavření HÚ do poškození UOS zanedbat.

Difúzi je možno popsat jako transportní děj, v jehož průběhu na základě tepelného (Brownova) pohybu částic dochází k přenosu látky ve směru poklesu její koncentrace. Jestliže koncentrace v uvažovaném prvním objemu je větší než ve druhém, znamená to, že z prvního do druhého

objemu přechází více částic než z druhého do prvního. Výsledkem tak může být přenos látky neboli difúzní tok rozpuštěné látky ve směru menší koncentrace.

Proces difúze v prostředí krystalinických hornin je znázorněna na Obr. 10. Radionuklid vstupuje do pórové sítě horniny, ve kterém buď setrvá určitou dobu a vrací se zpět do hlavního advektivního toku pukliny nebo pokračuje v migraci systémem propojených pórů směrem do horniny ve směru nižšího koncentračního gradientu (migrace v horninové matici) – viz Obr. 11.



Obr. 11 Difúze radionuklidu z pukliny (advektivní tok) do horniny (převzato od M. Siitari-Kauppi)

Proces průniku migrující látky (stopovače, kontaminace je možno popsat následujícími vztahy.

Přímá úměrnost difúzního toku na koncentračním gradientu je popsána I. Fickovým zákonem (Lever a Woodwark, 1989). II. Fickův zákon popisuje koncentraci difundující látky jako funkci času a prostoru. Pokud D nezávisí na koncentraci, pro změnu difúzního toku podél souřadnice x (1D tvar) platí (Gosman a Jech, 1989).

Efektivní difúzní koeficient D_e ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) je definován rovnicí jako (Neretnieks, 1990):

$$D_e = \varepsilon \frac{\delta_D}{\tau^2} D_w = \varepsilon D_p = F_f D_w$$

kde ε je porozita, δ_D je konstrikivita, τ^2 tortuozita, D_w difuzivita ve volné vodě ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) a D_p difuzivita v pórech ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$). Parametr F_f je nazýván formačním faktorem.

V některých pracích je definována tzv. povrchová difúze pro sorbující se látky (např. Ohlssons a Neretnieks, 1995; Löfgren a Neretnieks, 2002; Jakob, 2004). Tato teorie předpokládá, že část adsorbovaných specií je mobilní a může difundovat podél pevného povrchu, čímž přispívá k celkovému difúznímu toku v horninové matici. Míra toku je popisována pomocí povrchového difúzního koeficientu D_s (Ohlssons a Neretnieks, 1995):

$$D_e = \varepsilon_t D_p + D_s \rho K_d$$

Za rovnovážného stavu pak bude celková míra transportu rovna sumě difúze v pórech a povrchové difúze (Neretnieks, 1990; Ohlssons a Neretnieks, 1995).

Alternativním způsobem sledování difúze je použití *zdánlivého difúzního koeficientu* (D_a) a horninového *kapacitního faktoru* (α), např.:

$$D_a = \frac{D_p}{R_f} = \frac{D_e}{\alpha} = \frac{D_e}{\varepsilon_t + \rho K_d}$$

Horninový kapacitní faktor α je závislý na transportní pórovitosti, dostupném stopovači a na množství prvku nasorbovaného na vzorek horniny. Pro nesorbující se neutrální látky (^3H) je $\alpha = \varepsilon_t$; pro kationty (sorbuující se – ^{137}Cs aj.) $\alpha > \varepsilon_t$; a pro anionty $\alpha < \varepsilon_t$, kdy je aniontová exkluze formálně brána jako záporná sorpce.

Při difúzi hraje roli rovněž náboj částice: v případě, že difundující částice má stejný náboj jako povrch horniny (povrch pórů), nemohou částice projít těmito cestami a akumulují se (iontová exkluze, selektivní filtrace). Pokud je přítomno více migrujících látek, může dojít k selektivní filtraci některých z nich.

Kromě toho chování migrující látky ovlivňuje složení podzemní vody (kompetice iontů, Eh, pH).

Míra průniku migrující látky / kontaminantu do neporušené horniny (do horninové matrice) závisí tedy na:

- vlastnostech pronikající látky (náboji, velikosti molekul, sorpční vlastnosti)
- vlastnostech podzemní vody (kompetence jednotlivých stopovačů, přítomnost komplexotvorných látek, pH, Eh, lokální koncentrační gradienty) – viz kap. 6.7.4
- vlastnostech horniny (pórovitost a systém propojení pórů, přítomnost puklinové výplně, počtu slepých pórů, tvar a velikost pórů atd.) – viz kap. 6.7.3
- interakci pronikající látky s horninou a jejími minerálními složkami – viz kap. 7.5.1.3., 7.4.3.2.

Vliv na bezpečnost:

Difúze do horninové matrice může mít významný vliv na retardaci jak sorbujících se, tak nesorbujících se látek, tj. na snížení jejich koncentrace ve vodě. Látka proniká z pukliny do horniny díky existenci mikropórů, a setrvává zde po dobu delší, než by v hornině zůstala v případě advektivního transportu v puklině. V těchto pórech může docházet i k sorpci migrující látky. Crawford a Löfgren (2019) například ukázali, že pokud do modelu transportu radionuklidu zavedou pro puklinu realistický vrstevnatý model puklinové výplně, popsany hodnotami sorpčního koeficientu K_d a difúzního koeficientu D_e , dojde k ponížení píku maximální aktivity až o 30 %.

Neretnieks (1980; v Moreno et al., 1989) hovoří o tom, že horninový objem, který je přístupný pro difúzi po stovky let, může mít výrazně větší retardační efekt než povrchová sorpce na puklinách, a to zejména jde-li o prvky, jejichž cesta do biosféry je kratší než poločas jejich

přeměny. Přístupný objem horniny bude záviset na sorpčních a difúzních vlastnostech horniny a nuklidů a také na velikosti povrchu v kontaktu s mobilním roztokem.

Současně může docházet k zadržení radionuklidů v pórech a k jejich zpětnému uvolnění do proudící vody v puklině, díky čemuž může dojít ke zpožděnému průniku některých radionuklidů.

Dostupná data:

Difúzní parametry byly pro horniny z Českého masivu stanoveny např. v pracích Jankovský et al. (2017, 2021), Bukovská et al. (2017), Bukovská ed. (2020), Havlová et al. (2013a, b; 2015, 2017, 2018, 2019 a,b).

V českém prostředí chybí data pro vzorky, které by pocházely z horizontů v úrovni potenciálního HÚ. Z této hloubky jsou dostupná pouze data z PVP Bukov (Bukovská et al. 2017; Bukovská eds. 2020). Pro reprezentaci potenciálních lokalit byly použity obdobné vzorky jako na lokalitách – Březový potok – Defurovy Lažany lom; Horka – vrt PZV1 Pozďátky; Hrádek – Boršov lom (Havlová et al. 2019). Pro lokalitu Janoch lze aproximovat metamorfované horniny (ruly) z lokality Kraví hora (Havlová et al. 2019). Vyhodnocení hodnot difúzních parametrů je uvedeno ve zprávě Havlová et al. (2019a).

Nejistoty:

Difúzní transport v geologické bariéře lokality HÚ lze popsat pomocí matematického modelu, obvykle založeném na Fickovském přístupu. Primární nejistota vstupuje již s popisem procesu difúze, neboť celá řada modelů nedokázala popsat výsledky difúzních experimentů, a to zejména těch in situ (Havlová et al. 2022). Další nejistotou, která vstupuje do procesu popisu procesu difúze v horninovém prostředí je neznámá heterogeneita horninového masivu, které může vést k odlišnostem v difuzivitě i na krátké vzdálenosti či naopak k vytvoření propojených domén na vzdálenosti i desítek metrů. Neznámou je i lokalizace přítomnosti minerálních fází, která difúzi nahrávají, jako jsou např. slídy či plagioklas. Neznáme rovněž složení pórové vody krystalinických hornin, které může mít vliv na speciaci daného radionuklidu ve vodě. Její složení pouze odhadujeme na základě expertní úvahy. Konvenční metody popisu pórového prostoru a stanovení porozity neodpovídají zcela jednoznačně na otázky, s jakými hodnotami celkové a efektivní porozity můžeme při popisování procesu difúze počítat.

V českém prostředí chybí data pro vzorky, které by pocházely z horizontů v úrovni potenciálního HÚ. Dostupná jsou pouze data z PVP Bukov (Bukovská et al. 2017; Bukovská eds. 2020), doplněná horninami, které z velké části pocházejí z lokalit, kde jsou horniny obdobné těm na lokalitách Březový potok, Horka, Hrádek a Janoch (Havlová et al. 2019b). Difúzní data jsou pro ně dostupná pouze pro některé radionuklidy. Ostatní jsou odhadovány jen na základě expertního odhadu a literárních podkladů (Havlová et al. 2019a)

Reference:

BUKOVSKÁ Z. ED. (2020): Získání dat z hlubokých horizontů dolu Rožná. – MS SURAO ZZ 464/2020, Praha.

BUKOVSKÁ Z., VERNER K., BRÁZDA L., BURIÁNEK D., DOBEŠ P., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ B., ERBAN V., FRANĚK J., HALODOVÁ P., HANÁK J., HAVLOVÁ V., HOLEČEK J., JAČKOVÁ I., JELÉNEK J., KAŠPAR V., KOLOMÁ K., KOPAČKOVÁ V., KOUČKÁ L., KUČETA 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. – MS SÚRAO, ZZ 191/2017, Praha.
- CRANK J. (1979): Mathematics of diffusion. Clarendon Press, London, 1979.
- CRAWFORD, J., LÖFGREN M. (2017): Modelling of radionuclide retention by matrix diffusion in a layered rock model. SKB report R -17-22, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm, Sweden.
- GOSMAN, A., JECH, Č. (1989): Jaderné metody v chemickém výzkumu. Academia, Praha.
- HAVLOVÁ, V., BALVÍN A., ČERVINKA R., HERNYCH M., HOFFMANOVÁ E., HOKR. M., KAISER Z., LANDA J., LEVOROVÁ M., PALÁGYI, Š., PLUHAŘ T., RÁLEK P., SEIDL P., SLAVÍK L., SMUTEK J., ŠPÁNEK R., ŠTAMBERG K., TRPKOŠOVÁ D., VAŠÍČEK R., VEČERNÍK P., VIDENSKÁ K., VOPÁLKA D. (2013a): Závěrečná zpráva za etapu 5. projektu Výzkum vlastností horninového prostředí a vývoj postupů jejich hodnocení MPO TIP FR TI1/362, ÚJV 14284. - ÚJV Řež, a.s., 2013.
- HAVLOVÁ V., VEČERNÍK P., HOFMANOVÁ E., VEJSADŮ J., PALUKOVÁ V., GVOŽDÍK L., RUKAVIČKOVÁ L., NAJSER L. (2013b): Analýza kvalitativních a kvantitativních parametrů jádra z výzkumné lokality. Zpráva o provedených pracích spolupříjemcem v průběhu projektu Výzkum vlivu mezizrnné propustnosti granitů na bezpečnost hlubinného ukládání do geologických formací a vývoj metodiky a měřící aparatury MPO TIP FR TI1/367. - ÚJV Řež, a.s., 2013.
- HAVLOVÁ V., VIDENSKÁ K., GONDOLLI J., MILICKÝ M., GVOŽDÍK L., KRÁLOVCOVÁ J., RUKAVIČKOVÁ L. (2015): Migrační procesy radionuklidů v prostředí krystalických hornin a migrační parametry hornin Českého masivu. TZ 13/2015. SÚRAO Praha, 122 str.
- HAVLOVÁ V., ZUNA M., BRÁZDA L., JANKOVSKÝ F. KOLOMÁ K., KOLOMÁ K., TRPKOŠOVÁ D., MILICKÝ M., GVOŽDÍK P., SOSNA K., POLÁK M. (2017): Přenos hodnot migračních Parametrů granitických hornin z Mikroměřítka do REálného měřítka horninového masivu (PAMIRE). Závěrečná výzkumná zpráva projektu TA04020986, Z 4933
- HAVLOVÁ V., ZUNA M., BRÁZDA L., KOLOMÁ K., GALEKOVÁ E., ROSENDORF T., JANKOVSKÝ F. (2018): Migrační procesy radionuklidů v prostředí krystalických hornin a migrační parametry hornin Českého masivu. – MS SÚRAO, ZZ 333/2018, Praha. 2015.
- HAVLOVÁ V., KOLOMÁ K., BRÁZDA L., RUKAVIČKOVÁ L. (2019a): Odhad hodnot transportní charakteristiky krystalinických hornin Českého masivu. Revize 1. – MS SÚRAO, TZ 102/2017, Praha.
- HAVLOVÁ V., ZUNA M., BRÁZDA L., KOLOMÁ K., GALEKOVÁ E., ROSENDORF T., JANKOVSKÝ F. (2019b): Migrační procesy radionuklidů v prostředí krystalických hornin a migrační parametry hornin Českého masivu. Revize 1. – MS SÚRAO, ZZ 333/2018, Praha.
- Havlová V., Bedrníková E., Večerník P., Kolomá K., Vopálka D., Drtinová B., Baborová L. (2022): Nejistoty postupů využívaných pro predikci retardačních parametrů bariér a migrace radionuklidů v HÚ. – MS SURAO, TZ 593/2022. SURAO, Praha.
- JAKOB A. (2004): Matrix diffusion for performance assessment - experimental evidence, modelling assumptions and open issues. PSI Report Nr. 04-08. PSI, Villigen, Switzerland.
- JANKOVSKÝ F., HAVLOVÁ V., ZUNA M., KŮS P., POLÁK M., JANKOVEC J., ZEMAN O., MILICKÝ M., GVOŽDÍK L., HOKR M. (2017): Vývoj nástrojů pro studium transportu kontaminantů

v puklinovém prostředí. Průběžná zpráva projektu TAČR TH02030543 Vývoj nástrojů pro studium transportu kontaminantů v puklinovém prostředí. ÚJVC Řež, a. s.

JANKOVSKÝ F., HAVLOVÁ V., ZUNA M., TRPKOŠOVÁ D., MILICKÝ M., POLÁK M., JANKOVEC J., HOKR M., BALVÍN A., RÁLEK P., PARMA P. (2021): Vývoj nástrojů pro studium transportu kontaminantů v puklinovém prostředí. Závěrečná zpráva projektu TH02030543, ÚJV Řež report Z5539, ÚJV Řež, a. s.

LEVER, D. A. A WOODWARK, D. R. (1990): Radionuclide transport by groundwater flow through geosphere. Current status 1989. Nirex Safety Series NSS/G 113. Harwell Lab., Didcot, UK.

LÖFGREN M. (2004): Diffusive properties of granitic rock as measured by in-situ electrical method. Doctoral thesis, Royal Institute of Technology Stockholm.

LÖFGREN M. A NERETNIEKS I. (2002): Formation factor logging in-situ by electrical methods. Background and methodology. SKB Technical Report TR-02-07, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm, Sweden.

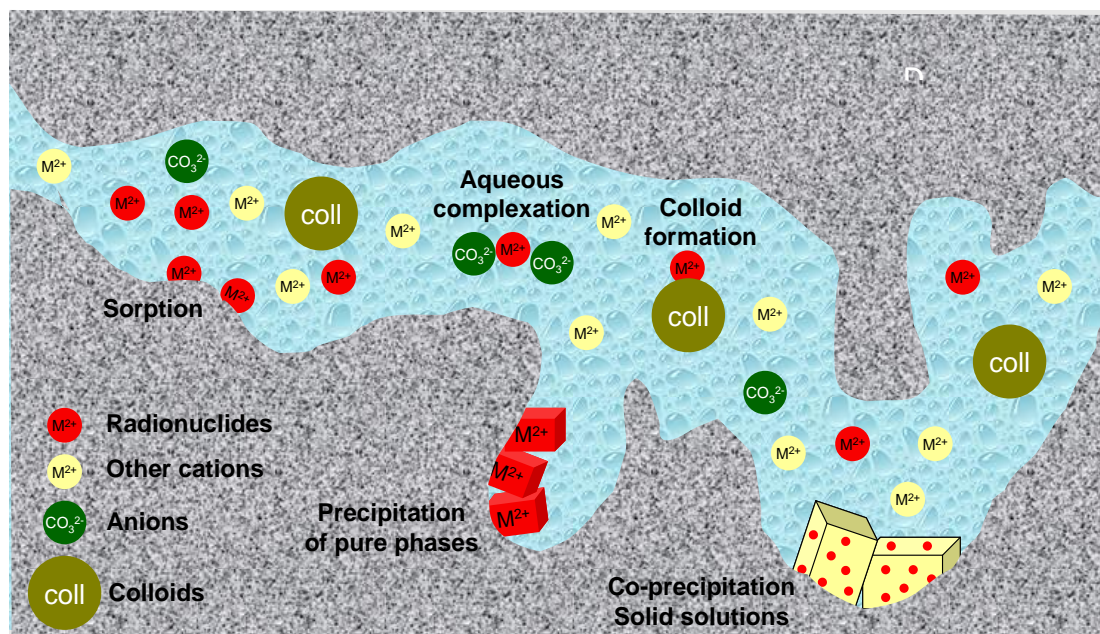
OHLSSONS Y., NERETNIEKS I. (1995): Literature survey of matrix diffusion theory and of experiments and data including natural analogues. SKB Technical Report TR 95-12, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm, Sweden.

POTERI A., BILLAUX D., DERSHOWITZ W., GOMEZ-HERNANDEZ J.J., CVETKOVIC V., HAUTOJA RVI, A., HOLTON D., MEDINA A., WINBERG A. (2002). Final report of the TRUE Block Scale Project #3 (4): Modelling of flow and transport. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management. SKB TR-02-15.

7.5.1.3 Sorpce

Popis:

V pórovém prostoru horninové matrice či v puklině může docházet k interakci migrující látky s povrchem pevné fáze, a to buď s primárními minerály či se sekundárními fázemi, vytvořenými v důsledku precipitace z podzemní vody či degradací primárních minerálů na povrchu puklin. Záchyt látek v tomto případě obecně označujeme jako sorpci a může vést k zadržení migrující látky v hornině či jejímu zpomalení (viz Obr. 12).



Obr. 12 Konceptní model retenčních procesů v puklině krystalických hornin (David Arcos, Amphos21)

Někdy jsou podle toho, zda dochází k přímé inkorporaci do povrchu či pouhé vazbě na povrch, rozlišovány procesy absorpce a adsorpce. Obvykle je však problematické mikroskopicky tyto procesy odlišit a makroskopický efekt je identický, termín sorpce tedy zahrnuje procesy oba.

Někteří autoři vydělují mezi sorpčními procesy pouze iontovou výměnu, povrchovou komplexaci a fyzikální sorpci. Jiní zařazují i další typy interakce látek v roztoku s pevnou fází, jako je například spolusrážení (viz kap. 7.4.3.2) nebo vazba na koloidy (viz kap. 7.5.1.5)

Při procesu adsorpce dochází ke vzniku nespécifických vazeb (van der Waalsových) mezi vnějšími elektronovými slupkami atomů v roztoku a sorbentu. Proces je rychlý, nezávisí na chemickém složení pevné látky, iontové síle roztoku a na koncentraci rozpuštěné látky při nízkých celkových koncentracích. Fyzikální sorpce se projevuje zejména u hydrolyzovaných a komplexotvorných kovových iontů, jako jsou např. aktinidy. Při elektrostatičké adsorpci (povrchová komplexace, iontová výměna) působí elektrostatičké (coulombovské) síly mezi elektricky nabitými látkami v roztoku a povrchem, nabitým opačným nábojem. Iontová výměna je ve srovnání s ostatními procesy rychlá a reverzibilní. Chemická adsorpce je způsobena chemickými vazbami mezi látkou v roztoku a povrchem pevné fáze. Proces je specifický, nevratný a pomalý. Příkladem může být vazba jódu na minerály obsahující kovové ionty.

Míra sorpce je určována vlastnostmi sorbující se látky a složením látky, na níž se sorbuje. Vlastnosti sorbentu jsou v mikroměřítku definovány specifickým povrchem, povrchovým nábojem, hustotou sorpčních míst a funkčních skupin.

Pukliny v horninovém masivu jsou ve většině případů vyplněny puklinovými minerály. Při komplexní charakterizaci PVP Bukov (Bukovská et al. 2017) byly identifikovány zóny alterací až několik metrů široké, tvořené především kalcitem, chloritem, hematitem, slídkami, palygorskitem, kaolinitem, tektitem, illitem a minerály zeolitové skupiny, jež reprezentují minerály, jež se vyznačují významně vyššími hodnotami sorpčních parametrů (Havlová et al. 2019). Rozdíly mezi sorpčními parametry puklinové výplně a horninové matrice (např. v řádech) lze odhadovat i na základě jednoduchých sorpčních batch experimentů, kde jsou jasně patrné rozdíly sorpční kapacity v případě přítomnosti slídky a sekundárních minerálů typu

kaolinit, kdy jsou hodnoty sorpčních koeficientů K_d prakticky o řád vyšší než u horninové matrice (Havlová et al. 2019).

Vliv na bezpečnost:

Sorpce představuje významný proces, kdy radionuklidy při transportu horninovým prostředím reagují s okolním horninovým prostředím a mohou se vázat na jeho složky (retardace). V důsledku toho může dojít ke zpomalení rychlosti transportu radionuklidů v porovnání s rychlostí toku podzemní vody v puklině.

Dostupná data:

Data popisující sorpci radionuklidů na horniny Českého masivu jsou shrnuta zejména ve zprávě Havlová et al. (2019a), a dále Havlová et al. (2019b). Rozsáhlý set dat je také ve zprávě Bukovská et al. (2017).

Nejistoty:

Nejistoty spojené se posouzením sorpčních procesů byly nově shrnuty ve zprávě Havlová et al. (2022). Jde např. o následující nejistoty

- K experimentálním pracím v laboratoři se často používají vzorky malých rozměrů či vzorky dokonce mleté. Vlivem zvýšení specifického povrchu vzorku může dojít k nadhodnocení sorpčních vlastností.
- Vlivem heterogennímu složení horninového materiálu dojde k nabohacení obsahu minerálů s vyšší sorpční schopností, čímž dojde k nadhodnocení sorpce nebo opačně; při nabohacení minerálů s nižší sorpční schopností dojde k podhodnocení sorpce
- Při transpozici výsledků laboratorních experimentů do měřítka in situ může dojít k nadhodnocení hodnot sorpčních parametrů vlivem zvýšení dostupného sorpčního povrchu. V zájmu konzervativního přístupu k daným datům je vhodné sorpční data pro potřeby hodnocení bezpečnosti (vstupní parametry) zaokrouhlit dolů faktorem nejméně 10 a možná až 100 tak, aby se zajistilo, že retenční vlastnosti nejsou přeceněny.

V českém prostředí chybí data pro vzorky, které by pocházely z horizontů v úrovni potenciálního HÚ. Dostupná jsou pouze data z PVP Bukov (Bukovská et al. 2017; Bukovská eds. 2020), doplněná horninami, které z velké části pocházejí z lokalit, kde jsou horniny obdobné těm na lokalitách Březový potok, Horka, Hrádek a Janoch (Havlová et al. 2019b). Sorpční data jsou pro ně dostupná pouze pro některé radionuklidy. Ostatní jsou odhadovány jen na základě expertního odhadu a literárních podkladů (Havlová et al. 2019a).

Reference:

BUKOVSKÁ Z., VERNER K., BRÁZDA L., BURIÁNEK D., DOBEŠ P., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ B., ERBAN V., FRANĚK J., HALODOVÁ P., HANÁK J., HAVLOVÁ V., HOLEČEK J., JAČKOVÁ I., JELÉNEK J., KAŠPAR V., KOLOMÁ K., KOPAČKOVÁ V., KOUČKA L., KUČETA 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. – MS SÚRAO, ZZ 191/2017, Praha.

BUKOVSKÁ Z. ED. (2020): Získání dat z hlubokých horizontů dolu Rožná. – MS SURAO ZZ 464/2020, Praha.

HAVLOVÁ V., KOLOMÁ K., BRÁZDA L., RUKAVIČKOVÁ L. (2019a): Odhad hodnot transportní charakteristiky krystalinických hornin Českého masivu. Revize 1. – MS SÚRAO, TZ 102/2017, Praha.

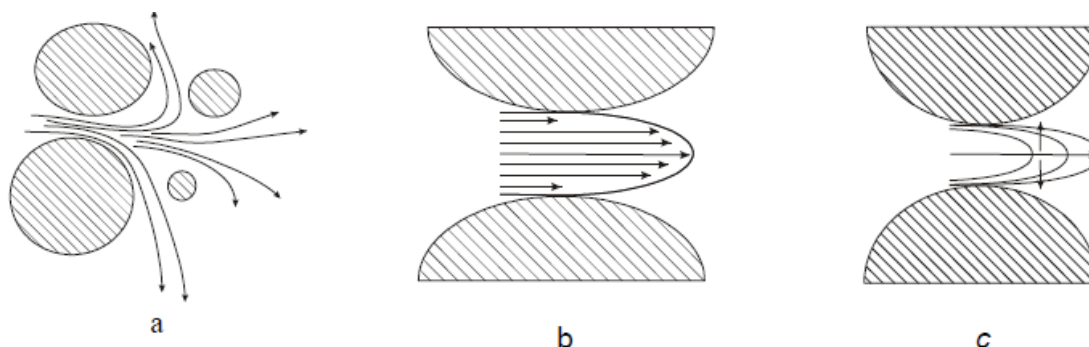
HAVLOVÁ V., ZUNA M., BRÁZDA L., KOLOMÁ K., GALEKOVÁ E., ROSENDORF T., JANKOVSKÝ F. (2019b): Migrační procesy radionuklidů v prostředí krystalických hornin a migrační parametry hornin Českého masivu. Revize 1. – MS SÚRAO, ZZ 333/2018, Praha.

Havlová V., Bedrníková E., Večerník P., Kolomá K., Vopálka D., Drtinová B., Baborová L. (2022): Nejistoty postupů využívaných pro predikci retardačních parametrů bariér a migrace radionuklidů v HÚ. – MS SURAO, TZ 593/2022. SURAO, Praha.

7.5.1.4 Disperze

Popis:

Pohyb kontaminantu se může uskutečňovat kromě advekce také disperzí. Pod pojmem *disperze* (někdy s přidavkem *hydrodynamická*) jsou rozuměny procesy, které způsobují nestejnou rychlost kontaminantu vzhledem k advektivnímu pohybu podzemní vody. Podle jiné definice lze disperzi charakterizovat jako distribuci dob zdržení (prodlení) částic tekutiny v daném systému. Je vysvětlována jako výsledek *mechanické disperze*, působící na makroskopické úrovni, a *molekulární difúze*, projevující se v mikroskopickém měřítku (Bear, 1988) - viz Obr. 13



Obr. 13 Schematické znázornění procesu hydrodynamické disperze: a), b) mechanická disperze, c) molekulární difúze (podle Beara, 1988).

Molekulární difúze vyrovnává koncentrační gradient rozpuštěné látky, který se vytváří v důsledku různých průtokových rychlostí v pórech a též následkem nerovnoměrného rozložení pórů. Působí proto kolmo na trajektorii toku.

Druhou složkou je fluktuace rychlosti (tj. rozptyl skutečných rychlostí částic kolem střední hodnoty) díky nerovnoměrnému rozložení rychlosti proudění v pórech (důsledek mechanického tření na fázovém rozhraní), větvení a spojování pórů, existence pórů nedostatečně propojených s hlavními proudovými vlákny atd. (Bear, 1988).

Disperze může nastat ve směru proudění (podélná disperze) a kolmo ke směru proudění (příčná disperze).

Kvantitativní určení, zda v systému převažuje mechanická disperze či difúze, je založeno na bezrozměrném Pecletově čísle (P_e), definovaném v práci Beara (1988) jako:

$$P_e = \frac{Z \cdot v}{D}$$

Význam transportního mechanismu pak závisí na velikosti *Pecletova čísla* P_e :

- hodnota P_e je menší než 10^{-1} , převažuje molekulární difúze, neboť průtoková rychlost konverguje k nule.
- hodnota P_e je 0,4-5, pak mechanická disperze a molekulární difúze jsou přibližně stejného řádu.
- poměr disperzního a difúzního koeficientu $D/D_{mol} = \alpha(P_e)^m$, kdy pro α a m platí $\alpha \approx 0,025-0,5$, $1 < m < 1,2$, pak disperze je z větší části dána mechanickou disperzí.
- poměr $D/D_{mol} = \beta \cdot P_e$ $\beta \approx 1,8$, pak vliv mechanické disperze je zcela dominantní a vliv molekulární difúze je zanedbatelný.

Vliv na bezpečnost:

Disperzní člen je součástí advektivně disperzního popisu proudění podzemní vody. Disperze může přispět k re-distribuci radionuklidů v prostoru horninového masivu, ale lze předpokládat, že advekce, difúze a sorpce budou mít větší vliv na zajištění retardačních funkcí horninového masivu než disperze.

Dostupná data:

Principy disperze jsou popsány v základních pracích popisujících transport, např. Bear et al. (1988) nebo Savage (1995).

V českém prostředí se detailně modelováním disperze v puklině krystalinických hornin zabýval kolektiv řešitelů např. v práci Jankovský et al. (2021). V kolonovém se advektivně disperznímu transportu radionuklidů v drceném uspořádání granitickém materiálu věnovali Palágyi et al. (2009; 2010) a Palágyi a Štamberg (2010a,b,).

Nejistoty:

Nejistoty jsou spojeny jednak s matematickým vyhodnocení procesu disperze, analytickými postupy, jak disperzi kvantifikovat, a vyhodnocením (matematická operace).

Komplikujících faktorů při popisu procesu disperze je řada: např. vliv měřítko (scale effect), kdy se jeví, že disperzivita narůstá s rozměrem kontaminačního mraku, tj. disperzivita zdánlivě narůstá tak, jak se látka pohybuje ve směru gradientu, či např. nárůst disperzivity se vzdáleností (Neretnieks, 1990). Jinou komplikací v kvantifikování disperze je tzv. usměrněný transport kontaminantu (chanelling) podél transportních cest o vysoké hydraulické konduktivitě či podél preferenčních cest proudění. Disperze ovlivněná preferenčním prouděním pak nemůže být popsána pomocí Fickova modelu a vyžaduje jiný přístup. Tyto odlišné přístupy však nejsou v literatuře příliš uváděné, většina dostupných prací využívá spíše popis podle Fickových zákonů

Reference:

BEAR J. (1988): Dynamics of fluids in porous media. Dover Publications, New York.

JANKOVSKÝ F., HAVLOVÁ V., ZUNA M., TRPKOŠOVÁ D., MILICKÝ M., POLÁK M., JANKOVEC J., HOKR M., BALVÍN A., RÁLEK P., PARMA P. (2021): Vývoj nástrojů pro studium transportu

kontaminantů v puklinovém prostředí. Závěrečná zpráva projektu TH02030543, ÚJV Řež report Z5539, ÚJV Řež, a. s.

NERETNIEKS, I. (1990): Solute transport in fractured rock – Applications to radionuclide waste repositories. SKB Technical Report TR 90-38, Sweden.

PALÁGYI Š., VODIČKOVÁ H., LANDA J., PALÁGYIOVÁ J., LACIOK A. (2009): Migration and sorption of ^{137}Cs and $^{152,154}\text{Eu}$ in crushed crystalline rocks under dynamic conditions. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 279, 431–441.

PALÁGYI Š., ŠTAMBERG K. (2010a): Modeling of transport of radionuclides in beds of crushed crystalline rocks under equilibrium non-linear sorption isotherm conditions. *Radiochimica Acta*, 98, 359–365.

PALÁGYI Š., ŠTAMBERG K. (2010b): Transport of ^{125}I , $^{137}\text{Cs}^+$ and $^{85}\text{Sr}^{2+}$ in granitoidic rock and soil columns. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 286, 309–316.

PALÁGYI Š., ŠTAMBERG K., VODIČKOVÁ H. (2010c): Transport and sorption of ^{85}Sr and ^{125}I in crushed crystalline rocks under dynamic flow conditions. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 283, 629–636.

SAVAGE, D. ED. (1995): *The Scientific and Regulatory Basis for the Geological Disposal of Radioactive Waste*. J. Wiley & Sons, Chichester, UK

7.5.1.5 Transport koloidů

Popis:

Koloidy jsou definovány jako částice suspendované ve vodě s průměrem menším než $10\ \mu\text{m}$ ($10^{-6}\ \text{m}$) v průměru (McCarthy a Zachara, 1989). Při této malé velikosti jsou gravitační síly malé ve srovnání s jinými silami, takže částice mohou zůstat v suspenzi po velmi dlouhou dobu. I když jsou koloidy malé, jsou stále mnohem větší než většina molekul, které jsou v řádu 10^{-10} až $10^{-8}\ \text{m}$.

Koloidy jsou často mobilní, unášené podzemní vodou. Toto je další potenciální mechanismus migrace kontaminantů. Koloidy mají velký poměr plochy povrchu k hmotnosti, takže mají potenciál poskytovat značné množství sorpce.

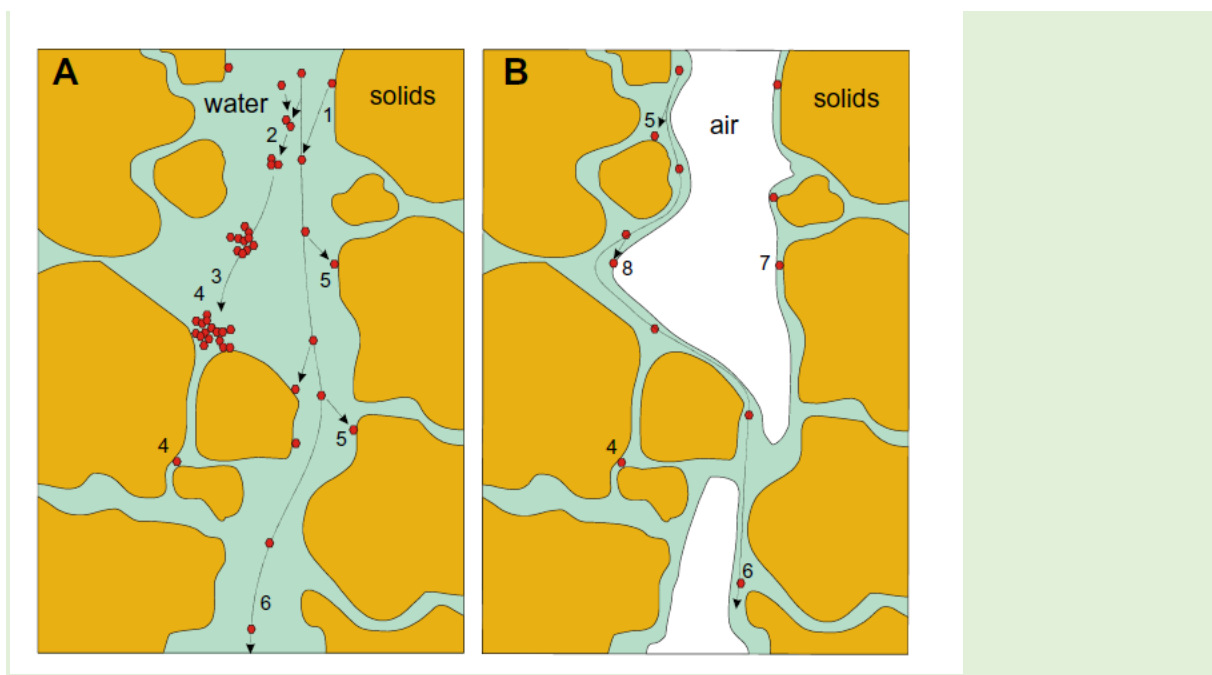
Koloidy se mohou skládat z malých minerálních fragmentů, bakterií, virů, kapiček organických látek a větších organických molekul. Některé koloidy vznikají chemickými reakcemi, které srážejí minerály; jiné jsou generovány povrchovými reakcemi, které disagregují a uvolňují malé částice z povrchů.

Koloidy vznikají několika mechanismy: Primární tvorba anorganických koloidů je řízena především fyzikální fragmentací složek hostitelské horniny v kontaktu s podzemní vodou (Degueldre et al., 1996/I). První vytvořené koloidy mohou být dále erodovány na menší částice (Lerman 1976).

Pokud podzemní voda a hostitelská hornina nejsou v chemické rovnováze, dojde ke změnám v chemickém složení podzemní vody a minerálních fázích, dokud nebude rovnováha ustavena (Stumm a Morgan 1981). To může vést k vysrážení krystalických nebo slabě krystalických fází, jako je gibbsit, kaolinit, illit, muskovit, oxidyhydroxidy Fe a Mn, uhličitany Ca a sulfidy Fe a amorfní fáze, jako je allofan a halloysit (Degueldre et al, 1996). V mělkých systémech jsou

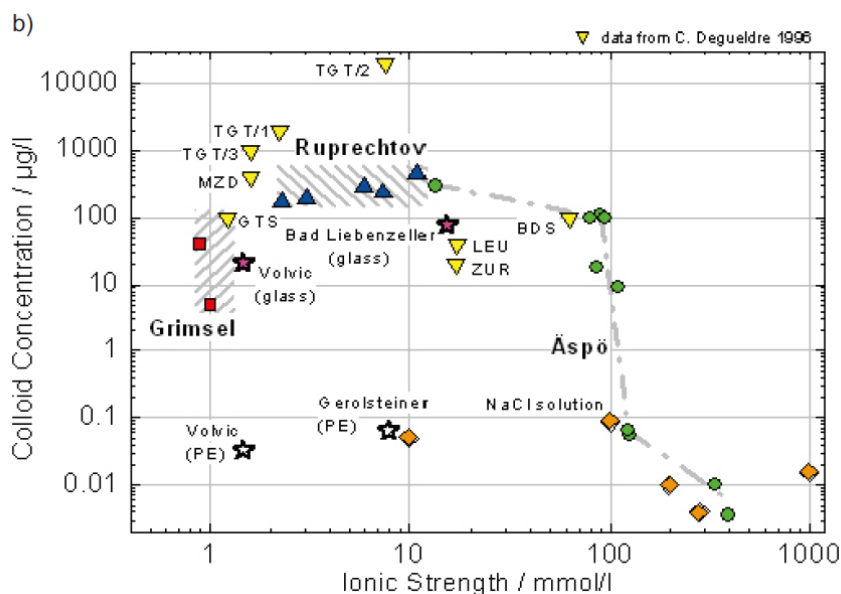
přítomny i organické látky v koloidní fázi. Bakterie koloidní velikosti byly pozorovány i v hlubokých systémech podzemních vod (Pedersen, 1996).

V systémech granitických podzemních vod se koloidy skládají hlavně z částic pocházejících z okolních hornin, např. SiO_2 , oxid Fe, CaCO_3 , oxid Mn (Degueudre a kol. 1996/I, Laaksoharju a kol. 1993).



Obr. 14 Procesy řídící mobilitu koloidů ve vodou nasycených porézních médiích: (1) uvolňování koloidů, (2) agregace koloidů, (3) imobilizace gravitačním usazováním agregátů, (4) imobilizace vlivem filtrace, (5) imobilizace depozicí nanočástic na rozhraní pevná fáze-voda, (6) transport rozptýlených nanočástic na velké vzdálenosti proudící vodou. (B) V nenasycených porézních médiích mohou nastat další mechanismy retardace nanočástic: (7) imobilizace vlivem povrchového napětí a (8) imobilizace depozicí na rozhraní vzduch-voda (obrázek převzatý z Kretzschmar a Schäfer (2005).

Chemické složení vody (viz kap. 6.7.4) významně řídí stabilitu koloidů – viz Obr. 15, včetně lokality z ČR a 2 podzemních laboratoří v granitických podmínkách (Wold 2010). Množství koloidních částic v roztoku má tendenci klesat se zvyšující se iontovou silou roztoku. Zvýšení pH a organického materiálu mají tendenci zvyšovat stabilitu koloidů. Pohyblivost koloidů v porézním prostředí je řízena především pohybem podzemní vody, sedimentací, difúzí a zachycením.



Obr. 15 Korelace mezi koncentrací koloidů a iontovou silou podzemní vody. Ruprechtov – prostředí jíly v nadloží granitických hornin; Grimsel (CH), Aspö (SE) – podzemní výzkumné laboratoře v krystalických horninách (Wold 2010)

Koloidní transport radionuklidů a dalších kontaminantů, které jsou uvolněny z úložiště (pokud je možný jejich transport přes inženýrské bariery), může probíhat jinou rychlostí než transport těchto kontaminantů v roztoku. Koloidní transport může také ovlivňovat transportní dráhy sledovaných radionuklidů. Koloidy mohou být filtrovány médii s nízkou permeabilitou, jako jsou např. jíly. Kromě toho se koloidy mohou sorbovat na pevné povrchy, a tak imobilizovat nebo zpomalovat radionuklidy nebo jiné kontaminanty, které jsou v koloidní formě nebo jsou na koloidy navázány. Pokud se změní chemické podmínky v podzemní vodě, koloidy mohou vypadnout z roztoku a sedimentovat, čímž se sníží pohyblivost radionuklidů nebo jiných kontaminantů.

Transport koloidů může také ovlivnit rozptyl radionuklidů a dalších kontaminantů v tekoucích podzemních vodách. Disperzivita koloidů závisí nejen na velikosti pórů a jejich tvaru, ale také na velikosti a náboji koloidů. Disperze radionuklidů a jiných kontaminantů, které jsou transportovány v koloidní formě nebo vázány na koloidy, bude tedy částečně záviset na velikosti a distribuci velikosti koloidů

Vliv na bezpečnost:

Míra vlivu koloidů a jejich transportů na dlouhodobou bezpečnost není stále přesně dořešena a je diskutována napříč odbornou komunitou.

Vliv na transport radionuklidů v prostředí HÚ má smysl zahrnout jen v případě splnění těchto podmínek (Červinka et al. 2015b):

- koloidy musí být v podzemní vodě přítomné,
- koloidy musí být v podzemní vodě stabilní,
- radionuklidy se musí na bentonitové koloidy vázat,
- čas pro disociaci radionuklidu z koloidu musí být významný vzhledem k času zdržení podzemní vody v prostředí HÚ.

Dostupná data:

Tvorbě a migraci koloidů se významně věnují např. studie Takala a Manninen (2006); Wold (2010); Laaksoharju (1993), a to včetně granitických lokalit Aspo a Grimsel. V rámci Českého masivu byly přírodní koloidy studovány na lokalitě Ruprechtov (Hauser et al. 2002; Wold 2010).

Sorpce radionuklidů na bentonitové koloidy a jejich transportu se věnoval ve svých pracích Červinka et al (2014, 2015a,b). V rámci českého zapojení do projektu EU BELBAR byl sledován transport koloidních částic (přečištěná jílová frakce Bentonitu B75 z roku 2010), radionuklidů ($^{137}\text{Cs}^+$, $^{85}\text{Sr}^{2+}$) a radiokoloidů v kolonovém uspořádání na drceném horninovém materiálu z Melechovského masivu (hloubka 97,5-98,7 m, Česká republika). V přítomnosti bentonitových koloidů byl transport radionuklidů rychlejší, koloidy v systému plnily roli nosiče radionuklidů (Červinka et al. 2015b)

Nejistoty:

Přítomnost koloidů v podzemních vodách českého masivu byla hodnocena pouze v limitovaném množství studií (např. Hauser et al. 2002; Wold 2010). Informace z hloubek, relevantních HÚ jsou omezené pouze na např. složení vod na PVP Bukov (např. Bukovská et al. 2017). Přidává se významná nejistota analytická s problematickým stanovením koloidů pomocí konvenčních metod.

Míra vlivu koloidů a jejich transportu na dlouhodobou bezpečnost je nejasná.

Reference:

- BUKOVSKÁ, Z., VERNER, K., BRÁZDA L., BURIÁNEK D., DOBEŠ P., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ B., ERBAN V., FRANĚK J., HALODOVÁ P., HANÁK J., HAVLOVÁ V., HOLEČEK J., JAČKOVÁ I., JELÉNEK J., KAŠPAR V., KOLOMÁ K., KOPAČKOVÁ V., KOUČKA L., KUČETA 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. – MS SÚRAO, ZZ 191/2017, Praha.
- ČERVINKA R., GONDOLLI J., VIDENSKÁ K. (2014): Shrnutí dosažených výsledků v roce 2014. Zpráva projektu: Eroze bentonitu a její dopad na dlouhodobé chování inženýrských bariér hlubinného úložiště a transport radionuklidů. ÚJV Řež, a. s. ÚJV-14398.
- ČERVINKA R., GONDOLLI J., VIDENSKÁ K. (2015A): Shrnutí dosažených výsledků v roce 2015. Zpráva projektu: Eroze bentonitu a její dopad na dlouhodobé chování inženýrských bariér hlubinného úložiště a transport radionuklidů. ÚJV Řež, a. s. ÚJV-14535.
- ČERVINKA R., GONDOLLI J., VIDENSKÁ K. (2015B): Eroze bentonitu a její dopad na dlouhodobé chování inženýrských bariér hlubinného úložiště a transport radionuklidů. Závěrečná zpráva projektu. ÚJV Řež, a. s. ÚJV-Z44495.
- DEGUELDRE C., GRAUER R. AND LAUBE A. (1996/II) Colloid properties in granitic groundwater systems. II: Stability and transport study. Applied Geochemistry. Vol 11. pp. 697-710. Elsevier Science Ltd.
- DEGUELDRE C., PFEIFFER H.-R., ALEXANDER W. WERNLI B. AND BREUTSCH R. (1996/I) Colloid properties in granitic groundwater systems. I: Sampling and characterisation. Applied Geochemistry, Vol 11. pp. 677-695. Elsevier Science Ltd.

- FITTS CH. (2013): 11 - Groundwater Contamination, Chapter in Editor(s): Charles R. Fitts, Groundwater Science (Second Edition), Academic Press, 2013, Pages 499-585,
- HAUSER, W., GECKEIS, H., KIM, J.I., FIERZ, T. (2002): A mobile laser-induced breakdown detection system and its application for the in situ-monitoring of Colloid migration. Colloids Surf. A 203, 37–45.
- KRETZSCHMAR, R., SCHÄFER, T. (2005) Metal retention and transport on colloidal particles in the environment. Elements 1, 205–210.
- LAAKSOHARJU M., VUORINEN U., SNELLMAN M., ALLARD B., PETTERSSON C., HELENIUS J. AND HINKKANEN H. (1993); Colloids or artefacts? A TVO/SKB co-operation project in Olkiluoto, Finland. Stockholm Sweden: Swedish Nuclear Fuel Waste Management Co. SKB TR 93-32
- LERMAN A. (1979) Geochemical Process, Water and sediment environments. WileyInterscience Publication
- MCCARTHY, J.F. AND ZACHARA, J.M. (1989) Subsurface Transport of Contaminants. Environmental Science & Technology, 23, 496-502.
- PEDERSEN K. (1999) Evidence for a Hydrogen-driven, intra-terrestrial Biosphere in Deep Granitic Rock Aquifers. In Bell C.R., Brylinsky M., Johnson-Green P (ed). Proceedings of the 8th International Symposium on Microbial Ecology. Atlantic Canada Society for Microbial Ecology, Halifax, Canada.
- PEDERSEN K. (2002); Total number of microorganisms in groundwater sampled during background colloid measurements along the Äspö HRL-tunnel. Contributions for the Äspö Colloid Workshop, SKB. Stockholm, Sweden. Swedish Nuclear Fuel Waste Management Co
- PEDERSEN K. (ed.), Arlinger J., Bruetsch R., Degueldre C., Hallbeck L., Laaksoharju M., Théophile L., and Petterson C. (1996); Bacteria, colloids and organic carbon in groundwater at the Bangombé site in the Oklo area. Stockholm, Sweden: Swedish Nuclear Fuel Waste Management Co. SKB TR 96-01.
- STUMM W. & MORGAN J. (1981) Aquatic Chemistry. John Wiley and Sons, New York
- TAKALA P., MANNINEN (2006): Sampling and analyses of groundwater colloids. POSIVA Working Report 2006-15. Oikiluoto, Finland
- WOLD S. (2010): Sorption of prioritized elements on montmorillonite colloids and their potential to transport radionuclides. SKB report TR 10-20, Stockholm, Sweden.

7.5.2 Transport v pevné fázi

Popis:

Různé pevné látky mohou tvořit částice různých tvarů a velikostí a současně potenciálně transportovat různé kontaminanty. Například některé radionuklidy mohou mít relativně velkou tendenci zabudovávat se do struktur pevných uhlíčanových fází, zatímco jiné radionuklidy mohou mít relativně velkou tendenci sorbovat na jílové minerály. Pevné částice uhlíčanu a jílové částice mohou vykazovat odlišné transportní chování než daný radionuklid v roztoku. Tento jev souvisí se spolusrážením (viz kap. 7.4.3.2).

Radionuklidy mohou být navázány na částice bentonitu, které jsou uvolňovány, např. mechanickou erozi bentonitu vlivem kombinace jeho vlastností (zejména bobtnání a tvorba

gelových fází na rozhraní bentonit/voda) a pohybu podzemní vody na rozhraní bentonit/voda. Tento typ také bývá často kombinován s chemickými vlivy (Vokál et al. 2010).

K tomu, aby mohla úspěšně probíhat mechanická eroze bentonitu, musí být unášecí síla vyvolaná pohybem vody větší suma tření a přitažlivých sil mezi částicemi bentonitu a strukturou bentonitu (Vokál et al. 2010). Je také nutno předpokládat, že transportní cesty jsou pro částice prostupné.

Viz také transport koloidů (viz kap. 7.5.1.5).

Vliv na bezpečnost:

Spolusrázení radionuklidů se uvažuje v rámci inženýrských bariér, například o společném vysrážení ^{226}Ra s BaSO_4 (Bosbach et al. 2010), ale existují omezené informace o potenciálu společného vysrážení radionuklidů v geosféře a transportu těchto částic v geosféře. Transport takových částic bude tedy spíše omezený.

Míra vlivu koloidů a jejich transportů na dlouhodobou bezpečnost není stále přesně dořešena a je diskutována napříč odbornou komunitou.

Dostupná data:

V rámci českého zapojení do projektu EU BELBAR byl sledován transport koloidních částic (přečištěná jílová frakce Bentonitu B75 z roku 2010), radionuklidů ($^{137}\text{Cs}^+$, $^{85}\text{Sr}^{2+}$) a radiokoloidů v kolonovém uspořádání na drceném horninovém materiálu z Melechovského masivu (hloubka 97,5-98,7 m, Česká republika; Červinka et al 2014, 2015a,b). V přítomnosti bentonitových koloidů byl transport radionuklidů rychlejší, koloidy v systému plnily roli nosiče radionuklidů (Červinka et al. 2015b).

Nejistoty:

Nedostatek dat. Málo popsaná oblast.

Reference:

BOSBACH, D., BÖTTLE, M. & METZ, V. (2010): Experimental study on Ra^{2+} uptake by barite (BaSO_4). Stockholm, Sweden: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (SKB). Technical Report TR-10-43. 106 p. ISSN 1404-0344.

ČERVINKA R., GONDOLLI J., VIDENSKÁ K. (2014): Shrnutí dosažených výsledků v roce 2014. Zpráva projektu: Eroze bentonitu a její dopad na dlouhodobé chování inženýrských bariér hlubinného úložiště a transport radionuklidů. ÚJV Řež, a. s. ÚJV-14398.

ČERVINKA R., GONDOLLI J., VIDENSKÁ K. (2015A): Shrnutí dosažených výsledků v roce 2015. Zpráva projektu: Eroze bentonitu a její dopad na dlouhodobé chování inženýrských bariér hlubinného úložiště a transport radionuklidů. ÚJV Řež, a. s. ÚJV-14535.

ČERVINKA R., GONDOLLI J., VIDENSKÁ K. (2015B): Eroze bentonitu a její dopad na dlouhodobé chování inženýrských bariér hlubinného úložiště a transport radionuklidů. Závěrečná zpráva projektu. ÚJV Řež, a. s. ÚJV-Z44495.

VOKÁL ET AL. (2010A): Aktualizace referenčního projektu hlubinného úložiště radioaktivních odpadů v hypotetické lokalitě, III. etapa – Studie Zadávací bezpečnostní zprávy, ÚJV Řež a.s. – divize Energoprojekt Praha, 2010

7.5.3 Transport v plynné fázi

Popis:

Rozpuštěné plyny se vyskytují ve většině systémů podzemních vod a jsou běžně odvozovány od (POSIVA 2012; viz kap. 6.7.5):

- vzduchu rozpuštěného v podzemní vodě při výměně s atmosférou (převážně N₂, O₂, Ar);
- rozpuštěných plynů, vznikajících v podloží radioaktivním rozpadem (He, Ar, Rn);
- odplynění a difúze plynů z kůry (He, N₂, CH₄, H₂);
- termogenních a mikrobiálních procesů (CH₄ a těžší uhlovodíky, H₂S, CO₂, N₂).

Radionuklidy a další kontaminanty mohou být transportovány přes geosféru v důsledku pohybu plynu. Tento transport může být buď přímý, kdy radionuklidy a další kontaminanty jsou v plynné formě (např. ¹⁴C nebo I) nebo alternativně může pohyb plynu způsobit, že se další fáze nesoucí radionuklidy nebo kontaminující látky pohybují advekcí. Pohybujícím se plynem mohou být také transportovány například aerosoly nebo pevné částice, na které jsou vázány radionuklidy nebo jiné kontaminanty. Pohyb plynu může také vytlačit vodu, ve které jsou transportovány radionuklidy nebo jiné kontaminanty, a to buď v roztoku nebo vázané na / v koloidech.

Efektivní propustnost horniny s ohledem na plyn bude záviset na podílech plynu a jiných tekutin, které spolu koexistují. Interakce mezi plynnou fází a jakýmkoli dalšími přítomnými fázemi mohou ovlivnit rozdělování radionuklidů a jiných kontaminantů mezi plyn a ostatní fáze. Některé plyny jsou například rozpustnější ve vodě než jiné; za příslušných podmínek je CO₂ rozpustnější ve vodě než CH₄, takže ¹⁴C ve formě CO₂ bude mít tendenci se více rozdělovat do koexistující vodné fáze než ¹⁴C ve formě CH₄ (POSIVA 2012). Tyto interakce mezi plyny a jinými fázemi (včetně vývoje plynu z jiných tekutin nebo rozpouštění plynu v těchto tekutinách) budou záviset na změnách tlaku a/nebo teploty a/nebo chemického prostředí (např. pH, salinita) podél transportní dráhy.

Plyny se mohou sorbovat na povrchu pevných fází, čímž dojde k zachycení nebo zpomalení migrace radionuklidů nebo jiných kontaminantů, které jsou transportovány v plynné formě.

Vliv na bezpečnost:

Vstup radionuklidu do plynné fáze ovlivní možnost odlišného transportního chování v porovnání s kapalnou fází. Tlak plynu může rovněž uvést do pohybu roztoky a změnit jejich transportní rychlost či směr toku.

Dostupná data:

Transport ¹⁴C v částečně saturovaném prostředí byl řešen ve Vetešník et al. (2017) v úloze, která se zabývala transportem CH₄. Výsledky ukázaly, že difúzní tok CH₄ v plynné formě je významný i pro relativně saturované prostředí.

Migrace plynu materiály inženýrských bariér byla sledována v projektu Výzkumná podpora bezpečnosti (Svoboda et al. 2019). Plynopropustnost granitových hornin byla studována např. v projektu Technologie a metodika stanovení plynopropustnosti horninových struktur (2009–2013).

Nejistoty:

Při posouzení transportu radionuklidů v plynné fázi existuje řada nejistot, které jsou spojeny jednak s mírou rozdělování daného radionuklidu mezi kapalnou a plynnou fázi, jednak s migrací plynu v horninovém prostředí jako takovým, která je závislá na tlakových poměrech a propustnosti horninového masivu pro plyn. Možnost vlivu tlaku plynu na roztoky a jejich transport je rovněž nejasná, spíše by se jevila významnou pro inženýrské bariery.

Není však jisté, zda rychlost tvorby plynu bude dostatečná, aby umožnila dvoufázové proudění v geosféře, a pokud ano, pak jak bude ovlivňovat transport radionuklidů.

Reference:

SVOBODA, J., VAŠÍČEK, R., ŠŤÁSTKA, J., NÁDHERNÁ, D., PACOVSKÁ, D., PACOVSKÝ, J. (2019): Experimentální hodnocení plynopropustnosti inženýrských bariér hlubinného úložiště – Závěrečná zpráva, – MS SÚRAO, ZZ 384/2019, Praha.

TECHNOLOGIE A METODIKA STANOVENÍ PLYNOPROPUSTNOSTI HORNINOVÝCH STRUKTUR PRO ÚČELY SKLADOVÁNÍ PLYNU A UKLÁDÁNÍ RAO (2009–2013) MPO TIP FR-TI1/023; Centrum experimentální geotechniky ČVUT; <https://starfos.tacr.cz/cs/project/FR-TI1%2F023>

POSIVA (2012) Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto, Features, Events, and Processes. Posiva Report 2012-07.

VETEŠNÍK A., REIMITZ D., BABOROVÁ L., VOPÁLKA D. (2017): Vývoj modelu transportu C-14 z hlubinného úložiště a jeho neurčitostní a citlivostní analýza. – MS SÚRAO, TZ 171/2017, SÚRAO.

7.6 Procesy způsobené výstavbou a provozem úložiště

7.6.1 Tepelné ovlivnění prostředí provozem úložiště

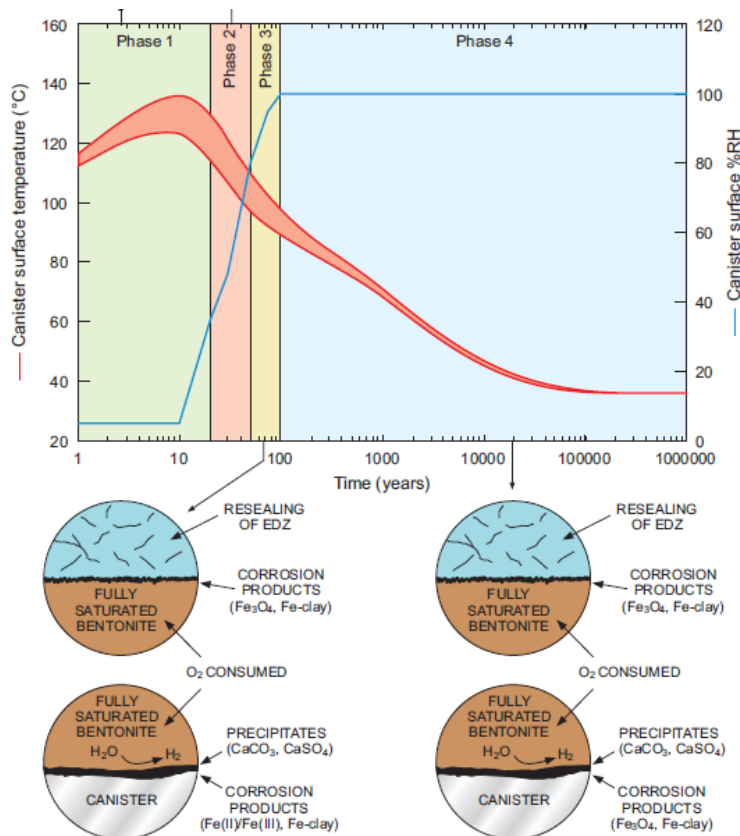
Popis:

Zdrojem tepla je zbytkový tepelný výkon, generovaný v důsledku rozpadu radioaktivních rozpadů nestabilních izotopů obsažených v různých částech VJP (ve vlastním palivu, pokrytí i v konstrukčních materiálech). Zbytkový tepelný výkon je úměrný především vyhoření paliva a hmotnosti paliva v palivovém souboru. Hmotnost paliva v palivovém souboru se liší jednak podle typu paliva pro různé reaktory (VVER-440 x VVER-1000, regulační soubor pro VVER-440, apod.), ale rovněž dochází k jeho změnám v rámci různých dodavatelů paliva (např. Westinghouse x TVEL) i u různých postupných vývojových variant souborů, se kterými provozovatelé elektráren v průběhu jejich životnosti pracují. Úměrně nárůstu hmotnosti paliva v palivovém souboru roste rovněž jeho tepelný výkon. Tepelný výkon v čase postupně klesá, zjednodušeně lze pokles popsat exponenciálním charakterem.

Tepelný výkon je z palivových proutků odváděn přes palivový soubor do koše UOS, do stěny UOS, přes buffer (bentonit) do okolního horninového prostředí.

Limitní teplotou je teplota bentonitu, která je stanovena na 95 °C. Pro český program byla zatím provedena pouze zjednodušená statická tepelná analýza. Nezohledňuje prostorové a časové změny součinitele tepelné vodivosti. Teplotní vývoj HÚ vychází z předpokladu, že bentonit bude nejprve vysušený a později saturovaný vodou (Kobylka 2019).

Koncepční model tepelného vývoje na rozhraní kontejner a bentonit je uveden na Obr. 16. Popis vedení tepla v horninovém masivu je podrobněji popsán v kap. 7.1.1.



Obr. 16 Koncepční příklad vývoj teploty a relativní vlhkosti (RH) s časem (Landolt et al. 2009).

Důsledkem generování tepla z UOS bude docházet k zahřívání bentonitové inženýrské bariéry i okolního horninového prostředí. Rovněž bude docházet k zahřívání podzemní vody, čímž vznikne podstatný teplotní gradient mezi ohřátou vodou v blízkosti HÚ a vodou v okolí. Je možné, že tento teplotní gradient bude generovat proudění ve směru od HÚ do jeho okolí, tedy ve směru poklesu teploty. Plně saturovaná bentonitová IB se dá očekávat ve stovkách až v prvních tisících letech. Návrat teploty k původnímu stavu (tj. teplotě okolí) se odhaduje na první desítky tisíc let. V plně saturovaném prostředí s teplotním gradientem se dá očekávat významný podíl termálně indukovaného transportu a změny v původním ustáleném proudění (Červinka et al. 2017).

Teplota má značný vliv i na rozpouštění a srážení minerálů a ovlivňuje tedy i interakci mezi horninou a podzemní vodou (viz kap. 7.4.3.1) a případně i složek v roztoku, včetně radionuklidů (složení podzemní vody – viz kap. 6.7.4; speciaci radionuklidů – viz kap. 7.4.4.1). Rozpustnost obecně vzrůstá s teplotou, což ale například neplatí pro karbonát, kde se vzrůstající teplotou naopak dochází ke snižování rozpustnosti (Červinka et al. 2017).

Vliv na bezpečnost:

Maximální teploty je dosaženo v období přibližně 10 let od uzavření HÚ. Zvyšování teploty bude mít vliv mechanické vlastnosti hornin, zejména jejich roztažnost, bude ovlivňovat též migraci fluid v puklinovém prostředí, a může mít vliv na urychlení chemických reakcí. Změny

teploty budou mít vliv i na skladbu mikrobiálního osídlení a tím i vliv na následnou degradaci inženýrských bariér.

Přímý vliv bude relativně malý, komplikace se mohou vyskytovat zejména při zjištění významné variability vlastností hornin, které mají vliv na procesy přenosu tepla.

Dostupná data:

Modelování šíření tepla bylo provedeno zjednodušenou metodou (Kobylka 2019), jejíž úkolem bylo stanovit optimální vzdálenosti pro vertikální a horizontální způsob ukládání UOS s VJP.

Termofyzikální vlastnosti kandidátních lokalit, použité pro výpočet jsou uvedeny v následující tabulce. Data byla stanovena z odebraných povrchových vzorků na lokalitách (Hanák et al. 2017 a Kašpar et al. 2017). U lokality Janoch (polygon ETE – Jih) nebyly z testovaných vzorků stanoveny všechny potřebné hodnoty, byly proto dopočítány, aby je bylo možné použít ve výpočetním modelu.

Výpočty byly provedeny pro nekonečnou lokalitu se stejnými vlastnostmi horninového masivu a nezohledňovaly variabilitu hornin v dané lokalitě.

Tab. 3 Termofyzikální vlastnosti kandidátních lokalit (Zdroj: Kobylka 2019)

| | Součinitel tepelné vodivosti [W/mK] | Součinitel teplotní vodivosti $\times 10^2$ [m ² /s] | Objemová tepelná kapacita [J/m ³ K] | Měrná tepelná kapacita [J/kgK] | Hustota [kg/m ³] |
|---------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| Březový potok | 2,7 | 1,3 | 2088461 | 780 | 2677,514 |
| Horka | 2,1 | 1 | 2089861 | 750 | 2786,481 |
| Kraví hora | 2,7 | 1,3 | 2120192 | 793 | 2673,634 |
| Čihadlo | 2,8 | 1,5 | 1829167 | 714 | 2561,859 |
| Čertovka | 3,2 | 1,5 | 2111111 | 800 | 2638,889 |
| Hrádek | 2,8 | 1,5 | 1915251 | 724 | 2645,374 |
| Magdaléna | 1,8 | 0,9 | 2120060 | 766 | 2767,702 |
| Referenční lokalita | 2,586 | 1,286 | 2039158 | 761 | 2678,779 |
| Na Skalním (EDU)* | 2,04 / 2,053 | 0,97 / 0,988 | 2 116 790 / 2 064 560 | 788 | 2620 |
| Janoch (ETE)* | 2,667 / 2,65 | 1,299 / 1,3074 | 2 040 000 | - | - |

* uvedeny dvě hodnoty (viz text) ve smyslu: dodaná data / dopočítaná data, tučně jsou zvýrazněny při výpočtu použité hodnoty

Nejistoty:

Jako hlavní nejistoty lze identifikovat absenci numerického modelování a nerespektování nerovnoměrností v prostorovém vedení tepla v úložišti. Dále schází realistický model rozhraní bentonitu s horninovým blokem, kde je předpokládána vzduchová mezera o tloušťce 2 mm. Je to konzervativní předpoklad a klade vedení tepla značný odpor a výpočtově nahrazuje v praxi reálnější, avšak v současné době neznámé, vrstvy (např. neúplné zaplnění mezery bentonitem apod.). Pro modelování vedení tepla bylo použito statického modelování bez respektování prostorových a časových změn součinitele tepelné vodivosti. (Kobylka 2019).

Za současného stavu poznání horninového prostředí zájmových lokalit nelze kvantifikovat nejistotu ve vztahu k jednotlivým parametrům ovlivňující procesy šíření tepla v místě HÚ a jeho okolí. Tato míra nejistoty bude snížena s postupujícím průzkumem a s rostoucí úrovní znalostí horninového prostředí a jeho parametrů, které mají vliv na přenos tepla v prostředí. Míra nejistoty bude klesat s rostoucí homogenitou prostředí, a naopak bude stoupat s rostoucí

mírou nepředvídatelné variability prostředí nebo z neznalosti vlastností v hloubce horninového masivu pod úrovní HÚ.

Reference:

KOBYLKA D. (2019): Optimalizace vzájemné vzdálenosti UOS, Technická zpráva SÚRAO 135/2017.

ČERVINKA R., GONDOLLI J., KLAJMON M., TOMÁŠOVÁ Z., RUKAVIČKOVÁ L., ŘIHOŠEK J., PACHEROVÁ P., ZEMAN J., VENCELIDES Z. (2017): Chování horninového prostředí/Příprava geochemického modelu úložiště – Definice vstupních dat a příprava modelů. – MS SÚRAO, TZ 125/2017, Praha.

HANÁK J., CHLUPÁČOVÁ M., ONDRA P (2017): Stanovení petrofyzikálních charakteristik horninového prostředí pro území potenciálních lokalit HÚ. – MS SÚRAO, TZ 103/2017, Praha.

KAŠPAR R., LANČA D., MIŠUREC J., NAVRÁTILOVÁ V., NEDVĚD J., NOL O., RAJCHL M., SOSNA K., ŠINDELÁŘ M., TLAMSA J, VOJTĚCHOVSKÁ A. (2017): Zpráva o provedení geologicko-výzkumných prací na lokalitě ETE-jih. – MS SÚRAO, TZ 126/2017, Praha.

LANDOLT, D., DAVENPORT, A., PAYER, J., & SHOESMITH, D. (2009). Review of Materials and In, Corrosion Issues Regarding Canisters for Disposal of Spent Fuel and High-level Waste, Opalinus Clay. NAGRA Report NTB--09-02. NAGRA, Wettingen.

7.6.2 Mechanické ovlivnění horninového prostředí výstavbou úložiště (vznik zón EDZ)

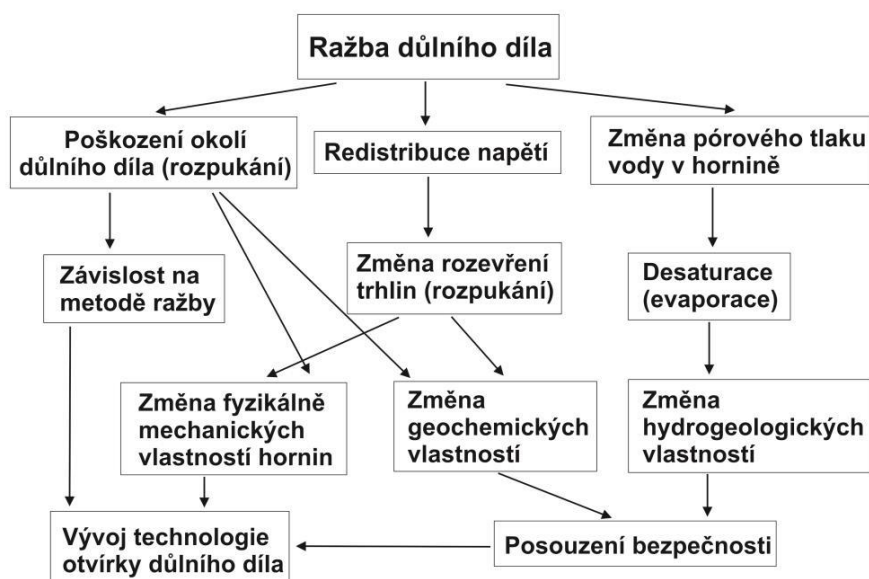
Popis:

V důsledku ražby podzemních děl úložiště dojde k poškození horniny v okolí výrubu. Vznik těchto zón je nevyhnutelný (Hudson et al. 2009), intenzita ovlivnění okolního masivu je ovšem závislá na použité metodě ražby, tj. zda je použita např. trhací práce nebo je výstavba naopak prováděna pomocí technologie TBM (Tunnel Boring Machine). Kromě použité metody výstavby díla je rozsah a tvar zón porušení ovlivněn také tvarem a průřezem podzemních prostor, pevnostními vlastnostmi horninového masivu, napětovými poměry in situ, strukturními fenomény a rovněž, v případě úložišť, i teplotním zatížením od uloženého vyhořelého jaderného paliva (VJP). Bäckblom (2008), v rámci studie zaměřené na krystalinické horniny a prováděné pro SKB, definoval zóny narušení a poškození následujícím způsobem:

- „Zóna narušení“ - disturbed, resp. influence zone (EdZ resp. EIZ) - je zóna, ve které převládají změny stavu (např. napětí, hydraulického tlaku). Změny vlastností horninového masivu jsou však nevýznamné nebo vratné.
- „Zóna poškození“ - damaged zone (EDZ) - je zóna nejbližší podzemnímu dílu, která utrpěla nevratné deformace a ve které dochází buď ke střížnému pohybu na existujících puklinách nebo k jejich propagaci a vzniku nových nespojitostí. Takovéto poškození a narušení je ve větší, či menší míře přítomno vždy při vytváření podzemních prostor.

V rámci EDZ bývá někdy ještě vymezována zóna HDZ – highly damaged zone, která je zpravidla spojována s odlupováním a vylamováním horniny, kdy dochází ke kompletnímu oddělení celých desek nebo bloků od horninového masivu. Zatímco ke vzniku EDZ a EdZ dochází v důsledku ražby vždy, HDZ může vzniknout v případech značně vysokých hodnot napětí v masivu nebo když metoda hloubení nebo ražby vytváří rozpukanou zónu (např. běžné vrtání a trhací práce).

Probíhající procesy změn vlastností hornin s narušením masivu ražbou lze zobrazit následovně:



Obr. 17 Procesy změn vlastností hornin s narušením masivu ražbou (Saiang 2008)

V období, kdy je dílo otevřeno, dochází k zapojení časově závislých jevů a procesů, ovlivňujících okolní horniny. Později, během a po uložení radioaktivních odpadů, budou horniny podléhat vlivu zvyšování teploty v důsledku přenosu tepla od UOS, což bude mít vliv na změny napětí v horninovém masivu a bude rovněž urychlovat chemické reakce (Hudson et al. 2009).

Vliv na bezpečnost:

Z podstaty charakteru fenoménu EDZ – indukované zvýšení porušenosti horninového materiálu v okolí podzemních tunelů a kaveren – vyplývají následující zásadní změny původních vlastností materiálu:

- Degradace pružnostních a pevnostních charakteristik materiálu v zónách EDZ představuje zvýšenou deformabilitu zasažené části masivu, doprovázenou snížením únosnosti materiálu a následně potenciálním snížením úrovně stability díla v bezprostřední blízkosti ukládaných UOS s VJP.
- Vzniklé porušení materiálu a reaktivace přirozených puklinových systémů umožňuje vznik nových komunikačních cest, zvyšuje propustnost této části masivu, degraduje izolační schopnost masivu a tím účinnost kompaktní horniny jako přirozené izolační bariéry proti šíření uniklých radioaktivních izotopů.

Více energeticky razantnější razící metody (např. běžné vrtání a trhací práce) mohou však vytvářet lokální HDZ na obvodu díla, zatímco v porušených horninách preexistující prvky nespojitosti mohou změnit podobu a způsob porušení horniny a mohou být reaktivovány, což má za následek významné změny v propustnosti. Jak uvádí Tsang et al. (2005), EDZ je, alespoň v průběhu určitého časového období, zónou s relativně vysokou permeabilitou, ale to, zda je hydrogeologický režim schopen využít EDZ k transportu rozpuštěných látek do okolního prostředí vyžaduje komplexní zhodnocení celkového proudění a režimu podzemních vod.

Dostupná data:

Současné znalosti ze světa o fenoménu EDZ jsou přehledně zpracovány v rešeršní zprávě

- VAVRO M. A KOL.: Shrnutí zahraničních poznatků o vzniku a vývoji EDZ v krystalinických horninách – rešerše, SÚRAO, Technická zpráva číslo 50/2016.

Další poznatky z výzkumu EDZ jsou převážně z českého prostředí lokality PVP Bukov a Dolu Rožná v následujících zprávách:

- BUKOVSKÁ Z. A KOL.: Získání dat z hlubokých horizontů Dolu Rožná, SÚRAO, Technická zpráva č. 464/2020
- STAŠ L., BLÁHA P. A KOL.: Vznik a monitoring EDZ při výstavbě PVP BUKOV – závěrečná zpráva, SÚRAO, Technická zpráva číslo 351/2019
- STAŠ L. A KOL.: Rozvoj geotechnických a geofyzikálních metod pro získání 2D a 3D obrazu geologické stavby, ETAPA C -Výzkum použití geotechnických metod, etapová zpráva projektu FV20294, ÚGN, 2021
- BLÁHA P. A KOL.: Rozvoj geotechnických a geofyzikálních metod pro získání 2D a 3D obrazu geologické stavby, ETAPA B -Výzkum použití geofyzikálních metod, etapová zpráva projektu FV20294, Geotest a.s., 2021

Nejistoty:

Na kandidátních lokalitách zatím není zatím dostatek relevantních informací pro hodnocení rozsahu budoucích vzniklých EDZ a jejich vlivu na celkový stav bezpečnosti potenciálního HÚ, neboť není na předpokládaném hlubokém horizontu nejsou známy:

- orientace a velikost složek napěťového pole včetně anizotropie (napěťové poměry se mohou významně lišit od předpokladu standardní distribuce geostatického gravitačního napěťového pole),
- konkrétní intervaly hodnot deformačních a pevnostních charakteristik dotčeného horninového masivu včetně případné anizotropie, jak z pohledu okamžitého stavu, tak i z hlediska možného dlouhodobého vývoje iniciovaného změnami okolních podmínek
- lokální hydrogeologická situace,
- plánovaná technologie ražby včetně schématu postupů a geometrie tunelů.

Reference:

BÄCKBOLM, G. (2008): Excavation damage and disturbance in crystalline rock – results from experiments and analyses. Technical Report SKB TR-08-08. Svensk Kärnbränslehantering AB Stockholm, 85 pp.

HUDSON, J. A., BÄCKSTRÖM, A., RUTQVIST, J., JING, L., BACKERS, T., CHIJIMATSU, M., CHRISTIANSSON, R., FENG, X. T., KOBAYASHI, A., KOYAMA, T., LEE, H. S., NERETNIEKS, I., PAN,

P. Z., RINNE, M., SHEN, B. T. (2009): Characterising and modelling the excavation damaged zone in crystalline rock in the context of radioactive waste disposal. *Environmental Geology*, 57(6), 1275-1297.

TSANG, C. F., BERNIER, F., DAVIES, C. (2005): Geohydromechanical processes in the Excavation Damaged Zone in crystalline rock, rock salt, and indurated and plastic clays – in the context of radioactive waste disposal. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 42(1), 109-125.

SAIANG, D. (2008): Behaviour of blast-induced damaged zone around underground excavations in hard rock mass. Ph.D. Thesis, Luleå University of Technology, Luleå, Sweden, 297 pp.

7.6.3 Ovlivnění hydraulických poměrů výstavbou úložiště (proudění v EDZ)

Popis:

V průběhu výstavby úložiště jsou změny v masivu, vedoucí ke vzniku EDZ, důsledkem změny napěťového pole zásahem do masivu a vlivem technologických postupů ražby. Obě příčiny se z hlediska hydrauliky projevují změnou odporových parametrů zóny – zvýšením nasycené hydraulické vodivosti v důsledku zvýšení hustoty, konektivity a propustnosti puklinové sítě.

Odtěžením horniny dochází k porušení rovnovážného stavu a při redistribuci geostatického tlaku dochází k posunům okolní horniny směrem do vytěženého prostoru v důsledku jejího odlehčení. Mění se tak parametry stávající puklinové sítě v masivu. Atmosférický tlak při povrchu vytěženého prostoru vede ke vzniku tlakového gradientu. V období realizace a provozu HÚ nastává proudění podzemní vody směrem do výrubu, přičemž v EDZ mohou nastat podmínky nesaturovaného proudění, jež snižují efektivní hydraulickou vodivost v bezprostředním okolí odvodňovaného díla. Snižování hydraulické vodivosti v dané fázi může být zapříčiněno i biologickou aktivitou vedoucí ke snížení efektivního rozvěvení vzniklých poruch (Hudson & Harrison, *Engineering rock mechanics – an introduction to the*, 1997).

Přímé dopady technologických postupů při ražbě ÚRAO představují další významný zdroj poruch spoluutvářejících hydraulické parametry EDZ. V případě dril-and-blast metody popisují (Tsang, Bernier, & Davies, 2004) zvýšení permeability o 2 až 3 řády ve vzdálenosti až 1,5 m od díla. Oproti tomu při použití razicího stroje TBM zasahuje poškozená zóna s permeabilitou navýšenou v rámci jednoho řádu do vzdálenosti jednotek centimetrů (Davies & Bernier, 2003).

Krátce po uzavření HÚ dojde k opětovnému nárůstu vlhkosti EDZ zóny, což povede k postupnému sycení částečně odvodněného puklinového prostředí a zvyšování nasycené hydraulické vodivosti. Dynamika rozložení a změn vlhkosti v této fázi vývoje je dále ovlivněna teplem produkovaným uloženými soubory. Dalším důsledkem teplotního stresu z radioaktivního rozpadu jsou objemové změny vznikající díky teplotní roztažnosti horniny a výplňových materiálů. To může vést k dodatečnému rozrušení EDZ a zvýšení její funkce preferenční cesty pro proudění (Tsang, Bernier, & Davies, 2004). V případě bentonitového těsnění lze očekávat lokální změnu tlakového pole v EDZ, vedoucí k uzavírání poruch a snižování jejich propustnosti, které povedou k omezení proudění, zejména ve směru paralelním k raženému dílu.

V určitém časovém horizontu po uzavření HÚ nastane plná saturace EDZ a výplňových materiálů a bude postupně docházet ke snižování teplotních gradientů. Proudové pole se postupně ustálí. Dlouhodobé působení (v řádu tisíciletí) hydraulického a teplotního stresu může vést až k degradaci krystalinických hornin (zejména na povrchu poruchových zón) za vzniku jílových materiálů, jež se projeví snížením propustnosti EDZ. V tomto horizontu ale nastane rovněž degradace podpůrného vstrojení HÚ (výztuže, kotvy atd.), která povede ke vzniku nových preferenčních cest a k potenciálně odlišnému charakteru proudění (Tsang, Bernier, & Davies, 2004).

Vliv na bezpečnost:

Vzhledem k tomu, že EDZ představuje prostředí kontaktu HÚ a jeho inženýrských bariér a geologického prostředí, které tvoří přirozenou bariéru HÚ, má charakter EDZ z hlediska proudění podzemní vody vliv na bezpečnost HÚ. Vyšší míra porušení EDZ, a tedy vyšší hydraulická vodivost, zvyšuje riziko hydraulického propojení HÚ s konektivní puklinovou sítí, která umožňuje transport kontaminace v geologické bariéře. Při realizaci HÚ je tedy žádoucí rozsah a intenzitu porušení EDZ minimalizovat.

Dostupná data:

V rámci výzkumu orientovaného na přípravu HÚ probíhá i výzkum EDZ. Charakterizace prostředí EDZ byla realizována v prostředí podzemní laboratoře Bukov (Stoš & Bláha, 2018) nebo v dolu Rožná (Bukovská, a další, 2020). Za využití těchto výzkumů byly popsány charakteristiky EDZ pomocí přímých i nepřímých, laboratorních a in-situ metod. Množství stanovených hydraulických parametrů je ale omezené. V rámci dosavadních hydrogeologických prací, spočívajících hlavně v realizaci hydraulických a transportních modelů potenciálních lokalit HÚ, nebyly vlastnosti EDZ řešeny.

Nejistoty:

Nejistoty procesu proudění a hydraulických parametrů EDZ plynou z faktu, že vlastnosti EDZ jsou charakteristické vždy pro konkrétní lokalitu a technický postup ražby HÚ. Konkrétní data pro popis proudění tak v současnosti nemohou být k dispozici.

Největší úroveň nejistoty spočívá v kvantifikaci dopadů EDZ na procesy, jež nastanou v delším časovém horizontu v průběhu izolační funkce úložiště (Vavro, Vavro, Souček, & Stoš, 2016).

Reference:

- Baechler, S., Lavanchy, J. M., Armand, G., & Cruchaudet, M. (2011). Characterisation of the hydraulic properties within the EDZ: A methodology for consistent interpretation of hydraulic tests. *Physics and Chemistry of the Earth*, 36, 1922-1931.
- Bohn, H. L., McNeal, B. L., & O'Connor, G. A. (2001). *Soil Chemistry*. John Wiley and Sons, Inc.
- Bossart, P., Meierand, P., Trick, T., Mayor, J. C., & Moeri, A. (2002). Geological and hydraulic characterization of the excavation disturbed zone in the Opalinus Clay of the Mont Terri Rock Laboratory. *Engineering Geology*, 66, 16-38.
- Boudreau, B. (1996). The diffusive tortuosity of fine-grained unlithified sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 60(issue 16), 3139-3142. doi:10.1016/0016-7037(96)00158-5

- Bukovská, Z., Švagera, O., Chabr, T., Leichmann, J., Sosna, K., Souček, K., . . . a kol. (2020). Získání dat z hlubokých horizontů dolu Rožná - závěrečná zpráva. SÚRAO-TZ454/2020.
- Damaj, J., Bolland, C., Armand, G., & Verdel, T. (2007). Velocity survey of an excavation damaged zone: influence of excavation and reloading. *Rock Physics and Geomechanics in the Study of Reservoirs and Repositories*, 284, 41-54.
- Davies, C., & Bernier, F. (2003). *Impact of the excavation disturbed or damaged zone (EDZ) on the performance of radioactive waste geological repositories*. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities.
- Eberhardt, E. (1998). Brittle Rock Fracture and Progressive Damage in Uniaxial Compression. *PhD. Thesis*, 334.
- Ericsson, L. O., Thorn, J., Christiansson, R., Hansson, K., Butron, C., Sigurdsson, O., & Kinnbom, P. (2015). *demonstration project on controlling and verifying the excavation-damaged zone. Experience from the Äspö Hard Rock Laboratory*. Technical Report SKB R-14-30, Stockholm.
- Frieg, B., Blaser, P. C., Adams, J., Albert, W., Dollinger, H., Kuhlmann, U., & Lanyon G., W. (1998). *Grimsel Test Site. Excavation Disturbed Zone Experiment*. Technical Report 98-01.
- Grathwohl, P. (1998). *Diffusion in natural porous media : contaminant transport, sorption/desorption and dissolution kinetics, by Peter Grathwohl* (1. vyd.). London: Kluwer Academic Publishers.
- Grey, M. (1993). *International Stripa Project 1980–1992. Overview Volume III*. Stockholm: Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hudson, J. A., & Harrison, J. P. (1997). *Engineering rock mechanics – an introduction to the Elsevier*.
- Hudson, J. A., Backstrom, A., Rutquist, J., Jing, L., & Backers, T. (2009). Characterising and modelling the excavation damaged zone in crystalline rock in the context of radioactive waste disposal. *Environmental Geology*, 57, 1275-1297.
- Johnsson, M., Backstrom, A., Feng, Q., Berglund, J., Johansson, M., & Olsson, M. (2009). *Äspö Hard Rock Laboratory. Studies of factors that affect and controls the Excavation Damaged / Disturbed Zone*. SKB Report R-09-17, Stockholm.
- Lanyon, G. W. (2011). *Excavation Damaged Zones Assessment*. Fracture Systems Ltd.
- Lenormand, R., Touboul, E., & Zarcone, C. (1988). Numerical models and experiments on immiscible displacements in porous media. *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 189, 165-187. doi:10.1017/S0022112088000953
- Levasseuer, S., Collin, F., Daniels, K., Dymitrowska, M., Harrington, J., Jacobs, E., . . . Wendling, J. (2021). Initial State-of-the-Art on Gas Transport in Clayey Materials: Deliverable D6.1 of the HORIZON 2020 project EURAD, Workpackage Gas. EC Grant agreement no: 847593.
- Olsson, M., Markstrom, I., Pettersson, A., & Strang, M. (2009). *Examination of the Excavation Damaged Zone in the TASS tunnel*. SKB R-09-39.

- Posiva. (2003). *ONKALO underground characterization and research programme*. Helsinki: Posiva Oy,.
- Read, R. S. (2004). 20 years of excavation response studies at AECL's Underground Research Laboratory. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41, 1251-1275.
- Sposito, G. (1989). *The Chemistry of Soils*. New York: Oxford University Press.
- Staš, L., & Bláha, P. (2018). Vznik a monitoring EDZ při výstavbě PVP Bukov - závěrečná zpráva. SURAO - TZ351/2019.
- Thompson, P., Martino, J. B., & Spinney, M. H. (1993). Detailed measurements of deformation in the excavation disturbed zone. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1511-1514.
- Tsang, C., Bernier, F., & Davies, C. (2004). Geohydromechanical processes in the Excavation Damaged Zone in crystalline rock, rock salt, and indurated and plastic clays - In the context of radioactive waste disposal. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 42, 109-125.
- Vavro, M., Vavro, L., Souček, K., & Staš, L. (2016). *Shrnutí zahraničních poznatků o vzniku a vývoji EDZ v krystalinických horninách - rešerše*. Ostrava: Ústav geoniky AV ČR, v. v. i.

7.6.4 Ovlivnění chemických poměrů výstavbou, provozem a uzavřením HÚ

Popis:

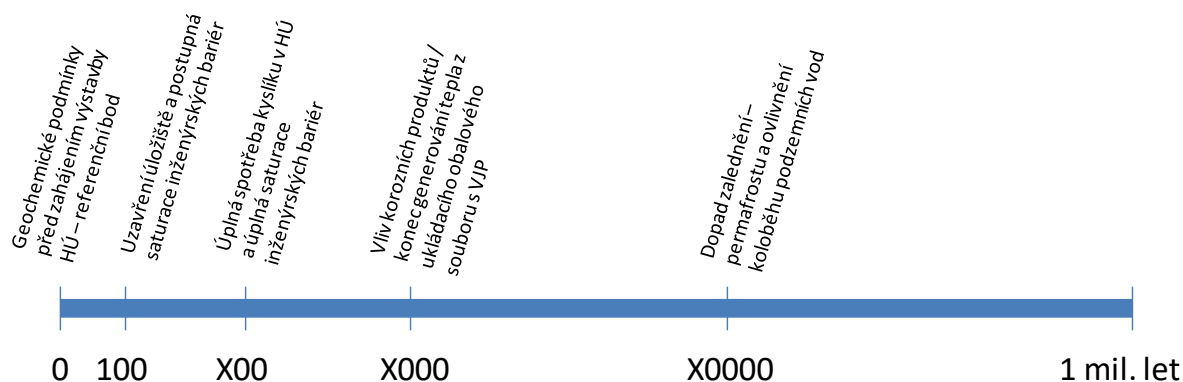
Vývoj chemismu prostředí HÚ v období po jeho uzavření bude záviset zejména na dvou hlavních faktorech – komponentách inženýrských bariér (materiál(y) UOS, materiál(y) těsnění a výplně podzemních prostor a materiál(y) speciálních konstrukcí (např. betonové směsi zátek) a složení podzemní vody pronikající do HÚ (viz kap. 6.7.4). Důležitým faktorem ovlivňujícím chemismus prostředí je čas a kinetika reakcí mezi jednotlivými interagujícími prvky a kvantitativní zastoupení jednotlivých reagujících složek. V čase po uzavření HÚ je důležitá termální fáze vývoje úložiště a rychlost saturace bentonitové bariéry v této fázi.

V okamžiku zahájení budování HÚ a dále i v průběhu jeho provozu (cca 100 let) dojde k ovlivnění chemismu blízkého okolí HÚ, a to zejména složení podzemních vod. Vhodným analogem ke geochemickým modelům v českých podmínkách mohou být data ze zatopování starých důlních děl. Např. data z dlouhodobého monitoringu ložiska Olší-Drahonín, že při otvírce důlního díla dochází ke snížení hladiny podzemní vody a obnažení hornin, na které působí oxidační prostředí. Dochází k oxidačnímu rozpouštění rudních i horninotvorných minerálů a po přesycení roztoků pórových vod k jejich následnému srážení v podobě sekundárních minerálů (zejména hydro-oxidů železa, manganu), které na svůj povrch sorbují další těžké kovy (Červinka et al. 2017). Podobně bylo kvalifikováno antropogenní ovlivnění podzemních vod na lokalitě Rožná (Bukovská et al. 2017).

Po uzavření ložiska dochází ke zpětnému redukčnímu rozpouštění sekundárních minerálů a ke skokovému zvýšení koncentrace prvků (Fe, Mn, U apod.). Ty se následně v redukčním

prostředí opět postupně sráží a jejich koncentrace v podzemní vodě pomalu klesá. Obnovení anoxického až redukčního prostředí probíhá postupně, je poměrně rychlé a dojde k němu v průběhu několika desítek let. Návrat k původním hydrochemickým podmínkám je delší a bude trvat vyšší desítky a první stovky let (Červinka et al 2017).

Po uzavření HÚ se předpokládá celkem rychlá spotřeba zachyceného kyslíku v tlumících a výplňových materiálech, a to zejména díky mikrobiální činnosti (viz kap. 7.4.5), interakci kyslíku s minerály tlumící bariéry a hostitelské horniny, případně korozními procesy UOS (X00 let). Dalším důležitým bodem bude plná saturace inženýrských bariér, která se předpokládá v rozsahu stovek let (čas X00 let) od začátku saturace, a to i za zvýšené teploty generované UOS s VJP (viz kap. 7.6.1). Geochemický vývoj bude rovněž ovlivněn vznikem korozních produktů při postupné korozi UOS (čas X000 let) a jejich vlivem na okolní inženýrské bariéry. Po „tepelné“ fázi, kdy se teplota povrchu UOS přiblíží teplotě okolního horninového masivu (čas X000 let), bude následovat fáze „studená“. V této fázi se mohou projevit jevy jako je např. dopad zalednění / permafrostu na hydrologický a hydrochemický režim podzemních vod (čas X0 000 let – viz kap. 8.2.1; Červinka et al. 2017). Pro ilustraci jsou jednotlivé procesy a jevy znázorněny na neproporcionální časové ose (Obr. 18).



Obr. 18 Ilustrační neproporcionální časová osa významných událostí v geochemickém vývoji HÚ (Červinka et al. 2017)

Vliv na bezpečnost:

Pro celkovou bezpečnost HÚ je velmi důležitá znalost geochemického vývoje celého multibariérového systému, a to včetně horninového prostředí. V zásadě se jedná o časový průběh fyzikálně-chemických procesů v jednotlivých bariérách HÚ. Tyto procesy zahrnují vývoj chemismu podzemních vod a jejich rovnováhu s minerálními fázemi, vývoj pH a oxidačně-redukčních podmínek, kationtovou výměnu smektitických jíílů/bentonitů a další. Probíhající procesy mohou ovlivňovat vlastnosti jednotlivých bariér a mají tak významný dopad na bezpečnost HÚ.

Dostupná data:

Vývojem chemismu na rozhraní inženýrských bariér a horninového prostředí se zabývali v Červinka et al. (2017, 2018), kteří sledovali vliv saturace bentonitové inženýrské bariéry, spotřebu kyslíku, vliv tepla, vliv korozních produktů a dopad permafrostu na vývoj chemismu systému HÚ.

Nejistoty:

Predikce vývoje chemismu HÚ je komplikovanou záležitostí, kde do řešení vstupují nejistoty spojené s časovým vývojem prostředí HÚ, tepelným vývojem, s vlivem klimatu apod. V heterogenním systému působí množství procesů, které při našem uvažování nemusíme zahrnout či nedokážeme posoudit míru jejich významnosti. Složitý systém naráží na problém s identifikací procesů, jejich vzájemné kombinací a vlivem na prostředí HÚ a jednotlivé komponenty, kvantifikací jejich dopadů a odvozením budoucího vývoje, a to včetně geologického, tak klimatického.

Reference:

- BUKOVSKÁ, Z., VERNER, K., BRÁZDA L., BURIÁNEK D., DOBEŠ P., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ B., ERBAN V., FRANĚK J., HALODOVÁ P., HANÁK J., HAVLOVÁ V., HOLEČEK J., JAČKOVÁ I., JELÉNEK J., KAŠPAR V., KOLOMÁ K., KOPAČKOVÁ V., KOUCKÁ L., KUČETA 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. – MS SÚRAO, ZZ 191/2017, Praha.
- ČERVINKA R., GONDOLLI J., KLAJMON M., TOMÁŠOVÁ Z., RUKAVIČKOVÁ L., ŘIHOŠEK J., PACHEROVÁ P., ZEMAN J., VENCELIDES Z. (2017): Chování horninového prostředí/Příprava geochemického modelu úložiště – Definice vstupních dat a příprava modelů. – MS SÚRAO, TZ 125/2017, Praha.
- ČERVINKA R., GONDOLLI J., KLAJMON M., RUKAVIČKOVÁ L., VENCELIDES Z., ZEMAN J. (2018): Chování horninového prostředí / Příprava geochemického modelu úložiště – geochemické výpočty a model reakčního transportu. – MS SÚRAO, TZ 271/2018, Praha.

8 Externí vlivy

8.1 Geologické události

8.1.1 Svahové pohyby

Popis:

Svahové pohyby vznikají při porušení stability svahu působením zemské tíže, přičemž těžiště pohybujících se hmot vykonává dráhu zhruba po svahu dolů. Svahové pohyby jsou velmi různotvárným geodynamickým procesem probíhajícím v přírodním prostředí. Jejich vznik a vývoj je podmíněn místními přírodními poměry (sklon svahu, geologické poměry, zvodnění hornin, klimatické podmínky atd.) a případně lidskou činností (změny reliéfu krajiny, změny vodního hospodářství atd.). Výsledkem svahového pohybu je svahová deformace. V klasifikačním schématu se tak odlišuje pojem svahový pohyb, který je procesem vzniku svahové poruchy a deformace, která označuje konečný produkt – výslednou formu tohoto procesu.

Hlavními kritérii typizace svahových pohybů je tedy mechanismus pohybu a rychlost pohybu. Rozlišují se tak 4 základní skupiny svahových pohybů, a sice ploužení, sesouvání, stékání a řícení – podrobněji viz klasifikace sesuvů (Nemčok et al. 1974).

Vliv na bezpečnost:

Vzhledem k tomu, že se všechny posuzované lokality nacházejí na relativně plochem denudovaném území, které je budováno krystalinickými horninami, lze obecně konstatovat, že svahové pohyby na těchto územích jsou v daném horninovém prostředí z inženýrskogeologického hlediska spíše méně významné, protože horninové prostředí ve spojitosti s morfologií terénu obvykle nevytváří v přirozeném stavu pro vznik a vývoj těchto jevů příliš příznivé podmínky. Na mírných svazích pozvolného reliéfu úvalin a dolin převládla denudační a erozní modelace zvětraného skalního povrchu. Z hlediska kategorizace rizik (Hroch et al. 1998) tak pro své okolí svahové pohyby nepředstavují větší riziko.

To však neznamená, že by zejména při inženýrskogeologickém průzkumu této otázce neměla být věnována náležitá péče, když budou hodnoceny inženýrskogeologické podmínky výstavby pro konkrétní lokalitu v konkrétních inženýrskogeologických poměrech.

Stabilitu svahů ve spojitosti s výstavbou je potřeba řešit projektovou dokumentací zpracovanou na základě kvalitního inženýrskogeologického průzkumu. Stabilitu svahů výkopů lze v pokryvných útvarech obvykle řešit svahováním, v úzkých výkopech se s ohledem na bezpečnostní předpisy uplatní pažení. V pevných horninách předplatformního pokryvu závisí stabilita svahů výkopů na hustotě diskontinuit a jejich orientaci vůči výkopu. Pokud nelze výkopy v pevných horninách z prostorových důvodů zajistit svahováním, uplatní se zajištění svahu různými typy pažení v kontextu s kotvením.

Rovněž zajištění stability svahu u dopravních staveb (místní obslužné komunikace, vlečky apod.) je v zeminách a rozložených horninách možné při dostatku prostoru řešit bez problémů svahováním, v pevných horninách je možné svahování v závislosti na orientaci diskontinuit a jejich četnosti ve vztahu ke svahu výkopu, nebo se uplatní zpevnění masivu (např. kotvení).

Z hlediska potenciálního výskytu svahových pohybů indukovaných lidskou činností je nicméně nutné upozornit na nepravidelné zvětrávání krystalinických hornin, zejména pak granitoidů, které může mít teoreticky vliv i na stabilitu svahu ve výkopu. Z hlediska dosahu intenzity je zvětrání granitoidů obvykle plošně a hloubkově velmi nepravidelné. V zájmové oblasti se tak blízko sebe mohou vyskytovat velmi pevné a rozložené horniny. Významnou skutečností je, že nepravidelnost v hloubkovém dosahu i intenzitě zvětrávání často nelze odhadovat ani podle morfologie terénu.

Nepravidelnost zvětrávání je problematická i pro inženýrskogeologické průzkumy, kdy není možné vyšetřit inženýrskogeologické poměry do všech jednotlivých detailů. Ve zprávě průzkumu by na to mělo být poukázáno. Při průzkumných pracích je s ohledem na zvětrání vhodné kombinovat přímé metody s metodami geofyzikálními. Zejména v případě granitoidů vždy zůstane zbytková nejistota v určení průběhu zvětralinových zón a tuto nejistotu je vhodné investorsky řešit ve spolupráci s projektantem finanční rezervou v projektu, která může být využita při vlastní stavbě pro případy dílčích neočekávaných odlišností mezi závěry inženýrskogeologického průzkumu a skutečností. Průběh stavby je v takových případech žádoucí sledovat kvalitním geologickým / geotechnickým dozorem, aby bylo možné dopady nejistot snížit na minimum.

Výstavba podzemních staveb v dosahu vlivu zvětrávání může být komplikovaná. Ve výrubu se může střídat pevný masiv se silně zvětralou až rozloženou horninou, kde je výrub sám o sobě nestabilní a k zajištění jeho stability je nutné jej pečlivě vystrojit v závislosti na aktuální situaci. Pod úrovní, kam již nedosahují vlivy zvětrávání lze obecně považovat výrub za bezproblémově stabilní. Výjimku tvoří pouze významné tektonické zóny, na kterých je hornina silně tektonicky porušena a současně zvětralá (případně alterovaná) a tedy výrazně méně stabilní než okolí pevný masiv. Jinak je pod úrovní zvětrávání masiv obvykle stabilní a obvykle postačí stabilitu zajistit lokálním kotvením dílčích částí, případně v kombinaci se stříkaným betonem.

Dostupná data:

Z hlediska přirozené nestability se mohou v daném horninovém prostředí nejčastěji vyskytovat drobné sesuvy při podemletí svahu boční erozí potoků, s plouživými pohyby je potřeba počítat u deluvií charakteru sutí, kde dlouhodobě dochází k jejich slézání. Na erozních svazích s obnaženými skalními výchozy může docházet k drobným skalním řícím z těchto útvarů.

Podrobněji se výskytu svahových pohybů na kandidátských lokalitách věnuje Aue (2018), Rout a Mašín (2018) a Bednarik et al. (2018). Z dalších zdrojů lze zmínit např. mapový portál ČGS zejména pak tematické okruhy jako Svahové nestability, Údaje o území a další.

Nejistoty:

Svahové pohyby jsou podmíněny místními přírodními poměry (sklon svahu, geologické poměry, zvodnění, klimatické podmínky atd.) a případně lidskou činností (změny reliéfu krajiny, změny vodního hospodářství, nevhodně naprojektované stavby atd.). Na základě současných znalostí přírodních poměrů na kandidátských lokalitách lze předpokládat, že ve zvažovaném časovém horizontu prvních stovek tisíc let by nemělo dojít k aktivaci rozsáhlých sesuvných území. Na druhou stranu působení lidského faktoru ve vztahu k případnému vzniku sesuvů v řešeném časovém horizontu nelze logicky predikovat vůbec.

Doporučení:

Pro minimalizaci dopadů lidské činnosti na případnou aktivaci sesuvů během průzkumných prací, výstavby i následného provozu HÚ je nutné postupovat v souladu s aktuálně platnými legislativními a normativními předpisy.

Reference:

- AUE M. (2018): Účelová mapa inženýrskogeologické rajonizace M 1:10 000, lokalita Březový potok – Vysvětlující text. CGS P000079/2018. Z 153/2017. 67 s. MS SÚRAO, Česká geologická služba
- BEDNARIK M., HOLZER R., TORNYAI R. (2018): Účelová mapa inženýrskogeologické rajonizace M 1:10 000, lokalita Horka – Vysvětlující text. CGS P000077/2018. Z 151/2017. 64 s. MS SÚRAO, Přírodovědecká fakulta Univerzita Komenského v Bratislave.
- HROCH Z., LOCHMANN Z., MORAVCOVÁ O. (1998): Podíl státní geologické služby ČGÚ na stabilizaci sesuvů iniciovaných extrémními srážkami v červenci 1997. In V. Lysenko (ed.): Přehled výsledků geologických prací na ochranu horninového prostředí v roce 1997, 26–29. – Odbor ochrany horninového prostředí Ministerstva životního prostředí. Praha.
- NEMČOK A., PAŠEK J., RYBÁŘ J. (1974): Dělení svahových pohybů. – Sborník geologických věd, Ř. Hydrogeol. Inž. Geol., 11, 77–93. – Ústřední ústav geologický. Praha.
- ROUT J., MAŠIN D. (2018): Účelová mapa inženýrskogeologické rajonizace M 1:10 000, lokalita Březový potok - Vysvětlující text. CGS P000078/2018. Z 152/2017. 60 s. MS SÚRAO, Přírodovědecká fakulta UK.
- Mapové servery ČGS. [online]. 2022. [cit. 2022-05-31]. Dostupné z: <http://www.geology.cz/extranet/mapy/mapy-online/mapove-aplikace>

8.1.2 Krasové jevy

Popis:

Krasové jevy vznikají v rozpustných horninách, nejčastěji ve vápencích a krystalických vápencích, méně pak v dolomitech, solích nebo sádrovcích. Rozpouštění způsobuje okyselená voda, která vzniká reakcí srážkových vod s atmosférickým oxidem uhličitým. Rozpouštění krasových hornin probíhá jak na zemském povrchu, tak pod ním. Výrazněji se krasovění uplatňuje v oblastech s větším plošným rozsahem a mocností rozpustných hornin a také extenzivním rozpuštěním horninového masivu. Krasové oblasti se vyznačují specifickým hydrologickým režimem a často nepřítomností povrchových toků, jelikož většina vody odtéká podzemními prostory. Hlavním činitelem krasovění je voda, proto se s ním setkáváme především v oblastech s dostatečnými srážkami a relativně nízkou úrovní hladiny podzemní vody, která umožňuje prosakování vody horninovým prostředím, a tudíž rozpouštění po delší dobu. Pro klasické krasové oblasti jsou charakteristické primární povrchové formy různých měřítek jako škrapy, škrapová pole, závrtky nebo rozsáhlejší polje. Pod zemským povrchem může docházet k rozšiřování existujících puklin v kombinaci s mechanickou erozí díky tekoucí vodě v otevřených prostorech, za vzniku podzemních kaveren a jeskyní.

Rozpuštěný karbonát, případně i jiné látky se za určitých podmínek mohou z vody srážet v podobě sekundárních krasových uloženin (např. pěnoveců na povrchu nebo různých

speleothem v podzemí). Hloubka krasovění závisí na mocnosti komplexu krasových hornin, mocnosti sedimentárního pokryvu, sklonitosti reliéfu, klimatických podmínkách a dalších faktorech.

Vliv na bezpečnost:

Lze předpokládat, že výskyt krasových hornin ve studovaných lokalitách je jen omezený. V metasedimentárních jednotkách moldanubika mohou být přítomny v podobě menších těles nebo tenkých poloh krystalických vápenců nebo erlanů. V granitoidních horninách se mohou vyskytovat kalcitové výplně puklin omezeného rozsahu, jejichž potenciál ke krasovění je však minimální. Přítomnost krasových hornin ještě nutně neznamená výskyt krasových jevů. Polohy těchto hornin s odlišnými reologickými vlastnostmi ve foliovaných pararulách a migmatitech však mohou predisponovat křehké porušení horninového masivu, případně pohyb fluid podél těchto poruch.

Dostupná data:

Výskyty větších těles hornin náchylných ke krasovění jsou zobrazeny v Geologické mapě měřítek 1:25 000 a 1:50 000, lokální polohy jsou však v těchto měřítcích nepostižitelné.

Z dostupných pramenů vyplývá, že ve čtyřech kandidátských lokalitách nebyly krasové jevy zjištěny (Havlová et al. 2018 a–d), nicméně jejich přítomnost lze v omezené míře předpokládat v lokalitě ETE-Jih (Navrátilová et al. 2017; Havlová et al. 2018 d).

Nejistoty:

Samotná přítomnost vápenců není jednoznačnou indikací pro procesy krasovění. Je nutná souhra více faktorů včetně klimatických, které se v řádu prvních stovek let obtížně predikují. Vzhledem k malému plošnému výskytu karbonátů lze však tento fenomén považovat za málo významný a bez vlivu na dlouhodobou bezpečnost zvolených lokalit. Významnější nejistoty by mohly vyplývat z nedostatečné znalosti rozsahu krasových hornin v hloubce pod povrchem.

Doporučení:

Vzhledem k tomu, že v žádné lokalitě nebyla zjištěna přítomnost krasových jevů a potenciál pro jejich výskyt je minimální, není nutné nadále realizovat další průzkumné práce.

Reference:

HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., BUKOVSKÁ, Z., BAIER, J., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., ŘÍHA, J., ČERVINKA, R. (2018a): Hodnocení vhodnosti lokality pro umístění hlubinného úložiště VJP a RAO z hlediska dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Březový Potok. MS SÚRAO, TZ 276/2018, 120 str.

HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., BUKOVSKÁ, Z., UHLÍK, J., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., ŘÍHA, J., ČERVINKA, R. (2018b): Hodnocení vhodnosti lokality pro umístění hlubinného úložiště VJP a RAO z hlediska dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Horka. MS SÚRAO, TZ 280/2018, 119 str.

HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., BUKOVSKÁ, Z., BAIER, J., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, ŘÍHA, J., ČERVINKA, R. (2018c): Hodnocení vhodnosti lokality pro umístění hlubinného úložiště VJP a RAO z hlediska dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Hrádek. MS SÚRAO, TZ 281/2018, 126 str.

HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., JANKOVEC, J., ŘÍHA J., ČERVINKA, R. (2018d): Hodnocení vhodnosti lokality pro umístění hlubinného úložiště VJP a RAO z hlediska dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Temelín-Jih (ETE-J). MS SÚRAO, TZ 284/2018, 118 str.

NAVRÁTILOVÁ, V., NOL, O., KAŠPAR, R., LANČA, D., MIŠUREC, J., NEDVĚD, J., RAJCHL, M., SOSNA, K., ŠINDELÁŘ, M., TLAMSA, J., VOJTĚCHOVSKÁ, A. (2017): Zpráva o provedení geologicko-výzkumných prací na lokalitě ETE-jih. Závěrečná zpráva, MS SÚRAO, 280 str.

8.1.3 Vulkanismus a doprovodné jevy vč. postvulkanických jevů

Popis:

Jedná se o souhrn projevů sopečné (vulkanické) činnosti, to znamená procesů souvisejících s vystupováním magmatu na, či do blízkého okolí zemského povrchu. Zahrnuje ale i doprovodné procesy, jakými mohou být například zemětřesení, kontaktní metamorfóza, tvorba vulkanoklastických hornin, horké prameny a gejzíry, výrony CO₂ nebo další projevy spojené s uvolňováním geotermální energie.

Pro samotný vznik a výstup roztavené taveniny je třeba splnit řadu faktorů. Nejzásadnější jsou obecné podmínky natažení hornin hluboko pod zemským povrchem. Nejčastěji se jedná o horniny svrchního pláště, povětšinou peridotity, jejichž valnou část objemu tvoří minerální skupina olivínu (Fe, Mg)₂(SiO₄). Pro tento typ vzniku taveniny je rozhodující výrazné snížení tlaku či zvýšení teploty, které může způsobit typicky změna napěťového režimu v dané oblasti. Tu povětšinou také doprovází vznik řady hlubokých zlomových struktur, podél kterých může tavenina následně vystupovat směrem k povrchu. Tyto jevy mohou být například vyvolány napěťovou nestabilitou v předpolí vznikajícího orogenního pohoří či výstupem tzv. plášťové horké skvrny. Druhý typ vzniku taveniny je vázán na oblasti subdukčních zón, kdy dochází k tavení hornin především z důvodu přítomnosti vody v subdukovaných horninách (typicky mořské bazalty, z nichž se voda uvolňuje při přeměně amfibolů na pyroxeny během vysokotlaké metamorfózy), přičemž tato voda výrazně snižuje teplotu tání okolních hornin. Horká tavenina poté stoupá směrem k povrchu, avšak spíše vytváří podpovrchová tělesa plutonických hornin, než povrchová a přípovrchová tělesa vulkanických hornin (viz dále).

V rámci vulkanismu typicky vznikají na povrchu Země výlevné vulkanické horniny. Existuje řada druhů vulkanických hornin, přičemž nejrozšířenějšími jsou například bazalty, andezity, trachyty či ryolity. Toto jsou horniny, které vzniknou výstupem magmatu po různých preferenčních plochách v zemské kůře k povrchu Země. Pokud magma utuhne již v hloubce v zemské kůře jako velké těleso (pluton, batolit) a k povrchu se nedostane, jedná se o magmatickou horninu hlubinnou (např. granit, syenit, gabro). Hojně jsou taktéž magmatické žilné horniny, které jsou objemově výrazně menší než vulkanické a plutonické horniny a které většinou doprovází oba výše zmíněné typy magmatických hornin. Jsou jimi například lamprofyry či pegmatity.

Velmi hojnými doprovodnými horninami ve vulkanických oblastech jsou vulkanoklastické horniny. Tyto horniny vznikají při vlastních erupcích sopek, kdy se především jemný materiál s množstvím větších úlomků dostává ve velké rychlosti mimo sopku a vytváří mračna rozžhavené směsi plynů a pevných částic ženoucích se po svahu sopky směrem do níže položených poloh (pyroklastické proudy), případně je tento materiál vystřelen vysoko do atmosféry, kde se může pohybovat až stovky kilometrů od sopky a následně padá na zemský

povrch, kde vytváří charakteristické vrstevnaté vulkanosedimentární horniny zvané tufy. V případě pokrytí sopky ledovcem či větším množstvím sněhu, případně při zasažení kráterového jezera sopky, může dojít ke vzniku tzv. teplých laharů, čili úlomkotoků, které mají vysoké destrukční účinky i ve velkých vzdálenostech od samotné sopky. V rámci vulkanických oblastí pak mohou také vznikat tzv. studené lahary, které vznikají přesycením vulkanoklastických hornin srážkovou vodou a jejich následným utržením ze svahu sopky, přičemž vzniká opět úlomkotok jako v případě horkého laharu.

Vulkanismus je také spojený s tvarováním reliéfu Země, při kterém vznikají nové tvary jako například sopky, vulkanická pohoří, lávové proudy a podobně. Projevy vulkanismu na Zemi jsou nejčastěji vázány na okraje litosférických desek (rifty, subdukční zóny) či na místa tzv. horkých skvrn. Nad těmito oblastmi pak vznikají sopky.

Mezi typické postvulkanické jevy řadíme například hydrotermální aktivitu, výrony plynů, autometamorfózu vulkanických hornin, propady magmatických krbů, sesuvy a vznik studených laharů (lahary viz výše). Hydrotermální aktivita je způsobena ohřátím vody a vodních fluid v horninách okolo horké taveniny, případně v rámci hlubokých tektonických zlomů zasahujících do spodních částí zemské kůry. Hydrotermální voda v aktivních vulkanických oblastech pak může na povrchu vytvářet horké prameny či gejzíry. Díky vyšší rozpustnosti látek v horké vodě pak tato hydrotermální aktivita způsobuje vznik hydrotermální alterace okolních hornin, což má například vliv na soudržnost těchto hornin, ale dává také za vznik řady ložisek nerostných surovin (rudy i nerudy). Dalším typickým doprovodným jevem vulkanické a postvulkanické aktivity jsou výrony plynů, z nichž dominuje především CO_x , ale také SO_x , F, Cl a další. Některé minerály tvořící magmatické horniny se po čase v povrchových a přípovrchových podmínkách začnou samovolně rozpadat či přeměňovat na jiné minerály. Jedná se především o minerály ze skupiny amfibolů či olivínu. Tyto samovolné přeměny jsou označovány jako autometamorfóza a výrazně ovlivňují soudržnost vulkanických hornin. Vyprázdněné magmatické krby, nacházející se v podzemí, se po určité době propadají a vznikají kalderové struktury, případně se může jejich nadloží propadat v důvodu tuhnutí taveniny v magmatickém krbu, přičemž dochází ke smršťování tohoto materiálu. Typickými jevy v postvulkanických oblastech jsou sesuvy, které jsou podrobně popsány v kapitole Svahové pohyby. Potencionální lokality pro ukládání RAO se nachází mimo oblast kenozoického vulkanismu spojeného s vývojem oherského riftu a rozptýleného alkalického magmatismu českého masivu a karpatského oblouku. V okruhu 100 km od uvažovaných lokalit nejsou známy projevy vulkanické ani postvulkanické aktivity za posledních 250 milionů let.

Vliv na bezpečnost:

Vzhledem k faktu, že se v daných oblastech za posledních minimálně 250 milionů let neobjevily, ani nedochází ke geologickým procesům, které by umožňovaly magmatu jeho výstup k povrchu, existuje reálný předpoklad, že se žádné jevy spjaté s vulkanickou činností či postvulkanickými procesy ve výhledu 1 milionu let do budoucnosti v těchto oblastech neobjeví. Úložiště RAO tedy v době před výstavbou, během výstavby, v provozu i po uzavření v horizontu 1 milionu let pravděpodobně nebude ovlivněno vulkanickými ani postvulkanickými jevy.

Dostupná data:

Rozsáhlý soubor archivních geovědních zpráv a map je přehledně shrnutý ve zprávách, které doprovázejí detailní 3D geologické modely 7 lokalit (Franěk et al., 2018, z vybraných 4 lokalit

se toto týká Horky, Hrádku a Březového potoka), a 3D geologický model ETE-Jih (Navrátilová a Noll, 2017). Data výskytu vulkanických a vulkanoklastických hornin získaná v letech 2017-2019 díky novým geofyzikálním a geologickým výzkumům jsou pak pro všechny tyto 4 lokality shrnuta v rozsáhlé práci Mixy et al. (2019).

Zároveň jsou všechny tyto podklady přehlednou a stručnější formou shrnuty ve zprávách týkajících se hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti (Havlová et al., 2020 a, e, f, g), a to včetně jejich interpretace z hlediska eventuálního výskytu vulkanických hornin v rámci daného horninového masívu.

Nejistoty:

Vzhledem k faktu, že se v okolí od uvažovaných lokalit nevyskytují žádné jevy ovlivňující napěťové rozložení v oblasti a v příštích několika milionech letech se ani žádné tyto jevy pravděpodobně neobjeví, lze tedy predikovat nulovou vulkanickou aktivitu.

Reference:

FRANĚK J., BUKOVSKÁ Z., BURIÁNEK D., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ B., GRUNDLOCH J., HOLEČEK J., JELÉNEK J., JELÍNEK J., KLOMÍNSKÝ J., KRYŠTOFOVÁ E., KUČERA R., KUNCEOVÁ E., KŮRKOVÁ I., NAHODILOVÁ R., PACHEROVÁ P., PERTOLDOVÁ J., PEŘESTÝ V., RUKAVIČKOVÁ L., SOEJONO I., ŠVAGERA O., VERNER K., ŽÁČEK V. (2018): Závěrečná zpráva 3D strukturně – geologické modely potenciálních lokalit HÚ. MS SÚRAO, TZ 229/2018, Praha, 594 str.

HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., BAIER, J., MILICKÝ, M., POLÁK, M., BUKOVSKÁ, Z., ČERNÝ, M., DUŠEK, K., FIFERNOVÁ, M., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., HOLEČEK J., JELÉNEK, J., JANKOVEC, J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., KUNCEOVÁ, E., PETYNIÁK, O., RAPPRIČH, V., RUKAVIČKOVÁ, L., SOEJONO, I., ŠVAGERA, O., UHLÍK, J., VOJTĚCHOVÁ, H., ŽÁČKOVÁ, E. (2020a): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Březový potok. MS SÚRAO, TZ 447/2020, 62 str.

HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., JANKOVEC, J., UHLÍK, J., ČERNÝ, M., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., BAIER, J., DUŠEK, K., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., HEJTMÁNKOVÁ, P., HOLEČEK J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., MILICKÝ, M., NAHODILOVÁ, R., PACHEROVÁ, P., PETYNIÁK, O., PEŘESTÝ, V., RAPPRIČH, V., ŘIHOŠEK, J., RUKAVIČKOVÁ, L., ŠVAGERA, O., POLÁK, M., VOJTĚCHOVÁ, H., ŽÁČKOVÁ, E. (2020e): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Janoch (ETE-jih). MS SÚRAO, TZ 451/2020, 63 str.

HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., UHLÍK, J., JANKOVEC, J., MILICKÝ, M., BAIER, J., BURIÁNEK, D., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ, B., DUŠEK, K., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., GRUNDLOCH, J., HOLEČEK J., JELÉNEK, J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., KUNCEOVÁ, E., PETYNIÁK, O., POLÁK, M., RAPPRIČH, V., RUKAVIČKOVÁ, L., ŠVAGERA, O., VOJTĚCHOVÁ, H. (2020f): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Horka. MS SÚRAO, TZ 452/2020, 63 str.

HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., BAIER, J., MILICKÝ, M., BUKOVSKÁ, Z., ČERNÝ, M., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ, B., DUŠEK, K., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., HOLEČEK J., JANKOVEC, J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., KUNCEOVÁ, E., PETYNIÁK, O., POLÁK, M., RAPPRIČH, V., RUKAVIČKOVÁ, L., ŠVAGERA, O., URÍK, J.,

VOJTĚCHOVÁ, H., ŽÁČKOVÁ, E. (2020g): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Hrádek. MS SÚRAO, 453/2020, 63 str.

MIXA P., SKÁCELOVÁ Z., PERTOLDOVÁ J., BUKOVSKÁ Z., BURIÁNEK D., DUDÍKOVÁ B., FRANĚK J., HRDLIČKOVÁ K., JELÍNEK J., NAHODILOVÁ R., SOEJONO I., VERNER K., ŽÁČEK V. (2019): Shrnutí výsledků geologických a geofyzikálních výzkumných prací provedených v období 9/2017–6/2019 pro aktualizaci hodnocení potenciálních lokalit hlubinného úložiště RAO. MS SÚRAO, TZ 412/2019, Praha, 427 str.

NAVRÁTILOVÁ V., NOL O., KAŠPAR R., LANČA D., MIŠUREC J., NEDVĚD J., RAJCHL M., SOSNA K., ŠINDELÁŘ M., TLAMSA J., VOJTĚCHOVSKÁ A. (2017): Zpráva o provedení geologicko-výzkumných prací na lokalitě ETE-jih. Závěrečná zpráva, MS SÚRAO, 280 str.

8.1.4 Seismické události

Popis:

Zásadní událostí, která může ovlivnit stav a bezpečnost úložiště, jsou seismické a tektonické změny.

Důsledkem pak může být:

- stříh úložného místa s UOS,
- mechanické porušení inženýrských bariér,
- změna vodního režimu,
- změna transportních cest.

Vliv zemětřesení či jiných tektonických událostí může mít vliv na řadu parametrů normálního scénáře vývoje úložiště, například změnu toku podzemní vody či vznik nových preferenčních cest (Vokál et al. 2010).

Dostupná data:

V nejstarším historickém období do roku 1899 bylo v Českém masivu dokladováno v kategorii silná a střední zemětřesení bylo dokladováno 14 zemětřesení. Nejintenzivnější zemětřesení (kategorie silné) je popsáno z 15. září 1590 z oblasti Niederösterreich (Rakousko). Jeho uváděná intenzita je $I_0 = 8-9$ ($M_w = 6,06 \pm 0,47$). Na základě zpracovaných rešerší a numerického modelování ve studii Kaláb (2015) lze konstatovat, že vliv seismických událostí (vibrací) na stabilitu horninových masivů v hloubce 500 m a na úložné prostory v horizontu 100 000 let v Českém masivu bude velmi nízký. To potvrzují i výsledky Málka et al. (2018). Špičkové hodnoty vibrací zemětřesení (PGA, PGV nebo PGD) se snižují s hloubkou, tento pokles je rychlejší v mělkých vrstvách oproti hlubším partiím. Snižování amplitudy v závislosti na hloubce je ovlivněno velikostí magnitudy zemětřesení a lokální geologickou stavbou. Obecně platí, že poškození v podzemních stavbách (dolech) je nevýznamné, pokud se tyto nacházejí v pevných (únosných) a nevětralých horninách. Největší škody vznikají v podzemních stavbách nacházejících se v nezkonsolidovaných nebo málo pevných horninách. To je následek snížení účinků vibrací v pevných horninách, nezkonsolidované horniny jsou mnohem náchylnější k poškození následkem vibrací (Kaláb 2015).

V těchto predikcích však není zahrnuta tzv. indukovaná seismika, která může vzniknout během budování a provozu HÚ. Před zahájením báňských činností je nemožné stanovit, jak silná indukovaná seismická vznikne (Málek et al. 2018).

Vliv na bezpečnost:

Mechanické porušení:

Mechanické porušení UOS, stříh úložného místa je řešen ve zprávě (Pospíšková et al, 2022)

Mechanické porušení bufferu by mělo za následek tvorbu preferenčních cest (dojde-li k události v nenasyceném stavu), případně změnu prostorového uspořádání systému.

Mechanické porušení horninového masivu by mělo za následek vznik fraktur a změnu/vznik nových preferenčních cest, případně změnu prostorového uspořádání systému.

Změna vodního režimu:

Změna koncentrace rozpuštěných látek, změna či vznik gradientů způsobujících transport látek.

Intruze vod o jiném složení (nízká mineralizace, vysoký obsah O₂).

Změna transportních cest:

Vznik nových transportních cest, změna geometrie stávajících transportních cest, fyzikální či geochemické charakteristiky, popř. směr transportu.

Nejistoty:

Vymezení seismoaktivních zlomů, neboť průběhy jsou známy pouze z povrchu.

Nejsou k dispozici data z lokální seismické sítě s vysokou citlivostí.

Dosud málo probádanou otázkou je změna seismického režimu v důsledku lidské činnosti. Po odlesnění rozsáhlých ploch na kontinentech a dalších změnách na zemském povrchu dochází ke změnám v teplotním kolísání v přípoверхových horninových vrstvách. Vzhledem k teplotní roztažnosti hornin může toto kolísání způsobovat dodatečné tektonické napětí. Známé jsou projevy indukované seismicity v důsledku výstavby přehrad, těžby nerostných surovin nebo využívání geotermální energie. (Málek et al, 2018).

Reference:

- KALÁB Z., JECHUMTÁLOVÁ Z., LEDNICKÁ M., ŠÍLENÝ J. (2015): Seismická na území ČR a v příhraničních oblastech. Závěrečná zpráva. – MS SÚRAO ZZ 26/2015, Praha.
- MÁLEK J., PRACHAŘ I., VACKÁŘ J., MAZANEC M. (2018) Pravděpodobnostní hodnocení seismického ohrožení lokalit pro HÚ, MS- SÚRAO 232/2018, Praha.
- POSPÍŠKOVÁ I., DOBREV D., FRÝBORT J., HAVLOVÁ V., VAŠÍČEK R., KOBYLKA D., BÍLÝ T., RATAJ J., FRÝBORTOVÁ L., HOFFMANOVÁ E., VEČERNÍK P., VOZÁR M., FIEDLER F., SVOBODA J. (2022): Analýza FEPs UOS s VJP. MS SÚRAO 617/2022.
- VOKÁL A., HAVLOVÁ V., HERCÍK M., LANDA J., LUKIN D., VEJSADA J. (2010): Aktualizace referenčního projektu hlubinného úložiště radioaktivních odpadů v hypotetické lokalitě. III.

Etapa. Studie zadávací bezpečnostní zprávy. C. Dokumentační část. C.2 Hodnocení dlouhodobé bezpečnosti HÚ. Zpráva ÚJV Řež, a.s. EGP 5014-F-101420, 12/2010.

8.2 Klimatické události

8.2.1 Vliv chladného klimatu

Popis:

Klimatické procesy a události zahrnují veškeré minulé, současné a budoucí stavy atmosféry a interakce s aktivním povrchem včetně jejich změn. Klimatický systém je komplexním nelineárním systémem, ve kterém neustále probíhá množství fyzikálních a chemických procesů, proto se mění a vyvíjí na různých časových škálách. V současné klimatické změně do chodu klimatu vstupuje nový prvek, kterým je člověk a jeho činnost, což zásadním způsobem a do značné míry nepredikovatelně mění přírodní atmosférické procesy a chod klimatu.

Komplexnost klimatického systému a jeho obrovská dynamika neumožňuje jeho přesný popis, natož přesnou budoucí předpověď jeho vývoje. K předpovědi budoucího chodu klimatu jsou používány numerické klimatické modely, a to jak globální (GCM), tak i regionální úrovně (RCM). Avšak vzhledem k nejistotě budoucích antropogenních emisí skleníkových plynů jsou používány tzv. reprezentativní směry vývoje koncentrací (RCP), které reprezentují různé emisní scénáře. Takovéto modely však lze aplikovat pouze na škálách desetiletí až století, na delších časových škálách překračujících tisíciletí lze modelovat pouze chod hlavních klimatotvorných faktorů, a to obecně spíše na globální úrovni.

Druhou možností je využití analogií s dřívějšími klimatickými podmínkami během kvartérních glaciálně-interglaciálních cyklů. Zde je největším limitem přesnost geologických a paleoklimatologických dat pro daná časová období. Vrcholně pleniglaciální a tedy teplotně nejchladnější podmínky trvaly ve 100 tisíciletých klimatických cyklech kvartéru obvykle jen 5–20 tisíc let. Vhodnými ekvivalenty a tedy nejchladnějšími a nejsuššími stadiály jsou období odpovídající vrcholným fázím MIS 2 (poslední glaciální maximum, LGM, před ~20 tisíci lety), MIS 6 (vrchol předposledního sálského glaciálu, před ~140 tisíci lety), MIS 12 (vrchol mladšího elsterského glaciálu, před ~435 tisíci lety) a MIS 16 (vrchol donského / staršího elsterského glaciálu, před ~630 tisíci lety) (Cohen, Gibbard 2011; Nývlt, Dobrovolný 2015).

Průměrné roční teploty vzduchu byly během vrcholných pleniglaciálních podmínek na našem území o 6–12 °C nižší, než v současnosti a pohybovaly se tak v mimohorských oblastech nejčastěji v rozpětí ~ -7 až -2 °C (Šafanda, Kubík 1992; Šafanda, Rajver 2001). Modelové simulace teplotních podmínek během posledního glaciálního maxima ukazují na pokles o 5–10 °C v průměrných ročních hodnotách oproti nedávným teplotám, kdy jako základ byly použity teploty v Evropě odpovídající roku 1990 n.l. (Strandberg et al. 2011). Naproti tomu pro oblast našich vysokých pohoří, jako jsou Krkonoše a Šumava ukazují modely pro poslední glaciální maximum pokles průměrných ročních teplot o 8–12 °C (Heyman et al. 2013). Vrcholně pleniglaciální podmínky byly také nejsuššími obdobími v rámci kvartérních klimatických cyklů, kdy byly průměrné roční srážky ve středoevropském prostoru o 50–60 % nižší, než dnes a pohybovaly se v rozpětí ~250–350 mm (Hatté, Guiot 2005). Maximální glaciální (pleniglaciální) podmínky trvaly v každém cyklu 6–20 tisíc let, což odpovídá 5–17 % délky

trvání dlouhého kvartérního glaciálně-interglaciálního cyklu (Cohen, Gibbard 2011; Nývlt, Dobrovolný 2015; Pačes et al. 2017).

Díky délce trvání vrcholně glaciálních podmínek lze tyto chápat jako extrémně málo časté a výrazně se lišící od průměrných glaciálních podmínek v daném území, které díky dlouhodobějšímu trvání měly na vývoj krajiny v nezaledněných územích větší vliv (Porter 1989). Běžné glaciální podmínky panovaly na našem území po dobu 60–80 % posledního glaciálně-interglaciálního cyklu (během MIS 3, 4, 5 a-d), kdy byly průměrné roční teploty a průměrné roční úhrny srážek značně proměnlivé, ale pohybovaly se nejčastěji v rozmezí –2 až 5 °C a ~300–600 mm (Hatté, Guiot 2005; Strandberg et al. 2011; Pačes et al. 2017).

Vliv na bezpečnost:

Klimatická změna má a bude mít na různých časových škálách významný vliv na dlouhodobou bezpečnost HÚ. Vliv chladného klimatu je na našem území spojen především s postupnou tvorbou permafrostu (viz kap. 8.2.1.1) a v okrajových částech s potenciálním zásahem okraje Severoevropského ledovcového štítu (viz kap. 8.2.1.2). V případě umístění ukládacího horizontu cca 500 m pod úroveň terénu nedojde k přímému zamrznutí, ale postupná agradace permafrostu v nadloží bude mít progresivní vliv na změny hydrogeologických vlastností území, protože dojde k přerušení infiltrace povrchových vod do hlubokých zvodní ať už běžnými hydraulickými procesy nebo podél zlomů a puklin horninového masivu (viz kap. 6.6 a 7.2). Zároveň tím dojde k přirozenému oddělení povrchového a hlubinného oběhu vody. Může to též lokálně ovlivnit složení podzemní vody, a především změnit množství podzemní vody, a tedy i velikost podzemního proudění. Posunutí nulové izotermy do hloubky až 250 m (max. doložená hloubka permafrostu na našem území, viz kap. 8.2.1.1) způsobí i zvýšení termálního gradientu pod vzniklým permafrostem, přičemž v hloubce 500 m již nebudou patrné významnější změny. Zároveň na zemském povrchu bude v souvislosti s chladným klimatem dominovat mechanické zvětrávání (kap. 6.5.3), které je dominantní především pro přípovrchovou zónu svrchních max. několika metrů, kde opakující se regulační cykly spojené s objemovými změnami systému voda-led tříští horniny za vzniku hrubozrnných zvětralin. Takové zvětralin jsou pak snáze odnášeny svahovými procesy a obecně dochází k rychlejší povrchové erozi, i když k těmto procesům častěji dochází v teplejších výkyvech glaciálů (interstadiálech) nebo během terminations, tedy přechodů mezi glaciály a interglaciály (viz kap. 7.4.2 a 8.1.1).

Dostupná data:

Portál ČHMÚ, historicka-data, pocasi, zmena-klimatu: [<https://www.chmi.cz/historicka-data/pocasi/zmena-klimatu/zakladni-informace#>]

CzechGlobe, klimatickazmena.cz: [<https://www.klimatickazmena.cz/cs/>]

Modelové výstupy budoucího chodu klimatu a diskuze vývoje orbitální parametrů na dlouhých časových škálách jsou dostupné v práci Nývlt a Dobrovolný (2015).

Nejistoty:

Komplexnost klimatického systému a jeho obrovská dynamika neumožňuje jeho přesný popis, natož přesnou budoucí předpověď jeho vývoje. K předpovědi budoucího chodu klimatu jsou používány numerické klimatické modely, a to jak globální (GCM), tak i regionální úrovně (RCM). Avšak vzhledem k nejistotě budoucích antropogenních emisí skleníkových plynů jsou používány tzv. reprezentativní směry vývoje koncentrací (RCP), které reprezentují různé

emisní scénáře. Modely budoucího vývoje insolace a koncentraci CO₂ ukazují, že pro nástup dalšího glaciálu je nezbytné, aby hodnoty obou uvažovaných klimatotvorných faktorů klesaly. V případě koncentrací CO₂ na předindustriální úroveň (280 ppm). V opačném případě na severní polokouli přetrvávají v nejbližších 100 tisících letech interglaciální podmínky (Berger, Loutre 2002).

Reference:

- BERGER A., LOUTRE M. F. (2002): An exceptionally long interglacial ahead? – *Science*, 297, 1287–1288.
- COHEN K. M., GIBBARD, P. (2011): Global chronostratigraphical correlation table for the last 2.7 million years. – Subcommission on Quaternary Stratigraphy (International Commission on Stratigraphy), Cambridge University.
- HATTÉ C., GUIOT J. (2005): Palaeoprecipitation reconstruction by inverse modelling using the isotopic signal of loess organic matter: application to the Nussloch loess sequence (Rhine Valley, Germany). – *Climate Dynamics*, 25, 315–327.
- HEYMAN B.M., HEYMAN J., FICKERT T., HARBOR J.M. (2013): Paleo-climate of the central European uplands during the last glacial maximum based on glacier mass-balance modeling. – *Quaternary Research*, 79, 49–54.
- LOUTRE M. F., BERGER A. (2003): Marine Isotope Stage 11 as an analogue for the present interglacial. – *Global and Planetary Change*, 36, 209–217.
- NÝVLT, D., DOBROVOLNÝ, P. (2015): Klimatická stabilita území – závěrečná zpráva. – Technická zpráva č. 15/2015. 53 s., SÚRAO a ČGS.
- OECD/NEA (2019): International Features, Events and Processes (IFEP) List for the Deep Geological Disposal of Radioactive Waste, Version 3.0, NEA/RWM/R(2019)1, Paris.
- PAČES T., DOBROVOLNÝ P., HOLEČEK J., NÝVLT D., RUKAVIČKOVÁ L. (2017): Future water-rock interaction in deep repository of spent nuclear fuel. – *Procedia Earth and Planetary Science* 17, 100–103.
- PORTER S.C. (1989): Some Geological Implications of Average Quaternary Glacial Conditions. – *Quaternary Research*, 32, 245–261.
- STRANDBERG G., BRANDEFELT J., KJELLSTRÖM E., SMITH B. (2011): High-resolution regional simulation of last glacial maximum climate in Europe. – *Tellus*, 63A, 107–125.
- ŠAFANDA J., KUBÍK J. (1992): Evidence of ground surface temperature changes from two boreholes in the Bohemian Massif. – *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 98, 199–208.
- ŠAFANDA J., RAJVER D. (2001): Signature of the last ice age in the present subsurface temperatures in the Czech Republic and Slovenia. – *Global and Planetary Change*, 29, 241–258.

8.2.1.1 Periglaciální jevy

Popis:

V glaciálních podmínkách se v nezaledněných oblastech Střední Evropy začal tvořit permafrost, protože průměrné roční teploty vzduchu byly dlouhodobě negativní a odpovídaly dnešním teplotám ve Vysoké Arktidě (průměrné roční teploty vzduchu v oblasti Petuniabukta, centrální část souostroví Svalbard jsou v rozmezí -3 až -5 °C; Láska et al. 2012) nebo v okrajových částech Antarktidy (průměrná roční teplota vzduchu odledněné severní části ostrova Jamese Rosse u Antarktického poloostrova je v rozmezí -6 až -7 °C; Hrbáček et al. 2017). Díky postupnému dlouhodobému ochlazení až do vrcholně glaciálních (pleniglaciálních) podmínek mohla mocnost permafrostu na našem území podle zjištěných kryogenních postižení materiálu v hlubokých vrtech a podle modelových výpočtů dosáhnout 200–250 m (Růžičková a Zeman 1992; Šafanda a Kubík 1992; Czudek 2005). Permafrost zásadně ovlivňuje oběh podzemních vod, které jsou ve zmrzlém stavu imobilní. Z tohoto pohledu je limitována především infiltrace povrchové vody do hlubších částí zemské kůry a hluboký hydrogeologický oběh je permafrostem efektivně oddělen od povrchového hydrologického oběhu. Permafrost tak představuje přirozenou bariéru pro možnou kontaminaci povrchu uloženými radioaktivními látkami. Rozšíření permafrostu v oblasti severní polokoule bylo rekonstruováno např. v práci Vandenberghe et al. (2014).

Vliv na bezpečnost:

Periglaciální jevy a permafrost budou mít významný vliv na dlouhodobou bezpečnost HÚ v případě chladného budoucího vývoje klimatu. Postupná agradace permafrostu do horninového masivu bude mít progresivní vliv na změny hydrogeologických vlastností území, protože dojde k přerušení infiltrace povrchových vod do hlubokých zvodní ať už běžnými hydraulickými procesy nebo podél zlomů a puklin horninového masivu (viz kap. 6.6 a 7.2). Zároveň tím dojde k přirozenému oddělení povrchového a hlubinného oběhu vody. Může to též lokálně ovlivnit složení podzemní vody, a především změnit množství podzemní vody, a tedy i velikost podzemního proudění. Posunutí nulové izotermy do hloubky až 250 m (max. doložená hloubka permafrostu během kvartéru na našem území) způsobí i zvýšení termálního gradientu pod vzniklým permafrostem, přičemž v hloubce 500 m již nebudou patrné významnější změny. Na zemském povrchu bude v souvislosti s chladným klimatem dominovat mechanické zvětrávání (kap. 6.5.3), které je dominantní především pro přípovrchovou zónu svrchních max. několika metrů, kde opakující se regulační cykly spojené s objemovými změnami systému voda-led tříští horniny za vzniku hrubozrnných zvětralin. Takové zvětralin jsou pak snáze odnášeny svahovými procesy a obecně dochází k rychlejší povrchové erozi, i když k těmto procesům častěji dochází v teplejších výkyvech glaciálů (interstadiálech) nebo během terminations, tedy přechodů mezi glaciály a interglaciály (viz kap. 7.4.2 a 8.1.1). Chemické zvětrávání je za těchto podmínek minimalizováno jen do krátkých letních sezón a jeho intenzita je významně snížena.

Dostupná data:

Mapu rozsahu permafrostu na severní polokouli během posledního permafrostového maxima je dostupná z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/bor.12070>

Nejistoty:

Modely budoucího vývoje insolace a koncentrací CO₂ ukazují, že pro nástup dalšího glaciálu je nezbytné, aby hodnoty obou uvažovaných klimatotvorných faktorů klesaly (Nývlt, Dobrovolný 2015; Pačes et al. 2017). V případě koncentrací CO₂ na předindustriální úroveň (280 ppm). V opačném případě na severní polokouli přetrvávají v nejbližších 100 tisících letech interglaciální podmínky (Berger, Loutre 2002).

Reference:

- BERGER A., LOUTRE M. F. (2002): An exceptionally long interglacial ahead? – *Science*, 297, 1287–1288.
- CZUDEK T. (2005): Vývoj reliéfu krajiny České republiky v kvartéru. – Moravské zemské muzeum, Brno.
- HRBÁČEK F., KŇAŽKOVÁ M., NÝVLT D., LÁSKA K., MUELLER C. W., ONDRUCH J. (2017): Active layer monitoring at CALM-S site near J.G.Mendel Station, James Ross Island, eastern Antarctic Peninsula. – *Science of the Total Environment*, 601–602, 987–997.
- LÁSKA K., WITOSZOVÁ D., PROŠEK P. (2012): Weather patterns of the coastal zone of Petuniabukta, central Spitsbergen in the period 2008–2010. – *Polish Polar Research*, 33, 297–318.
- NÝVLT, D., DOBROVOLNÝ, P. (2015): Klimatická stabilita území – závěrečná zpráva. – Technická zpráva č. 15/2015. 53 s., SÚRAO a ČGS.
- PAČES T., DOBROVOLNÝ P., HOLEČEK J., NÝVLT D., RUKAVIČKOVÁ L. (2017): Future water-rock interaction in deep repository of spent nuclear fuel. – *Procedia Earth and Planetary Science* 17, 100–103.
- RŮŽIČKOVÁ E., ZEMAN A. (1992): Blahutovice-1 borehole near Hranice na Moravě: Weathering effect in Badenian deposits. – *Scripta Fac. Natur. Univ. Masaryk*, 22, 128–132.
- ŠAFANDA J., KUBÍK J. (1992): Evidence of ground surface temperature changes from two boreholes in the Bohemian Massif. – *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 98, 199–208.
- VANDENBERGHE, J., FRENCH, H. M., GORBUNOV, A., MARCHENKO, S., VELICHKO, A. A., JIN, H., CUI, Z., ZHANG, T., WAN, X. (2014): The Last Permafrost Maximum (LPM) map of the Northern Hemisphere: permafrost extent and mean annual air temperatures, 25–17 ka BP. – *Boreas*, 43, 652–666.

8.2.1.2 Zalednění (ledovcový pokryv)**Popis:**

Během dlouhých glaciálně-interglaciálních cyklů středního a svrchního pleistocénu docházelo k zásadním změnám v rozloze Severoevropského ledovcového štítu. Během svého maximálního rozsahu dosahoval okraj Severoevropského ledovcového štítu až do Střední Evropy včetně okrajových částí dnešního Česka (Nývlt et al., 2011). Obdobně vznikaly v okrajových pohořích, jako jsou Krkonoše, Hrubý Jeseník a Šumava, horské ledovce údolního typu. Současná data o rozsahu zalednění během posledního miliónu let vylučují přítomnost

jakéhokoliv typu zalednění v prostoru lokalit HÚ, a proto je i v budoucnu zalednění těchto lokalit jen málo pravděpodobné (Nývlt a Dobrovolný, 2015; Pačes et al. 2017).

Průnik ledovcových vod, chudých na rozpuštěné látky a bohatých na kyslík v předpolí tajícího ledovce, které by mohly ovlivnit složení podzemních vod (viz kap. 6.7.4), je uvažován zejména ve skandinávském konceptu. Z pohledu Českého masivu je spíše málo pravděpodobný.

Vliv na bezpečnost:

Přímý ledovcový pokryv jako nepravděpodobný fenomén budoucího vývoje bude mít zanedbatelný vliv na dlouhodobou bezpečnost HÚ. Zároveň je však nutné upozornit, že nové studie doložily reaktivaci zlomů až 150 km před čelem ledovcového štítu, jako např. v případě laterálního posunu kvartérních sedimentů podél okrajového sudetského zlomu (Štěpančíková et al. 2022). V případě maximálního zásahu ledovcového štítu do severních okrajových částí Českého masivu je třeba uvažovat i s tímto vlivem.

Dostupná data:

Data o rozsahu zalednění na území Česka existují jako přílohy práce Nývlt et al. (2011) - viz https://www.researchgate.net/publication/288000323_Nyvlt_et_al_2011_QuatGlac_limits

Nejistoty:

Současná data o rozsahu zalednění během posledního miliónu let vylučují přítomnost jakéhokoliv typu zalednění v prostoru lokalit HÚ, a proto je i v budoucnu zalednění těchto lokalit jen málo pravděpodobné (Nývlt a Dobrovolný, 2015).

Reference:

- NÝVLT, D., DOBROVOLNÝ, P. (2015): Klimatická stabilita území – závěrečná zpráva. – Technická zpráva č. 15/2015. 53 s., SÚRAO a ČGS.
- NÝVLT, D., ENGEL, Z., TYRÁČEK, J. (2011): Pleistocene Glaciations of Czechia. – In: Ehlers, J., Gibbard, P. L., Hughes, P. D. (eds): Quaternary Glaciations – Extent and Chronology, A closer look. *Developments in Quaternary Science*, 15, 37–46, Elsevier.
- PAČES T., DOBROVOLNÝ P., HOLEČEK J., NÝVLT D., RUKAVIČKOVÁ L. (2017): Future water-rock interaction in deep repository of spent nuclear fuel. – *Procedia Earth and Planetary Science* 17, 100–103.
- ŠTĚPANČÍKOVÁ P., ROCKWELL T.K., STEMBERK J., RHODES, E.J., HARTVICH, F., LUTTRELL, K., MYERS, M., TÁBOŘÍK, P., ROOD, D.H., WECHSLER, N., NÝVLT, D., ORTUNO, M., HÓK, J. (2022) Acceleration of Late Pleistocene activity of a Central European fault driven by ice loading. – *Earth and Planetary Science Letters* 591, 117596.

8.2.2 Vliv teplého klimatu

Popis:

Klimatické procesy a události zahrnují veškeré minulé, současné a budoucí stavy atmosféry a interakce s aktivním povrchem včetně jejich změn. Klimatický systém je komplexním nelineárním systémem, ve kterém neustále probíhá množství fyzikálních a chemických procesů, proto se mění a vyvíjí na různých časových škálách. V současné klimatické změně

do chodu klimatu vstupuje nový prvek, kterým je člověk a jeho činnost, což zásadním způsobem a do značné míry nepredikovatelně mění přírodní atmosférické procesy a chod klimatu.

Komplexnost klimatického systému a jeho obrovská dynamika neumožňuje jeho přesný popis, natož přesnou budoucí předpověď jeho vývoje. K předpovědi budoucího chodu klimatu jsou používány numerické klimatické modely, a to jak globální (GCM), tak i regionální úrovně (RCM). Avšak vzhledem k nejistotě budoucích antropogenních emisí skleníkových plynů jsou používány tzv. reprezentativní směry vývoje koncentrací (RCP), které jsou nově v Šesté hodnotící zprávě Mezivládního panelu pro změnu klimatu (AR6) posuzovány společně se scénáři socioekonomického vývoje (SSP). Označení RCP vychází z možného rozsahu hodnot radiačního působení Slunce v roce 2100 ve W/m^2 v porovnání s rokem 1750 a představuje různé emisní scénáře. Takovéto modely však lze aplikovat pouze na škálách desetiletí až století, na delších časových škálách překračujících tisíciletí lze modelovat pouze chod hlavních klimatotvorných faktorů, a to obecně spíše na globální úrovni.

Nejkomplexnější obraz projekcí klimatu pro nejbližší století představují výsledky projektu s názvem „The Coupled Model Intercomparison Project Phase 5“ (dále CMIP5) koordinovaného World Climate Research Programme (Taylor et al. 2012). Pro budoucí změnu teplot vzduchu na území Česka lze využít limitní scénáře – nejchladnější (RCP2.6) a nejteplejší (RCP8.5). V případě RCP2.6 se předpokládá postupné snižování intenzity nárůstu teploty vzduchu v zimě i v létě a oproti referenčnímu období 1986–2005 by měla být na konci 21. století teplota vzduchu na území ČR vyšší o 1,5–2,0 °C v obou uvažovaných sezónách. Naproti tomu v případě scénáře RCP8.5 by měl vzestup teploty vzduchu pokračovat stejnou intenzitou jako v současnosti i během příštího století a na jeho konci by průměrná teplota v létě i v zimě měla být o 4,5–5,0 °C vyšší než v současnosti (Nývlt a Dobrovolný 2015).

S růstem globální teploty se předpokládá i nárůst globálních úhrnů srážek, především se však zvýší časoprostorová variabilita srážkového režimu a jeho extremita. Zvýší se rozdíly mezi suchými a vlhkými oblastmi a obdobími. Zřejmě dojde k oslabení oceánické cirkulace, která se však po stabilizování radiačního působení obnoví a poté naopak může zesílit, což bude mít za následek další oteplení v důsledku intenzivnějšího přenosu tepla do vyšších zeměpisných šířek (Collins et al. 2013). Odhady srážek z výstupů CMIP5 jsou však zatíženy značnými nejistotami. Ze simulací pro RCP2.6 a RCP8.5 pro zimní i letní úhrny je patrné, že stejně jako v instrumentálním období nevykazují simulace srážek na území Česka dlouhodobý trend, ale je pro ně charakteristická značná meziroční variabilita. Jestliže podle RCP2.6 se odhady průměrných letních i zimních srážkových úhrnů pro období 2081–2100 statisticky významně neliší od úhrnů referenčního období 1986–2005, pro scénář RCP8.5 se na konci 21. století předpokládají statisticky vyšší úhrny srážek v zimě, a naopak nižší úhrny v létě (Nývlt a Dobrovolný 2015).

Pro časový horizont překračující 1000 let lze predikce budoucího klimatu sestavovat pouze na globální úrovni s přihlédnutím ke specifikům střední Evropy, přičemž vývoj klimatu v konkrétním regionu se může od globálního průměru výrazně lišit. Druhou možností je využití analogií s dřívějšími interglaciálními obdobími. V nejteplejších fázích kvartérních interglaciálů (holstein, MIS 11; eem, MIS 5 e; holocénní hypsitermální podmínky během atlantiku, MIS 1) byly průměrné roční teploty ve Střední Evropě až o 2 °C vyšší, než dnes (Kaspar et al. 2005; Nývlt a Dobrovolný 2015). Hypsitermální klimatické podmínky interglaciálů byly díky posunu řídicích atmosférických tlakových útvarů v prostoru Střední Evropy také významně vlhčejší než

současnost. Průměrné roční srážky byly o 20–30 % vyšší, než v současnosti a pohybovaly se tak v intervalu ~800–900 mm (Hatté a Guiot 2005).

Studium vývoje orbitálních parametrů v minulosti a jejich predikce do budoucna ukázala, že poslední interglaciál (eem, MIS 5e) není z pohledu chodu orbitálních parametrů Země vhodným ekvivalentem budoucího interglaciálního vývoje (Berger et al. 2003). Jako mnohem vhodnější se naopak jeví holstein (MIS 11), který kulminoval před ~405 tisíci let (Loutre, Berger 2003; Yin, Berger 2015). Holstein byl kompozitním, téměř 50 tisíc let trvajícím interglaciálem a v daném období mělo množství insolace dopadající na vyšší zeměpisné šířky severní polokoule významně sníženou amplitudu, což odpovídá budoucímu modelovému průběhu množství insolace v nejbližších více než 50 tisících letech (Berger a Loutre 2002). Během MIS 11 došlo k rozpadu Grónského a Západoantarktického ledovcového štítu (Mercer 1978; Hillenbrand et al. 2009; Raymo, Mitrovica 2012; Reyes et al. 2014), což mohlo znamenat nárůst hladiny světového oceánu o 10–12 m.

Pro širší oblast Evropy a severního Atlantiku ukazují numerické modely letní teploty vzduchu během teplotního optima holsteinu (MIS 11) o 2–3,5 °C vyšší oproti současnosti (Kleinen et al. 2014; Robinson et al. 2017), naproti tomu zimní teploty nebyly oproti preindustriální současnosti významně odlišné nebo byly naopak i mírně nižší (Kleinen et al. 2014). Holstein (MIS 11) byl i vlhčím interglaciálem, což jasně dokládají izotopické výzkumy terestrických karbonátů z tohoto období z různých částí Evropy (Berstad et al. 2002; Dabkowski, Limondin-Lozouet in press). Modely vývoje srážek ukazují během vrcholu holsteinského interglaciálu až o 100 mm ročních srážek vyšší hodnoty oproti preindustriální současnosti, avšak přesnější hodnoty nelze pro MIS 11 stanovit díky nedostatku kvalitních datovaných záznamů pro kalibraci a verifikaci modelů (Kleinen et al. 2014). Z tohoto pohledu je možné budoucí oteplení a zvlhčení klimatu odpovídající vrcholně interglaciálními podmínkám považovat za relevantní pro budoucí vývoj klimatu v řádu vyšších desítek tisíc let, protože pokud koncentrace skleníkových plynů v troposféře neklesnou na preindustriální úroveň (v případě CO₂ pod 280 ppmv) v nejbližších téměř 100 tisících letech budou panovat interglaciální podmínky (Loutre 2003; Nývlt a Dobrovolný 2015; Pačes et al. 2017).

Vliv na bezpečnost:

Klimatická změna má a bude mít na různých časových škálách významný vliv na dlouhodobou bezpečnost HÚ. Zvýšené teploty a především srážky typické pro teplé klima interglaciálů budou mít vliv na změnu infiltrace povrchových vod do hlubších kolektorů a tím pádem i na změnu proudění podzemních vod (viz kap. 6.6 a 7.2). Změny v režimu podzemního proudění mohou ovlivnit i transport radionuklidů z úložiště do míst drenáže podzemních vod. Teplé klima bude mít i vliv na zintenzivnění povrchového chemického zvětrávání (kap. 7.4.2), které díky vyšším srážkám může ovlivňovat hlubší partie půdy a horninového prostředí. Zároveň očekávaná větší rozkolísanost klimatu může vést k dlouhodobějším obdobím sucha střídaným obdobími intenzivních srážek, které mohou významně ovlivnit povrchové podmínky HÚ.

Dostupná data:

Portál ČHMÚ, historicka-data, pocasi, zmena-klimatu: [<https://www.chmi.cz/historicka-data/pocasi/zmena-klimatu/zakladni-informace#>]

CzechGlobe, klimatickazmena.cz: [<https://www.klimatickazmena.cz/cs/>]

Modelové výstupy budoucího chodu klimatu a diskuze vývoje orbitální parametrů na dlouhých časových škálách jsou dostupné v práci Nývlt a Dobrovolný (2015).

Nejistoty:

Největší nejistotou budoucí změny klimatu je chování lidské společnosti. Tato nejistota je jen těžko predikovatelná, proto se pro modelování budoucího vývoje klimatu využívají tzv. Reprezentativní směry vývoje koncentrací (RCP) skleníkových plynů, které jsou nově v Šesté hodnotící zprávě Mezivládního panelu pro změnu klimatu (AR6) posuzovány společně se scénáři socioekonomického vývoje (SSP). Označení RCP vychází z možného rozsahu hodnot radiačního působení v roce 2100 ve W/m^2 v porovnání s rokem 1750.

Pro časový horizont překračující 1000 let lze predikce budoucího klimatu sestavovat pouze na globální úrovni s přihlédnutím ke specifikům střední Evropy, přičemž vývoj klimatu v konkrétním regionu se může od globálního průměru výrazně lišit. Druhou možností je využití analogií s dřívějšími interglaciálními obdobími. Zde je největším limitem přesnost geologických a paleoklimatologických dat pro daná časová období.

Reference:

- BERGER A., LOUTRE M. F. (2002): An exceptionally long interglacial ahead? – *Science*, 297, 1287–1288.
- BERGER A., LOUTRE M. F., CRUCIFIX M. (2003): The earth's climate in the next hundred thousand years. – *Surveys of Geophysics*, 24, 117–138.
- BERSTAD I. M., LUNDBERG J., LAURITZEN S. E., LINGE, H. C. (2002): Comparison of the Climate during Marine Isotope Stage 9 and 11 Inferred from a Speleothem Isotope Record from Northern Norway. – *Quaternary Research*, 58, 361–371.
- COLLINS M., KNUTTI R., ARBLASTER J. M., DUFRESNE J-L., FICHEFET T., FRIEDLINGSTEIN P., GAO X., GUTOWSKI W. J., JOHNS T., KRINNER G., SHONGWE M., TEBALDI C., WEAVER A. J., WEHNER M. (2013): Long term climate change: projections, commitment and irreversibility. – In: Stocker T F, Qin D, Plattner G-K, Tignor M, Allen S K, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley P M (eds). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 1029–1136.
- DABKOWSKI J., LIMONDIN-LOZOUET N. (in press): Comparison of temperature and humidity during MIS 11 and MIS 5e interglacials with the Holocene using stable isotopes in tufa deposits from northern France. – *Quaternary Research*, doi:10.1017/qua.2021.66.
- HATTÉ C., GUIOT J. (2005): Palaeoprecipitation reconstruction by inverse modelling using the isotopic signal of loess organic matter: application to the Nussloch loess sequence (Rhine Valley, Germany). – *Climate Dynamics*, 25, 315–327.
- HILLENBRAND C. D., KUHN G., FREDERICHS T. (2009): Record of a Mid-Pleistocene depositional anomaly in West Antarctic continental margin sediments: an indicator for icesheet collapse? – *Quaternary Science Reviews*, 28, 1147–1159.
- IPCC (2021): *Climate Change 2021. The Physical Science Basis. Working Group I contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. – IPCC, WMO, UNEP.

- KASPAR F., KÜHL N., CUBASCH U., LITT T. (2005): A model-data comparison of European temperatures in the Eemian interglacial. – *Geophysical Research Letters*, 32, L11703.
- KLEINEN T., HILDEBRANDT S., PRANGE M., RACHMAYANI R., MÜLLER S., BEZRUKOVA E., BROVKIN V., TARASOV P. E. (2014): The climate and vegetation of Marine Isotope Stage 11 – Model results and proxy-based reconstructions at global and regional scale. – *Quaternary International*, 348, 247–265.
- LOUTRE M. F. (2003): Clues from MIS 11 to predict the future climate—a modelling point of view. – *Earth and Planetary Science Letters*, 212, 213–224.
- LOUTRE M. F., BERGER A. (2003): Marine Isotope Stage 11 as an analogue for the present interglacial. – *Global and Planetary Change*, 36, 209–217.
- MERCER J. H. (1978): West Antarctic Ice Sheet and CO₂ greenhouse effect: a threat of disaster. – *Nature*, 271, 321–325.
- NÝVLT D., DOBROVOLNÝ, P. (2015): Klimatická stabilita území - závěrečná zpráva. Technická zpráva č. 15/2015. 53 s., SÚRAO a ČGS.
- PAČES T., DOBROVOLNÝ P., HOLEČEK J., NÝVLT D., RUKAVIČKOVÁ L. (2017): Future water-rock interaction in deep repository of spent nuclear fuel. – *Procedia Earth and Planetary Science*, 17, 100–103.
- RAYMO M. E., MITROVICA X. (2012): Collapse of polar ice sheets during the stage 11 interglacial. – *Nature*, 483, 453–456.
- REYES A. V., CARLSON A. E., BEARD B. L., HATFIELD R. G., STONER J. S., WINSOR K., WELKE B., ULLMAN D. J. (2014): South Greenland ice-sheet collapse during Marine Isotope Stage 11. – *Nature*, 510, 525–528.
- ROBINSON A., ALVAREZ-SOLAS J., CALOV R., GANOPOLSKI A., MONTOYA M. (2017): MIS-11 duration key to disappearance of the Greenland ice sheet. – *Nature Communications*, 8, 16008.
- TAYLOR K. E., STOUFFER R. J., MEEHL G. A. (2012): An overview of CMIP5 and the experiment design. – *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93, 485–498.
- YIN Q., BERGER A. (2015): Interglacial analogues of the Holocene and its natural near future. – *Quaternary Science Reviews*, 120, 28–46.

8.2.2.1 Subtropické klima

Popis:

V běžně zavedené Köppen-Geigerově klasifikaci podnebí (Köppen, Geiger 1936), ze které vychází i česká klasifikace Quittova (Quitt 1971), není Subtropické klima definováno. Je naopak definováno v genetické Alisovově klasifikaci podnebí, ta se však ve světě hojněji nepoužívá. Běžně jsou za subtropy považovány oblasti okolo obratníků nebo obecněji na severní polokouli nejčastěji mezi 30° a 45° s. š., kde dominuje suché podnebí (Bw, Bs). V Köppen-Geigerově klasifikaci je definováno vlhké subtropické podnebí (Cfa), které je typické např. pro východní polovinu Spojených států amerických, sever Itálie, či Chorvatsko, mimo Evropu pak pro jižní Čínu, Japonsko nebo východní Argentinu, Uruguay a jižní Brazílii. Tato

oblast je typická letními vpády teplého tropického vzduchu významně nasyceného vlhkostí, což vede k častým letním bouřím s dostatečnými srážkami a léto je tak nejvlhčejším obdobím roku. Modely budoucího vývoje klimatu však spíše naznačují, že se na území Česka (Tolasz ed. 2007) spíše rozšíří i do vyšších nadmořských výšek mírné oceánické podnebí (Cfb) typické pro většinu západní Evropy, než vlhké subtropické podnebí (Cfa) nacházející se nyní jižně od Alp.

Vliv na bezpečnost:

Případný málo pravděpodobný výskyt subtropického klimatu by měl na různých časových škálách vliv na dlouhodobou bezpečnost HÚ. Se subtropickým klimatem je spojená především extremita srážkového režimu, která způsobuje dlouhodobější období sucha během chladné poloviny roku střídaná letními obdobími intenzivních srážek, které mohou významně ovlivnit povrchové podmínky HÚ, ale též infiltraci povrchové vody a ovlivňovat tak proudění podzemní vody. Výskyt subtropického klimatu by mohl být spojený i se zvýšeným eolickým přenosem prachu během delších období sucha.

Dostupná data:

Modelové výstupy budoucího chodu klimatu a diskuze vývoje orbitální parametrů na dlouhých časových škálách jsou dostupné v práci Nývlt a Dobrovolný (2015).

Nejistoty:

Výskyt subtropického klimatu je jako alternativní scénář málo pravděpodobný. Mnohem pravděpodobnější se dle modelů budoucího vývoje klimatu zdá významnější rozšíření mírného oceánického podnebí (Cfb) typického pro většinu západní Evropy, než vlhkého subtropického podnebí (Cfa) nacházejícího se nyní jižně od Alp.

Reference:

KÖPPEN W., GEIGER R. (1936): Das geographische System der Klimate. Handbuch der Klimatologie, Band 1, Teil C, Berlin.

NÝVLT D. A DOBROVOLNÝ, P. (2015): Klimatická stabilita území – závěrečná zpráva. – Technická zpráva č. 15/2015. 53 s., SÚRAO a ČGS.

QUITT E. (1971): Klimatické oblasti Československa. Studia Geographica, 16, 73 s., Brno.

TOLASZ R., ED. (2007): Atlas podnebí Česka. 255 s., Český hydrometeorologický ústav – Univerzita Palackého v Olomouci.

8.2.2.2 Dezertifikace jako zdroj prachových částic a úlomků hornin

Popis:

K předpovědi budoucího chodu klimatu jsou používány numerické klimatické modely, a to jak globální (GCM), tak i regionální úrovně (RCM). Takovéto modely však lze aplikovat pouze na škálách desetiletí až století, na delších časových škálách překračujících tisíciletí lze modelovat pouze chod hlavních klimatotvorných faktorů, a to obecně spíše na globální úrovni. Nejkomplexnější obraz projekcí klimatu pro nejbližší století představují výsledky projektu s názvem „The Coupled Model Intercomparison Project Phase 5“ (dále CMIP5) koordinovaného World Climate Research Programme (Taylor et al. 2012). Pro budoucí změnu

teplot vzduchu na území Česka lze využít limitní scénáře – nejchladnější (RCP2.6) a nejteplejší (RCP8.5). S růstem globální teploty se předpokládá i nárůst globálních úhrnů srážek, především se však zvýší časoprostorová variabilita srážkového režimu a jeho extremity. Zvýší se rozdíly mezi suchými a vlhkými oblastmi a obdobími. Zřejmě dojde k oslabení oceánické cirkulace, která se však po stabilizování radičního působení obnoví a poté naopak může zesílit, což bude mít za následek další oteplení v důsledku intenzivnějšího přenosu tepla do vyšších zeměpisných šířek (Collins et al. 2013). Odhady srážek z výstupů CMIP5 jsou však zatíženy značnými nejistotami. Ze simulací pro RCP2.6 a RCP8.5 pro zimní i letní úhrny je patrné, že stejně jako v instrumentálním období nevykazují simulace srážek na území Česka dlouhodobý trend, ale je pro ně charakteristická značná meziroční variabilita. Jestliže podle RCP2.6 se odhady průměrných letních i zimních srážkových úhrnů pro období 2081–2100 statisticky významně neliší od úhrnů referenčního období 1986–2005, pro scénář RCP8.5 se na konci 21. století předpokládají statisticky vyšší úhrny srážek v zimě, a naopak nižší úhrny v létě (Nývlt a Dobrovolný 2015). Z výše uvedeného je patrné, že v souvislosti s probíhající klimatickou změnou nedojde k významnému dlouhodobému vysušení klimatu, které by mohlo vést v prostoru střední Evropy k dezertifikaci a k transportu prachových částic a úlomků hornin.

Pro časový horizont překračující 1000 let lze predikce budoucího klimatu sestavovat pouze na globální úrovni s přihlédnutím ke specifikům střední Evropy, přičemž vývoj klimatu v konkrétním regionu se může od globálního průměru výrazně lišit. Druhou možností je využití analogií s dřívějšími vrcholně glaciálními obdobími, kdy docházelo k maximálnímu vysušení klimatu. Díky minimálnímu vegetačnímu krytu a tím pádem zesílenému přípovrchovému proudění větru docházelo v těchto obdobích k vysušení povrchu, deflaci, transportu a ukládání prachové a písčité frakce. To je v prostoru střední Evropy doloženo akumulacemi spraší z vrcholných glaciálů a vátých písků z pozdního glaciálu (Holuša et al. in review). Průměrné roční srážky ve středoevropském prostoru byly o 50–60 % nižší, než dnes a pohybovaly se v rozpětí ~250–350 mm (Hatté a Guiot 2005). Podmínky lze analogicky srovnávat s dnešními polárními pouštěmi ať již oblastí Vysoké Arktidy s vysokou kontinentalitou nebo okrajových částí Antarktidy. Zdroje prachu ve vysokých zeměpisných šířkách jsou dnes známy, i když jejich souhrn není zdaleka dostatečně prozkoumán (Meinander et al. 2021). Transport prachu je však typický i pro déle trvající suchá období i v rámci humidnějších oblastí vysokých zeměpisných šířek, jak je dobře patrné na příkladu Islandu (Arnalds et al. 2016; Dagsson-Waldhauserova, Meinander 2019).

Vliv na bezpečnost:

Případné významné vysušení klimatu a desertifikace včetně větrného transportu částic bude mít na různých časových škálách vliv na dlouhodobou bezpečnost HÚ. Tento scénář je však málo pravděpodobný.

Dostupná data:

Zdroje prachu ve vysokých zeměpisných šířkách jsou zmapovány v práci Meinander et al. (2021).

Nejistoty:

Desertifikace jako zdroj prachových částic a úlomků hornin může nastat pouze v alternativním scénáři ochlazení a vzniku periglaciálních podmínek srovnatelných s vrcholnými fázemi kvartérních glaciálů. Modely budoucího vývoje insolace a koncentraci CO₂ ukazují, že pro

nástup dalšího glaciálu je nezbytné, aby hodnoty obou uvažovaných klimatotvorných faktorů klesaly. V případě koncentrací CO₂ na přeindustriální úroveň (280 ppm). V opačném případě na severní polokouli přetrvávají v nejbližších 100 tisících letech podmínky interglaciálu (Berger, Loutre 2002) a periglaciální podmínky nenastanou.

Reference:

- ARNALDS O., DAGSSON-WALDHAUSEROVA P., OLAFSSON H. (2016): The Icelandic volcanic aeolian environment: Processes and impacts — A review. *Aeolian Research*, 20, 176-195.
- BERGER A., LOUTRE M. F. (2002): An exceptionally long interglacial ahead? – *Science*, 297, 1287–1288.
- COLLINS M., KNUTTI R., ARBLASTER J. M., DUFRESNE J-L., FICHEFET T., FRIEDLINGSTEIN P., GAO X., GUTOWSKI W. J., JOHNS T., KRINNER G., SHONGWE M., TEBALDI C., WEAVER A. J., WEHNER M. (2013): Long term climate change: projections, commitment and irreversibility. – In: Stocker T F, Qin D, Plattner G-K, Tignor M, Allen S K, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley P M (eds). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 1029–1136.
- DAGSSON-WALDHAUSEROVA P., MEINANDER O. (2019): Editorial: Atmosphere - cryosphere interaction in the Arctic, at high latitudes and mountains with focus on transport, deposition and effects of dust, black carbon, and other aerosols. *Front. Earth Sci.*, <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00337>.
- HATTÉ C., GUIOT J. (2005): Palaeoprecipitation reconstruction by inverse modelling using the isotopic signal of loess organic matter: application to the Nussloch loess sequence (Rhine Valley, Germany). *Climate Dynamics*, 25, 315–327.
- HOLUŠA, J., NÝVLT, D., WORONKO, B., MATĚJKA, M., STUHLÍK, R. (in review): Environmental factors controlling the Last Glacial multi-phase development of the Moravian Sahara dune field, Lower Moravian Basin, Central Europe. *Geomorphology*, in review.
- MEINANDER O. et al. (2021): Newly identified climatically and environmentally significant high latitude dust sources. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussion*, <https://doi.org/10.5194/acp-2021-963>
- NÝVLT D. A DOBROVOLNÝ, P. (2015): Klimatická stabilita území – závěrečná zpráva. Technická zpráva č. 15/2015. 53 s., SÚRAO a ČGS.
- TAYLOR K.E., STOUFFER R.J., MEEHL G.A. (2012): An overview of CMIP5 and the experiment design. – *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93, 485–498.

8.3 Události v důsledku činnosti člověka

8.3.1 Realizace hlubokého vrtu

Popis:

Proudění podzemní vody v hlubokém horizontu hydrogeologického masivu v kandidátních lokalitách je v současné době bez významného (přímého) vlivu člověka. Průzkum i výstavba HÚ je projektována tak, aby došlo k co nejmenšímu porušení geologické bariéry (její účinnosti) vlivem hlubokých vrtných prací za účelem průzkumu nebo monitoringu. Nelze ale zcela vyloučit realizaci hlubokých a velmi hlubokých vrtů v budoucnosti. Účelem realizace takových vrtů by mohlo být využití podzemní vody za účelem např. získání specifického chemického typu vod hlubokého oběhu. Dalším, pravděpodobnějším využitím hlubokých vrtů je potřeba získání udržitelných energetických zdrojů. Využitím geotermální energie prostřednictvím hlubokých a velmi hlubokých vrtů se v ČR v současnosti zabývá např. projekt TK02010092 (nositelem je ČGS), jehož cílem je analyzovat potenciál geotermální energie v ČR v hloubkách přibližně 400 až 5000 m. V Litoměřicích byl již realizován geotermální testovací vrt hluboký 2,1 km a lze předpokládat, že v budoucnosti bude podobných projektů v ČR přibývat. Vzhledem k extrémně dlouhodobým nárokům na bezpečnost v případě HÚ nelze vyloučit ani další možné účely využití, které budou vycházet z budoucích poznatků a technologických možností.

Vliv na bezpečnost:

Vrtný stvol jakéhokoli hlubokého díla, bez ohledu na technologii jeho zhotovení a výstroj, bude v horninovém prostředí představovat potenciální hydraulicky vodivou, a tedy i preferenční transportní cestu. Stvol vrtu může potenciálně propojit i jinak zcela hydraulicky izolované dílčí oblasti masivu s povrchem, a tak zvýšit riziko neúčinnosti geologické bariéry. Na potenciální riziko propojení hlubokého horizontu s podzemní vodou potenciálně kontaminovanou z prostoru HÚ a terénu bude mít vliv především vzájemná poloha vrtného díla a HÚ a také hloubka vrtu. Potenciální riziko vytvoření konduktivního klastru v existující puklinové síti poroste výrazně s počtem vrtů koncentrovaných v prostorově menší oblasti.

V případě čerpání podzemní vody z vrtu bude hluboký vrt přestavovat drenážní bázi a hydraulická deprese, jejíž dosah bude dán lokální konektivitou puklinové sítě (v prostředí tektonické zóny může být dosah deprese velký), bude ovlivňovat směry a rychlosti proudění podzemní vody v masivu. Prostřednictvím odběru vody se potenciální kontaminace může z úrovně úložiště dostat přímo do biosféry a ke konečnému příjemci dávky.

Dostupná data:

Tepelné parametry hornin, tepelný tok a teplota horninového prostředí, kandidátních lokalit HÚ jsou hodnoceny v práci Dědečka P. et al (2020). Množství podzemní vody v hluboké části masivu kandidátních lokalit bylo na základě dostupných informací orientačně vyčísleno matematickými hydrogeologickými modely. Metodika zpracování modelů je uvedena v Uhlík et al., 2018. Bilance podzemní vody v hluboké části masivu pro kandidátní lokality HÚ je vyčíslena v pasportech modelů (Baier et al., 2020a, b; Jankovec et al. 2020 a Uhlík et al., 2020).

Nejistoty:

V kandidátních lokalitách neexistují data z hlubokého vrtného průzkumu. V dlouhodobém horizontu nelze zcela předvídat využití vodních a energetických zdrojů kandidátních lokalit. Vzhledem k předpokládaným bezpečnostním opatřením je ale riziko malé.

Reference:

DĚDEČEK P., UXA T., HOLEČEK J. (2020): Geotermické zhodnocení potenciálních lokalit HÚ na základě dostupných dat. – MS SÚRAO, TZ 486/2020

UHLÍK J., ČERNÝ M., BAIER J., MILICKÝ M., POLÁK M., GVOŽDÍK L., KRÁLOVCOVÁ J., GRECKÁ M., RUKAVIČKOVÁ L. (2018): Detailní hydrogeologické modely lokalit. – MS SÚRAO, TZ 323/2018, Praha.

BAIER, J., JANKOVEC, J., ČERNÝ, M., GVOŽDÍK, L., MILICKÝ, M., POLÁK, M., UHLÍK, J. (2020a): Hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště, pasport aktualizovaného detailního modelu – lokalita Březový potok, MS SÚRAO, TZ 470/2020, 26 str.

BAIER, J., JANKOVEC, J., ČERNÝ, M., GVOŽDÍK, L., MILICKÝ, M., POLÁK, M., UHLÍK, J. (2020b): Hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště, pasport aktualizovaného detailního modelu – lokalita Hrádek, MS SÚRAO, TZ 469/2020, 25 str.

JANKOVEC, J., BAIER, J., ČERNÝ, M., GVOŽDÍK, L., MILICKÝ, M., POLÁK, M., UHLÍK, J. (2020): Hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště, pasport aktualizovaného detailního modelu – lokalita ETE-jih, MS SÚRAO, TZ 474/2020, 24 str.

UHLÍK, J., GVOŽDÍK, L., BAIER, J., MILICKÝ, M., JANKOVEC, J., POLÁK, M. (2020): Hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště, pasport aktualizovaného detailního modelu – lokalita Horka, MS SÚRAO, TZ 476/2020, 25 str.

8.3.2 Antropogenní propady a deformace povrchu území

Popis:

Propady, pokles a deformace povrchu území je soubor geodynamických jevů, které mohou být způsobeny přírodními procesy. Příkladem jsou krasové nebo pseudokrasové jevy související s podpovrchovou erozí v karbonátových nebo nezpevněných až slabě zpevněných sedimentech, deformace terénu v důsledku svahových pohybů a změny terénu jako výsledek zemětřesení. V podmínkách Českého Masivu jsou nejčastější deformace povrchu podmíněny antropogenně, zejména v důsledku důlní a těžební činnosti. Tento fenomén je vázán na oblasti s aktivní, nebo i historickou podpovrchovou těžbou a poddolováním dané lokality. V důsledku poddolování může dojít k narušení stability povrchu, což má za následek vznik poklesových struktur a propadů. K deformacím povrchu může také dojít v okolí vlhkých povrchových těžeben, zejména v prostředí sedimentárních hornin (například v důsledku zaklesnutí hladiny podzemní vody).

Na lokalitě Hrádek jsou evidována opuštěná důlní díla s poddolovaným územím (Havlová et al. 2020 g), na ostatních lokalitách poddolovaná území nejsou evidována a nachází se zde pouze povrchové těžební prostory.

Vliv na bezpečnost:

Základními problémy, souvisejícími s podpovrchovou těžbou, které se mohou v budoucnu projevit na povrchu země, jsou porušení či snížení stability povrchu a únosnosti území, vznik větších propadů a deformací na zemském povrchu vázaných na důlní činnost. Důlní činnost může mít vliv na lokální hydrologické a hydrogeologické podmínky, může dojít ke zvýšení sekundární propustnosti poddolovaných území a možnost výskytu silně mineralizovaných důlních vod. V důsledku poklesu terénu může dojít ke vzniku lokálních depresí s drenážním účinkem.

Dostupná data:

Informace o přítomnosti opuštěných nebo starých důlních děl či průzkumných objektů včetně mapy poddolovaných území jsou uloženy v archivu České geologické služby. Zákresy poddolovaných území jsou zobrazeny jako:

1. body (jednotlivá důlní díla - např. šachta, krátká štola nebo štola s neznámým průběhem a rozsahem, chodbice nebo větší plochy, v rámci, kterých leží důlní díla, jejichž přesnou polohu a rozsah nelze z použitých podkladů přesněji určit,
2. plochy se známým nebo předpokládaným výskytem hlubinných důlních děl, vzniklých za účelem těžby nebo průzkumu nerostných surovin

Data o zjištěných poddolovaných území na území lokalit jsou také souhrnně uvedena v hodnocení kandidátních lokalit (Havlová et al 2020 a, e, f, g).

Nejistoty:

Nejsou. Na lokalitě Hrádek jsou evidována opuštěná důlní díla s poddolovaným územím (Havlová et al. 2020 g), na ostatních lokalitách poddolovaná území nejsou evidována a nachází se zde pouze povrchové těžební prostory,

Doporučení:

Analýzou a pasportizací důlních děl lze určit vliv zásadních faktorů, které ovlivňují stav povrchu po hlubinném dobývání/těžbě, ať už historické, nebo i aktivní. Jedná se především o mocnost nadloží, mechanické vlastnosti nadložních hornin, úložné poměry ložiska, mocnost dobývané sloje/ložiska, způsob dobývání, plošný rozsah dobývání a časový odstup od ukončení těžební činnosti. Pro zjištění přítomnosti dosud nezjištěných antropogenně podmíněných deformací povrchu lze aplikovat kombinaci terénního průzkumu s analýzou reliéfu pomocí metod DPZ. Případné reaktivované deformace povrchu u již zjištěných důlních děl lze také monitorovat pomocí metod DPZ.

Reference:

HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., BAIER, J., MILICKÝ, M., POLÁK, M., BUKOVSKÁ, Z., ČERNÝ, M., DUŠEK, K., FIFERNOVÁ, M., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., HOLEČEK J., JELÉNEK, J., JANKOVEC, J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., KUNCEOVÁ, E., PETYNYIAK, O., RAPPRIK, V., RUKAVIČKOVÁ, L., SOEJONO, I., ŠVAGERA, O., UHLÍK, J., VOJTĚCHOVÁ, H., ŽÁČKOVÁ, E. (2020a): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Březový potok. MS SÚRAO, TZ 447/2020, 62 str.

- HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., JANKOVEC, J., UHLÍK, J., ČERNÝ, M., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., BAIER, J., DUŠEK, K., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., HEJTMÁNKOVÁ, P., HOLEČEK J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., MILICKÝ, M., NAHODILOVÁ, R., PACHEROVÁ, P., PETYNIÁK, O., PEŘESTÝ, V., RAPPRIČH, V., ŘIHOŠEK, J., RUKAVIČKOVÁ, L., ŠVAGERA, O., POLÁK, M., VOJTĚCHOVÁ, H., ŽÁČKOVÁ, E. (2020e): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Janoch (ETE-jih). MS SÚRAO, TZ 451/2020, 63 str.
- HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., UHLÍK, J., JANKOVEC, J., MILICKÝ, M., BAIER, J., BURIÁNEK, D., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ, B., DUŠEK, K., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., GRUNDLOCH, J., HOLEČEK J., JELÍNEK, J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., KUNCEOVÁ, E., PETYNIÁK, O., POLÁK, M., RAPPRIČH, V., RUKAVIČKOVÁ, L., ŠVAGERA, O., VOJTĚCHOVÁ, H. (2020f): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Horka. MS SÚRAO, TZ 452/2020, 63 str.
- HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ, J., MIXA, P., HROCH, T., ŠTĚDRÁ, V., BAIER, J., MILICKÝ, M., BUKOVSKÁ, Z., ČERNÝ, M., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ, B., DUŠEK, K., FRANĚK, J., GVOŽDÍK, L., HOLEČEK J., JANKOVEC, J., JELÍNEK, J., KACHLÍKOVÁ, R., KUČERA, R., KUNCEOVÁ, E., PETYNIÁK, O., POLÁK, M., RAPPRIČH, V., RUKAVIČKOVÁ, L., ŠVAGERA, O., URÍK, J., VOJTĚCHOVÁ, H., ŽÁČKOVÁ, E. (2020g): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Hrádek. MS SÚRAO, 453/2020, 63 str.

9 Zastoupení procesů v různých obdobích vývoje úložiště

Vývoj podmínek úložišti probíhá různými obdobími. Z pohledu horninového prostředí jsou definovány změny okrajových podmínek, důležitých pro rozvoj procesů v horninovém prostředí. Tím nejdůležitějším zásahem je výstavba a provoz úložiště, které s sebou nesou změnu počátečních vlastností a další ovlivnění daná např. zvýšenou teplotou nebo redistribucí napětí v hornině.

Tab. 4 Zastoupení procesů v jednotlivých fázích vývoje úložiště

| | Období výstavby úložiště | Období provozu a uzavírání úložiště | Období zvýšené teploty v důsledku vývoje tepla z VJP | Období po poklesu na původní hodnoty | Po prvních událostech souvisejících s externími vlivy (změna klimatu, zemětřesení) |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| Termální procesy | | | | | |
| Procesy přenosu tepla (kondukce, advekce, konvekce, radiace) | Ano | Ano | Ano | Ano, omezeně | Ano |
| Hydraulické procesy | | | | | |
| Pukliny (rozpuštění a precipitace minerálů na puklinách, hydrotermální alterace na puklině) | Ano, hlavně v blízkém okolí HÚ | Ano, hlavně v blízkém okolí HÚ | Ano, významně | Ano | Ano |
| Změna proudění podzemní vody v puklinách vlivem geologických procesů | Ano, vnější vliv s nízkou pravděpodobností | Ano, vnější vliv s nízkou pravděpodobností | Ano, vnější vliv s nízkou pravděpodobností | Ano, vnější vliv s nízkou pravděpodobností | Ano |
| Změna proudění podzemní vody vlivem klimatických změn | Ano, vnější vliv | Ano, vnější vliv | Ano, vnější vliv | Ano, vnější vliv | Ano |
| Změna proudění podzemní vody vlivem činnosti člověka | Ano - význaný zásah do systému proudění | Ano, vnější vliv | Ano, vnější vliv | Ano, vnější vliv | Ano, vnější vliv |
| Mechanické procesy | | | | | |
| Tektonika (reaktivace křehkých struktur - pohyby na zlomech, četnost, velikost křehkých struktur) | Ano, hlavně v blízkém okolí HÚ | Ne | Ano, omezeně | Ne | Ano, v případě zemětřesení, vulk. činnosti |
| Pomalé plastické deformace (plastický tok krystalinických hornin, gravitační creep v přípovrchové zvětralé vrstvě a málo zpevněných sedimentech) | Ano, omezeně, vznik pomalé povrchové plastické deformace při sesedání | Ano, omezeně, vznik pomalé povrchové plastické deformace při sesedání | Ne | Ne | Ano, povrchové gravitační pohyby při zemětřesení nebo při pohybech na zlomech |
| Napěťový stav horninového masivu a jeho změny (napětí v hornině (diferenciální i litostatické napětí)) | Ano | Ano | Ano | Ano, změny nastanou jen v důsledku jiných procesů (např. eroze) | Ano |
| Seismická stabilita území a její vývoj | Ano, vnější vliv s nízkou pravděpodobností | Ano, vnější vliv s nízkou pravděpodobností | Ano, vnější vliv s nízkou pravděpodobností | Ano, vnější vliv s nízkou pravděpodobností | Ano |

| | Období výstavby úložiště | Období provozu a uzavírání úložiště | Období zvýšené teploty v důsledku vývoje tepla z VJP | Období po poklesu na původní hodnoty | Po prvních událostech souvisejících s externími vlivy (změna klimatu, zemětřesení) |
|-------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| Chemické procesy | | | | | |
| Metamorfóza | Ne | Ne | Ne | Ne | Ano, omezeně, kontaktní |
| Zvětrávání, eroze, zpětná eroze, denudace | Ano | Ano | Ano | Ano | Ano |
| Chemické a mineralogické změny (hornina) | Ano | Ano | Ano | Ano | Ano |
| Interakce hornina - podzemní voda | Ano | Ano | Ano | Ano | Ano |
| Srážení a spolusrážení | Ano (pro látky z roztoku, např. sekundární minerály) | Ano (pro látky z roztoku, např. sekundární minerály) | Ano (limitovaně i spolusrážení pro radionuklidy) | Ano (limitovaně i spolusrážení pro radionuklidy) | Ano (limitovaně i spolusrážení pro radionuklidy) |
| Chemické rovnováhy a kinetiky | Ano | Ano | Ano | Ano | Ano |
| Speciace a rozpustnost (radionuklidů) | Ne | Ne | Ano; po porušení UOS | Ano; po porušení UOS | Ano; po porušení UOS |
| Mikrobiální činnost | Ano | Ano | Ano; asi jiná společenstva než v prvních fázích vývoje | Ano; asi jiná společenstva než v prvních fázích vývoje | Ano; asi jiná společenstva než v prvních fázích vývoje |
| Transportní procesy | | | | | |
| Transportní procesy v kapalné fázi | Ne | Ne | Ano; po porušení UOS | Ano | Ano |
| Adektivní transport | Ne | Ne | Ano; po porušení UOS | Ano | Ano |
| Difúze | Ne | Ne | Ano; po porušení UOS | Ano | Ano |
| Sorpce | Ne | Ne | Ano; po porušení UOS | Ano | Ano |
| Disperze | Ne | Ne | Ano; po porušení UOS | Ano | Ano |
| Transport koloidů | Ano | Ano | Ano | Ano | Ano |
| Transportní procesy v pevné fázi | Ne | Ne | Ano; po porušení UOS | Ano; po porušení UOS | Ano; po porušení UOS |
| Transportní procesy v plynné fázi | Ne | Ne | Ano; po porušení UOS | Ano; po porušení UOS | Ano; po porušení UOS |
| Procesy způsobené výstavbou a provozem úložiště | | | | | |
| Tepelné ovlivnění prostředí provozem úložiště | Ne | Ano | Ano | Ne | Ne |
| Mechanické ovlivnění horninového prostředí výstavbou úložiště (vznik zón EDZ) | Ano | Ne | Ne | Ne | Ne |
| Ovlivnění hydraulických poměrů výstavbou HÚ | Ano, vnější vliv | Ano, vnější vliv | Ano, vnější vliv | Ano, vnější vliv | Ano, vnější vliv nezávislý na stavu systému |
| Ovlivnění chemických poměrů výstavbou, provozem a uzavřením HÚ | Ano | Ano | Ano | Ano | Ano |

10 Dostupnost a relevance stávajících modelů využívaných pro predikci a modelování procesů v HÚ

Tabulky, uvedené v této kapitole, uvádí souhrnně procesy a události, které byly definovány v průběhu prací. Ke každému procesu je uvedeno, zda existuje výpočet nebo model využitelný pro predikci vývoje.

Tab. 5 Modelování procesů v horninovém prostředí – dostupnost modelovacích nástrojů

| | Dostupnost modelovacího nástroje | Poznámka |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Termální procesy | | |
| Procesy přenosu tepla (kondukce, advekce, konvekce, radiace) | Termální procesy umožňuje modelovat větší množství standartních sw. nástrojů, často sdruženě s dalšími procesy (mechanické, hydraulické, případně chemické procesy). V ČR se v souvislosti s HÚ nebo obdobnými úlohami využívají např. Comsol nebo FeFlow, dále sw. 123Dflow vyvíjený na TUL v Liberci. Obecně lze např. termální konvektivní proudění modelovat od měřítek zemského pláště až po menší měřítko | https://www.comsol.com/ , https://www.mikepoweredbydhi.com/products/fefflow , https://flow.nti.tul.cz/packages/2.2.1_release/doxygen/ SCHMELING H. (2002): Numerisches Modell von Mantelkonvektion Quelle, Frankfurt University. |
| Hydraulické procesy | | |
| Pukliny (rozpuštění a precipitace minerálů na puklinách, hydrotermální alterace na puklině) | Modelování otevřeného systému s přebytkem vody za teplot vyšších desítek až nižších stovek °C, s procesy rozpouštění a precipitace za zvýšených teplot je obecně problematické, pro termodynamické modelování často chybí řada důležitých experimentálních konstant pro běžné minerální fáze. Modelování lze hypoteticky realizovat např. v sw. PHREEQC | https://www.usgs.gov/software/phreeqc-version-3 |
| Změna proudění podzemní vody v puklinách vlivem geologických procesů | Hydrogeologické modelovací programy MODFLOW, CONNECTFLOW, FEFLOW atd. | Programy jsou vhodné k simulaci procesu proudění podzemní vody v tektonicky porušeném horninovém masivu. Vliv geologických procesů je zahrnut jako změna vstupních dat a okrajových podmínek hydrogeologického modelu. Podporou k modelu proudění tedy musí být analýza, jakým způsobem ovlivní geologické procesy hydrogeologické podmínky. |

| | Dostupnost modelovacího nástroje | Poznámka |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Změna proudění podzemní vody vlivem klimatických změn | Hydrogeologické modelovací programy MODFLOW, CONNECTFLOW, FEFLOW atd. | Programy jsou vhodné k simulaci procesu proudění podzemní vody v tektonicky porušeném horninovém masivu. Vliv klimatických změn je zahrnut jako změna vstupních dat a okrajových podmínek hydrogeologického modelu. Podporou k modelu proudění tedy musí být analýza, jakým způsobem ovlivní změny klimatu hydrogeologické podmínky. |
| Změna proudění podzemní vody vlivem činnosti člověka | Hydrogeologické modelovací programy MODFLOW, CONNECTFLOW, FEFLOW atd. | Programy jsou vhodné k simulaci procesu proudění podzemní vody v tektonicky porušeném horninovém masivu. Vliv činnosti člověka je zahrnut jako změna vstupních dat a okrajových podmínek hydrogeologického modelu. Jedná se o standardní hydrogeologické úlohy. |
| Mechanické procesy | | |
| Tektonika (reaktivace křehkých struktur - pohyby na zlomech, četnost, velikost křehkých struktur) | Modelovat pohyby na konkrétních křehkých strukturách je bez úplné znalosti heterogenity okolního horninového prostředí a variací napětí v něm velmi problematické a nevěrohodné. K modelování seismicity v obecnějším smyslu lze doporučit nástroje pro PSHA - probabilistic seismic hazard analysis) | https://geotechsimulation.com/2018/08/12/introduction-to-probabilistic-seismic-hazard-analysis-psha/ |
| Pomalé plastické deformace (plastický tok krystalinických hornin, gravitační creep v přípovrchové zvětralé vrstvě a málo zpevněných sedimentech) | Pro gravitační pohyby v přípovrchových zvětralinách je vhodné využít inženýrsko-geologické, resp. geotechnické sw. modelovací nástroje, např. Plaxis, Midas, Regolith--A Fortran 95 apod. | https://www.bentley.com/en/products/brands/plaxis https://www.midasgeotech.com/main https://www.usgs.gov/programs/landslide-hazards/software |
| Napětový stav horninového masivu a jeho změny (napětí v hornině (diferenciální i litostatické napětí)) | Pro modelování těchto procesů lze využít geotechnické modelovací sw. , např. výše zmíněný Plaxis nebo Midas, případně specializované sw. Nástroj pro simulaci stability podzemních děl - tunelů nebo důlních prostor -CESAR - LCPC | https://www.bentley.com/en/products/brands/plaxis https://www.midasgeotech.com/main https://www.cesar-lcpc.com/ |

| | Dostupnost modelovacího nástroje | Poznámka |
|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Seismická stabilita území a její vývoj | Pro stanovení PSHA se používá metoda Cornell-McGuire Pro odhad velikosti míry ohrožení se užívá nástroj AXITRA (modelování vlnových polí v jednorozměrném vrstevnatém prostředí) | BOMMER J.J., ABRAHAMSON N.A. (2006): Why do modern probabilistic seismic-hazard analyses often lead to increased hazard estimates? - Bull. Seismo. Soc. Am., 96, 1976–1977. http://www.orfeus-eu.org/software/seismo_softwarelibrary.html |
| Chemické procesy | | |
| Metamorfóza | Pro termodynamické modelování vývoje pT drah metamorfovaných hornin lze využít sw. Thermocalc anebo Perplex_X Phase modelling | |
| Zvětrávání, eroze, zpětná eroze, denudace | Pro krátkodobou půdní erozi lze použít modelovací nástroj dle Zeleňáková et al. (2019). | ZELEŇÁKOVÁ M., HARABINCOVÁ S., MÉSÁROŠ P., ABD-ELHAMID H., PURCZ P. (2019): Modelling of Erosion and Transport Processes. MDPI-Water 6, 2–12. |
| Chemické a mineralogické změny (hornina) | Modelování chemických změn v hornině, které zahrnují i procesy rozpouštění a srážení fází je obecně problematické, hypoteticky lze využít sw. PHREEQC nebo programy pro termodynamické modelování vývoje hornin a jejich fázových přechodů jako např. sw. Thermocalc nebo Perplex_X Phase modelling | https://www.perplex.ethz.ch/ https://hpxeosandthermocalc.org/the-thermocalc-software/ |
| Interakce hornina - podzemní voda | Modelování chemických změn v hornině, které zahrnují i procesy rozpouštění a srážení fází je obecně problematické, hypoteticky lze využít sw. PHREEQC nebo programy pro termodynamické modelování vývoje hornin a jejich fázových přechodů jako např. sw. Thermocalc nebo Perplex_X Phase modelling | https://www.perplex.ethz.ch/ https://hpxeosandthermocalc.org/the-thermocalc-software/ |

| | Dostupnost modelovacího nástroje | Poznámka |
|------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Srážení a spolusrážení | Modelování chemických změn v hornině, které zahrnují i procesy rozpouštění a srážení fází je obecně problematické, hypoteticky lze využít sw. PhreeqC nebo programy pro termodynamické modelování vývoje hornin a jejich fázových přechodů jako např. sw. Thermocalc nebo Perplex_X Phase modelling | https://www.perplex.ethz.ch/ https://hpxeosandthermocalc.org/the-thermocalc-software/ |
| Chemické rovnováhy a kinetiky | | - |
| Speciace a rozpustnost | PHREEQC | KLAJMON M., ČERVINKA R., HAVLOVÁ V., KOLOMÁ K., RUKAVIČKOVÁ L. (2017). Migrační procesy radionuklidů v prostředí krystalických hornin a migrační parametry hornin českého masivu. – MS SÚRAO, TZ 104/2017, Praha |
| Mikrobiální činnost | | |
| Transportní procesy | | |
| Transportní procesy v kapalně fázi | | |
| Advektivní transport | Hydrogeologické modelovací programy MT3D, FEFLOW, FLOW123D atd., případně GOLDSIM po kalibraci se standardním transportním programem. Particle tracking MODPATH pro MODFLOW, FEFLOW, CONNECTFLOW, FLOW123d | TRPKOŠOVÁ D., HAVLOVÁ, V., DOBREV, D., HUSTÁKOVÁ, H., GONDOLLI, J., KLAJMON, M., MIRANDA A. N. M., VEČERNÍK P., BUKOVSKÁ Z., RATAJ J., FRÝBORT J., FEJT F., ŠTAMBERG K., VETEŠNÍK, A., VOPÁLKA D., UHLÍK J., GVOŽDÍK L., KRÁLOVCOVÁ J., ŘÍHA J., MARYŠKA J., STEINOVÁ J., STAŠ L. (2018b): Bezpečnostní rozbor dlouhodobé bezpečnosti hlubinného úložiště na lokalitě Kraví hora. Závěrečná zpráva. – MS SÚRAO ZZ 334/2018, Praha. HOKR M., TRPKOŠOVÁ D., VETEŠNÍK A., ŘÍHA J., HAVLOVÁ V., VOPÁLKA D., GVOŽDÍK L. (2020): Testing of Transport Models Using Foreign In-situ Experiments. – MS SÚRAO, ZZ 480/2020, Praha. x |

| | Dostupnost modelovacího nástroje | Poznámka |
|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Difúze | GOLDSIM, PHREEQC | Trpkošová D., Havlová V., Dobrev D., Husťáková H., Gondolli J., Klajmon M., Miranda A. N. M., Večerník P., Bukovská Z., Rataj J., Frýbort J., Fejt F., Štamberg K., Vetešník A., Vopálka D., Uhlík J., Gvoždík L., Královcová J., Říha J., Maryška J., Steinová J., Staš L. (2018b): Bezpečnostní rozbor dlouhodobé bezpečnosti hlubinného úložiště na lokalitě Kraví hora. Závěrečná zpráva. – MS SÚRAO ZZ 334/2018, Praha. Hokr M., Trpkošová D., Vetešník A., Říha J., Havlová V., Vopálka D., Gvoždík L. (2020): Testing of Transport Models Using Foreign In-situ Experiments. – MS SÚRAO, ZZ 480/2020, Praha. |
| Sorpce | Lze použít PHREEQC, používán zejm. v zahraničí | |
| Disperze | | |
| Transport koloidů | | |
| Transportní procesy v pevné fázi | | |
| Transportní procesy v plynné fázi | Obecně lze použít programy, využívající dvoufázové proudění (např. TOUGHREACT, PFLOTRAN). | Použito např. pro modelování migrace CO ₂ v geologických rezervoárech – projekt REPP-CO2 http://www.geology.cz/repp-co2 |
| Procesy způsobené výstavbou a provozem úložiště | | |
| Tepelné ovlivnění prostředí provozem úložiště | program TEPLO (součást systému FIESTA) Zjednodušený model v kódu Mathcad 15.0; Podrobný model v kódu COSMOS/M 2.7 konečně prvkový (MKP) software GEM; software ISERIT; program ANSYS | Šik J.: Ukládací obalový soubor pro hlubinné úložiště, Tepelný výpočet, Ae 16093/dok Rev.1, Škoda JS, 2016 Kobylka D. (2019): Optimalizace vzájemné vzdálenosti UOS, Technická zpráva SÚRAO 135/2017. Blaheta J. a kol. (2012): Tepelná analýza referenčního návrhu úložiště vyhořelého jaderného paliva, Ústav geoniky AV ČR, Ostrava, 2012 |

| | Dostupnost modelovacího nástroje | Poznámka |
|-------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | vliv tepla na chemismus prostředí HÚ viz Ovlivnění chemických poměrů výstavbou, provozem a uzavřením HÚ | |
| Mechanické ovlivnění horninového prostředí výstavbou úložiště (vznik zón EDZ) | Modelování deformace neporušených hornin, reaktivace již existujících diskontinuit a šíření nových trhlin vyvolaných tahem, smykem nebo smíšeným křehkým porušením - FEMDEM | https://solidityproject.com/applications/excavation-damaged-zone-modelling/ |
| Ovlivnění hydraulických poměrů výstavbou HÚ (proudění v EDZ) | | Velikost přítoku je řešena jako úloha proudění vody v rozpukané hornině. Jde o metodicky detailně popsanou problematiku, ale zároveň s množstvím alternativ, jak konkrétními daty zachytit nepravidelné rozložení puklin a propustných zón. Jde ve velké míře o stochastický popis. Z toho důvodu je konkrétní kvantitativní predikce omezená a v principu obtížně dosažitelná |
| Ovlivnění chemických poměrů výstavbou, provozem a uzavřením HÚ | Vývoj chemismu na rozhraní bentonitu a HÚ a reaktivní transport složek směrem do horninového prostředí modelovali ve zjednodušeném konceptu pukliny, která protíná ukládací vrt, pomocí PHREEQC, PHAST, PHT3D | Sledování vlivu saturace bentonitové inženýrské bariéry, spotřebu kyslíku, vliv tepla, vliv korozních produktů a dopad permafrostu na vývoj chemismu systému HÚ Červinka R., Gondolli J., Klajmon M., Tomášová Z., Rukavičková L., Řihošek J., Pacherová P., Zeman J., Vencelides Z. (2017): Chování horninového prostředí/Příprava geochemického modelu úložiště – Definice vstupních dat a příprava modelů. – MS SÚRAO, TZ 125/2017, Praha. |

Tab. 6 Modelování vývoje událostí v horninovém prostředí – dostupnost modelovacích nástrojů

| | Dostupnost modelovacího nástroje | Poznámka |
|---------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Geologické události | | |
| Svahové pohyby | Pro gravitační pohyby v přípovrchových zvětralinách je vhodné využít inženýrsko-geologické, resp. geotechnické sw. modelovací nástroje, např. Plaxis, Midas a Regolith--A Fortran 95 | https://www.bentley.com/en/products/brands/plaxis https://www.midasgeotech.com/main https://www.usgs.gov/programs/landslide-hazards/software |
| Krasové jevy | Modelovací a vizualizační sw. Karsys | https://www.visualkarsys.com/courses |
| Vulkanismus a doprovodné jevy vč. postvulkanických jevů | Dle našich znalostí věrohodné a přesné modelovací nástroje pro vulkanické a postvulkanické procesy nejsou k dispozici. | |
| Seismické události | Pro stanovení PSHA se používá metoda Cornell-McGuire Pro odhad velikosti míry ohrožení se užívá nástroj AXITRA (modelování vlnových polí v jednorozměrném vrstevnatém prostředí) | Bommer J.J., Abrahamson N.A. (2006): Why do modern probabilistic seismic-hazard analyses often lead to increased hazard estimates? - Bull. Seismo. Soc. Am., 96, 1976–1977. http://www.orfeus-eu.org/software/seismo_softwarelibrary.html |
| Klimatické události | | |
| Vliv chladného klimatu | Modelové výstupy budoucího chodu klimatu a diskuze vývoje orbitální parametrů na dlouhých časových škálách jsou dostupné v práci Nývlt a Dobrovolný (2015). K modelování budoucího vývoje klimatu mohou být použity vizualizační nástroje modelových (GCM) výstupů CMIP5 (report IPCC 2013) a CMPI6 (report IPCC 2021), které jsou vizualizovány pomocí webové aplikace Climate Change Atlas na stránkách Climate Explorer. | Nývlt, D., Dobrovolný, P. (2015): Klimatická stabilita území - závěrečná zpráva. –Technická zpráva č. 15/2015. 53 s., SÚRAO a ČGS. https://www.wcrp-climate.org/wgcm-cmip/wgcm-cmip5 https://www.wcrp-climate.org/wgcm-cmip/wgcm-cmip6 https://climexp.knmi.nl |

| | Dostupnost modelovacího nástroje | Poznámka |
|------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | Toto umožňuje extrahovat data a zobrazovat simulace pro střední Evropu, resp. ČR. | |
| Vliv teplého klimatu | <p>Modelové výstupy budoucího chodu klimatu a diskuze vývoje orbitální parametrů na dlouhých časových škálách jsou dostupné v práci Nývlt a Dobrovolný (2015).</p> <p>K modelování budoucího vývoje klimatu mohou být použity vizualizační nástroje modelových (GCM) výstupů CMIP5 (report IPCC 2013) a CMIP6 (report IPCC 2021), které jsou vizualizovány pomocí webové aplikace Climate Change Atlas na stránkách Climate Explorer. Toto umožňuje extrahovat data a zobrazovat simulace pro střední Evropu, resp. ČR.</p> | <p>Nývlt, D., Dobrovolný, P. (2015): Klimatická stabilita území - závěrečná zpráva. –Technická zpráva č. 15/2015. 53 s., SÚRAO a ČGS.</p> <p>https://www.wcrp-climate.org/wgcm-cmip/wgcm-cmip5</p> <p>https://www.wcrp-climate.org/wgcm-cmip/wgcm-cmip6</p> <p>https://climexp.knmi.nl</p> |
| Události v důsledku činnosti člověka | | |
| Realizace hlubokého vrtu | Hydrogeologické modelovací programy MODFLOW/MT3D, CONNECTFLOW, FEFLOW atd. | Programy jsou vhodné k simulaci procesu proudění podzemní vody a transportu rozpuštěných látek v tektonicky porušeném horninovém masivu. Realizace, účel a výstroj vrtu modifikují vstupní data a okrajové podmínky hydrogeologického modelu. |
| Antropogenní propady a deformace povrchu území | Pro antropogenní propady z hlediska stability podzemních výrubů je vhodné využít inženýrsko-geologické, resp. geotechnické sw. modelovací nástroje, např. sw. Plaxis, Midas, apod. | <p>https://www.bentley.com/en/products/brands/plaxis</p> <p>https://www.midasgeotech.com/main</p> |

11 Závěr

Pro posouzení bezpečnosti hlubinného úložiště je důležité nalézt vlastnosti, které jsou důležité pro zajištění bezpečnostních funkcí úložiště, popsat jejich vstupní charakteristiky a jejich vývoj v čase; nalézt procesy, které mohou iniciovat změny vlastností nebo být jejich důsledkem; a identifikovat události, které jsou příčinou nebo následkem změny podmínek v úložišti.

Výchozím stavem pro specifikaci FEP je znalost a definice okrajových podmínek a počáteční stav (Initial state), ke kterému je možné vztáhnout vlastnosti jednotlivých komponent a vůči kterému pak mohou být popsány nastalé změny.

Vlastnosti, události a procesy je třeba nalézt pro celý systém úložiště. Nicméně k jejich hlubšímu pochopení bylo účelné rozdělit systém na části, které budou tvořit logické celky. Následně je možné tyto celky sesadit a vyhodnotit chování celého systému.

Zpracovaný dokument se zaměřil na popis vlastností horninového masivu, důležitých z pohledu hodnocení bezpečnosti úložiště, a procesů a událostí, které mohou dlouhodobou bezpečnost ovlivnit.

Vlastnosti horninového prostředí byly popsány v počátečním stavu, tedy před zásahem člověka. Popis procesů a jejich vliv na bezpečnost byly posouzeny i v období po zásahu člověka, tedy v období výstavby, provozu a uzavírání úložiště a po uzavření úložiště v období, kdy je teplota zvýšená v důsledku přestupu generovaného tepla z VJP a následně po poklesu teploty na původní hodnoty.

Procesy, identifikované v průběhu prací byly rozčleněny do několika skupin – tepelné, hydraulické, mechanické, chemické a transportní.

Posouzeny byly důsledky působení neočekávaných externích přírodních vlivů (geologických, klimatických), a událostí iniciovaných zásahem člověka.

Identifikované FEP byly popsány v jednotné struktuře:

- Popis, který stručně shrnul podstatu vlastnosti, události, procesu;
- Vliv na dlouhodobou bezpečnost, kde bylo uvedeno, jakým způsobem může vlastnost být důležitá z pohledu hodnocení bezpečnosti, a jaký vliv mají události a procesy na bezpečnostní funkce komponent;
- Dostupná data, kde bylo uvedeno, zda a kde lze nalézt k dané problematice relevantní data z českého programu přípravy hlubinného úložiště;
- Nejistoty, v nich bylo diskutováno, zda jsou existující dostupná data dostačující, zda je možné z existujících informací možné predikovat budoucí vývoj apod.

Výstup těchto prací je podkladem pro odvození scénářů pro hodnocení bezpečnosti systému hlubinného úložiště. neboť teprve na základě vyhodnocení relevance FEP s ohledem na místní podmínky a pravděpodobnosti vzniku je možné vybrat ty, na jejichž základě se budou odvozovat scénáře, scénář normálního vývoje a alternativní scénáře

Reference

Knihy, články, mapy:

Reference jsou kvůli přehlednosti uvedeny u každé kapitoly.

Zákony:

Zákon č.263/2016 Sb., atomový zákon.

Vyhláška č. 377/2016 Sb., o požadavcích na bezpečné nakládání s radioaktivním odpadem a o vyřazování z provozu jaderného zařízení nebo pracoviště III. nebo IV. kategorie

Vyhláška č. 378/2016 Sb., o umístění jaderného zařízení.



SÚRAO

SPRÁVA ÚLOŽIŠŤ
RADIOAKTIVNÍCH
ODPADŮ

NAŠE
BEZPEČNÁ
BUDOUCNOST

info@suraao.cz | www.suraao.cz