

ZÁVĚREČNÁ ZPRÁVA
PROJEKTU VÝZKUMNÁ
PODPORA
BEZPEČNOSTNÍHO
HODNOCENÍ HÚ

Autoři: Václava Havlová a
kolektiv

Praha, 2020

NÁZEV ZPRÁVY: Závěrečná zpráva projektu Výzkumná podpora pro bezpečností hodnocení hlubinného úložiště

NÁZEV PROJEKTU: Výzkumná podpora pro bezpečnostní hodnocení hlubinného úložiště

Závěrečná zpráva

Číslo smlouvy: SO2014-061

ŘEŠITELÉ:

ÚJV Řež, a. s.¹, Česká geologická služba², ČVUT v Praze³, PROGEO s.r.o.⁴, Technická univerzita v Liberci⁵, Ústav geoniky AV ČR v.v.i.⁶

AUTORSKÝ KOLEKTIV:

Václava Havlová¹, Karel Prchal¹, Eva Hofmanová¹, David Dobrev¹, Petr Večerník¹, Karel Svoboda¹, Dagmar Trpkošová¹, Radek Trtílek¹, Hana Vojtěchová¹, Zita Bukovská², Jan Franěk², Petr Mixa², Jaroslava Pertoldová², Ondřej Švagera², Tomáš Hroch², Daniel Nývlt², Jan Rataj³, Aleš Vetešník³, Jiří Svoboda³, Martin Milický⁴, Jan Uhlík⁴, Milan Hokr⁵, Jiří Maryška⁵, Jakub Říha⁵, Jana Steinová⁵, Lubomír Staš⁶, Martin Hasal⁶, Radim Blaheta⁶

Horní Indexy u jmen autorů odkazují na výčet institucí výše.

Antonín Vokál

Manažer projektu (SÚRAO) 2014–2019

Lukáš Vondrovic

Manažer projektu (SÚRAO) 2019–2020

30. 6. 2020

Václava Havlová

Manažer projektu (ÚJV Řež, a. s.)

30. 6. 2020

Obsah

1	Úvod	26
2	Cíle projektu	28
3	Způsob plnění projektu	37
4	Poskytování výzkumné podpory v rámci jednotlivých oblastí řešení	40
4.1	Chování VJP a forem RAO, nepřijatelných do přípovrchových úložišť, v prostředí hlubinného úložiště	40
4.1.1	Databáze VJP pro bezpečnostní rozborů (PB-2014-ZL-S2565-005-DatabazeVJP).....	40
4.1.2	Chování VJP a forem RAO nepřijatelných do přípovrchových úložišť v prostředí HÚ /Vlastnosti RAO nepřijatelných do přípovrchových úložišť (PB-2015-ZL-S0945-018-CharakterizaceRAO).....	45
4.1.3	Charakterizace RAO nepřijatelného do přípovrchového úložiště z vyřazování jaderné elektrárny – biologické stínění reaktoru (PB-2016-ZL-S4289-035-BiologStineni)	54
4.2	Chování ukládacích obalových souborů (UOS) VJP a RAO v prostředí hlubinného úložiště	60
4.2.1	Mikrobiální koroze (PB-2015-ZL-S1411-020-MIC).....	60
4.2.2	Korozní produkty (PB-2016-ZL-S0145-025-Korozni Produkty)	65
4.2.3	Experimenty s materiály UOS pro bezpečnostní rozborů (PB-2015-ZL-S1392-021-ExperimentyUOS).....	71
4.2.4	Test omezení koroze UOS využitím drenážní vrstvy v úložných vrtech (PB-2016-ZL-S0578-026-TestDrenazi)	75
4.3	Chování tlumících, výplňových a dalších konstrukčních materiálů v prostředí hlubinného úložiště	82
4.3.1	Verifikace metodiky pro stanovení kationtové výměnné kapacity bentonitu (metoda Cu-trien) (PB-2015-ZL-S1307-019-CECBentonit)	82
4.3.2	Experimentální hodnocení plynopropustnosti inženýrských bariér hlubinného úložiště (PB-2017-ZL-U3831-036-Plynopropustnost).....	83
4.3.3	Provedení předběžného výpočtu tlaku na UOS (PB-2017-ZL-S1937-Tlak_kontejneru).....	87
4.4	Řešení úložných vrtů a jejich vliv na vlastnosti obklopujícího horninového prostředí	91
4.4.1	Vznik a monitoring EDZ při výstavbě PVP Bukov (PB-2015-ZL-S1894-023-BukovEDZ)	91
4.5	Chování horninového prostředí	95
4.5.1	Studium napjatostních poměrů a anizotropie v prostředí granitických hornin (PB-2014-ZL-S2302-002-LASMO)	95
4.5.2	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov (PB-2014-ZL-S2304-004-Bukov)	99

4.5.3	Expertní odhady dlouhodobé stability horninového prostředí / Erozní stabilita území (PB-2014-ZL-S2380-007-ErozniStabilita)	103
4.5.4	Expertní odhady dlouhodobé stability horninového prostředí / Klimatická stabilita území (PB-2014-ZL-S2382-008-KlimatickaStabilita)	107
4.5.4.6	Expertní odhady dlouhodobé stability horninového prostředí / Seismická stabilita území (PB-2014-ZL-S2379-009-SeismickaStabilita)	113
4.5.5	3D strukturně-geologické modely horninového prostředí pro HÚ (PB-2014-ZL-S2304-010-3DStrukturneGeoModely).....	116
4.5.6	HG modely horninového prostředí pro HÚ (PB-2014-ZL-S2393-011-HGModely) 123	
4.5.7	Příprava experimentů v PVP Bukov (PB-2015-ZL-S0655-016-BukovExperimenty).....	132
4.5.8	Plán experimentů PVP Bukov pro podporu bezpečnostního rozboru lokality Kraví hora (PB-2016-ZL-U2686-033-PripravaBukov)	132
4.5.9	Příprava geochemického modelu úložiště (PB-2016-ZL-S0626-027-Geochemie) 136	
4.6	Transport radionuklidů z úložiště	142
4.6.1	Vstupní parametry a procesní modely pro hodnocení transportu RN v horninovém prostředí (PB-2014-ZL-S2300-003-Transport1).....	142
4.6.2	Vstupní parametry a procesní modely pro hodnocení transportu RN v horninovém prostředí (PB-2014-ZL-S2300-003-Transport1) Část 1: Transportní parametry 142	
4.6.3	Vstupní parametry a procesní modely pro hodnocení transportu RN v horninovém prostředí (PB-2014-ZL-S2300-003-Transport1) Část 2: Modely.....	149
4.6.4	Aktualizace integrovaného, transportního modelu pro hodnocení dlouhodobé bezpečnosti (PB-2014-ZL-S2303-006-Transport2)	154
4.6.5	Transport radionuklidů z úložiště / Vstupní parametry a procesní modelu pro hodnocení transportu radionuklidů přes inženýrské bariéry (PB-2015-ZL-S2565-013-Transport3).....	158
4.6.6	Testování transportních modelů s využitím <i>in-situ</i> zahraničních experimentů (PB-2015-ZL-S1900-022-Transport4)	167
4.6.7	Transport radionuklidů přes materiály na bázi cementu (PB-2015-ZL-S2368-024-Transport5).....	171
4.6.8	Hodnocení nejistot transportu radionuklidů z hlubinného úložiště (PB-2016-ZL-S0744-028-Transport6).....	181
4.6.9	Vývoj a ověřování metodik modelování THMC procesů v rámci mezinárodního projektu DECOVALEX 2019 (PB-2016-ZL-S0870-029-Decovalex).....	186
4.6.10	Transport radionuklidů z úložiště / Bezpečnostní rozbor HÚ v lokalitě Kraví hora (PB-2017-PZ-S3852-034-Transport7).....	192
4.6.11	Transport radionuklidů z úložiště / Testování koncepčních a výpočetních modelů (PB-2017-ZL-S2222-041-Transport 8)	198

4.6.12	Benchmarkové studie GRS (PB-2019-ZL-S3620-044-GRS).....	203
4.7	Charakterizace horninového prostředí.....	207
4.7.1	Vývoj a ověřování metodik pro charakterizaci horninového prostředí (PB-2014-ZL-S2566-012-Bedrichov).....	207
4.7.2	Matematické modelování křehkého porušení horninového prostředí metodou DFN (PB-2016-ZL-S1351-030-DFN).....	211
4.7.3	Předběžné hodnocení lokalit z hlediska dlouhodobé bezpečnosti (PB-2016-ZL-S2058-032-Hodnocení lokalit).....	216
4.7.4	Charakterizace horninového prostředí / Předběžné hodnocení lokalit EDU–západ a ETE–jih z hlediska dlouhodobé bezpečnosti (PB-2017-ZL-S4076-039-HodnoceniEDU_ETE)	216
4.7.5	Geologická interpretace terénních geofyzikálních dat pro aktualizaci 3D strukturně-geologických modelů potenciálních lokalit HÚ (PB-2017-ZL-S2196-037-Geofyzika)	221
4.7.6	Aktualizace hodnocení lokalit z hlediska dlouhodobé bezpečnosti (PB-2019-ZL-U3183-043-Hodnoceni2).....	227
5	Komplexní vyhodnocení projektu.....	233
5.1	Hodnocení bezpečnosti.....	234
5.1.1	Zdrojový člen.....	236
5.1.2	Porozumění procesům a vlastnostem bariér HÚ	238
5.1.3	Bezpečnostní výpočet	245
5.2	Hodnocení lokalit s cílem posouzení vhodnosti pro umístění HÚ	247
5.3	Vývoj/hodnocení transportních modelů pro hodnocení migrace stopovačů v horninovém prostředí	249
5.4	Vývoj metod, směřujících k popisu vlastností horninového prostředí	251
6	Doporučení pro další výzkumné práce pro bezpečnostní hodnocení v rámci zúžení počtu lokalit pro umístění HÚ	253
6.1	Chování VJP a forem RAO, nepřijatelných do přípovrchových úložišť, v prostředí hlubinného úložiště	253
6.2	Chování ukládacích obalových souborů (UOS) VJP a RAO v prostředí hlubinného úložiště	253
6.3	Chování tlumících, výplňových a dalších konstrukčních materiálů v prostředí hlubinného úložiště	254
6.4	Řešení úložných vrtů a jejich vliv na vlastnosti obklopujícího horninového prostředí	255
6.5	Chování horninového prostředí	255
6.6	Transport radionuklidů z úložiště.....	257
6.6.1	Transport radionuklidů v prostředí inženýrských bariér.....	257
6.6.2	Transport radionuklidů v prostředí horninového masivu	258

6.6.3	Bezpečnostní výpočty	258
6.6.4	Validace a verifikace modelů na základě benchmarkových studií v rámci zahraničních platforem.....	259
6.7	Charakterizace horninového prostředí.....	259
6.8	Obecná doporučení.....	260
7	Závěr	261
8	Reference.....	262
9	Příloha 1 Seznam vydaných zadávacích listů	273

Seznam obrázků:

Obr. 1 Schéma týmu pro realizace projektu.....	38
Obr. 2 Provázanost jednotlivých ZL v rámci projektu	39
Obr. 3 Aktivita skupin sledovaných nuklidů v čase od skončení vyhořívání pro různá paliva reaktoru VVER-440 pro vyhoření 50 MWd/kgHM	42
Obr. 4 Náhled databáze VJP (MS Access 2010) s výsledky výpočtů pro aktivitu nuklidů v palivu reaktoru VVER-1000	43
Obr. 5 Rozdělení radionuklidů podle rozpustnosti v podmínkách, podmíněných interakcí cementu s vodou. (Červeně jsou uvedeny rozpustnosti nuklidů v mírně oxidačních podmínkách, modře v redukčních podmínkách, pokud se od oxidačních liší. Data jsou vybrána z tabulek uvedených ve studii (Čubová et al 2017). Použity byly PhreeqC a The Geochemist's Workbench®.)	51
Obr. 6 Rozložení dávkového příkonu na povrchu segmentu.....	55
Obr. 7 Profil aktivity detekovaných radionuklidů v závislosti na vzdálenosti od vnitřní obličovky betonového segmentu (Pro přehlednost grafu gama radionuklidy reprezentuje pouze ^{154}Eu , jehož aktivity jsou vyneseny na ose vpravo označené oranžovou barvou. Levá osa zobrazuje hodnoty pro ostatní radionuklidy.).....	56
Obr. 8 Relativní zastoupení nejhojnějších rodů mikroorganismů ve vzorcích bentonitu s různou suchou objemovou hmotností (1200, 1600 a 2000 kg m ⁻³)	61
Obr. 9 Povrch uhlíkové oceli s bakteriemi NRB po 3měsíční expozici v anaerobní směsi vody VITA a SBPOW	62
Obr. 10 Výsledky korozního napadení na vzorcích uhlíkové oceli po 3měsíční expozici v anaerobním roztoku SBPOW, ve směsi vody VITA a SBPOW, v roztoku SBPOW bez dusičnanů a ve směsi vody VITA a roztoku SBPOW bez dusičnanů	63
<i>Obr. 11 Výsledky měření samovolného korozního potenciálu a polarizačního odporu uhlíkové oceli v roztocích SBPOW s proměnným složením, ve variantě bez dusičnanů a se sírany alternovanými hydrogensulfidy</i>	<i>63</i>
Obr. 12 Výsledky měření samovolného korozního potenciálu a polarizačního odporu mědi v roztocích SBPOW s proměnným složením, ve variantě bez dusičnanů a se sírany alternovanými hydrogensulfidy	64
Obr. 13 Kompaktovaný bentonit z cely č. 6 (40 °C) po částečném odstranění vrstvy zbytků práškového železa s korozními produkty.....	67
Obr. 14 Grafické srovnání hodnot CEC_{sum} vzorků bentonitu BaM z interakčního rozhraní pro různé teploty (laboratorní, 40 a 70 °C) a doby trvání experimentu a výchozího bentonitu BaM. Na ose x je uvedena celková doba trvání každé série vzorků ve dnech, série trvající 188 dnů je replikace půlroční série	67
Obr. 15 Vývoj minerálních fází v systému železo-bentonit-voda při 70 °C ($A_{\text{sp,Fe}} = 0,1 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$)	69
Obr. 16 Ilustrační obrázek směsi alternativního těsnicího materiálu s čistým bentonitem nahoře (nalevo) a korozní cely (napravo) obsahující tuto směs a čistý bentonit	72

Obr. 17 Ilustrační obrázek porovnání korozních rychlostí uhlíkové oceli v alternativních těsnících materiálech a cementu po 9měsíční korozní zkoušce za anaerobních i aerobních podmínek	73
Obr. 18 Ilustrační obrázek z optické profilometrie vzorků po expozici ve směsi cement/bentonit s 2, 10, 50% cementu a čistém cementu za anaerobních podmínek po 9měsíční korozní zkoušce. Nahoře zleva 2, 10% směsi a dole zleva 50% směs a cement	74
Obr. 19 Ilustrační obrázek rozhraní mezi bentonitem a cementem	74
Obr. 20 Ilustrační obrázek aparatury bez drenáže vlevo a s drenážní vrstvou vpravo. 1 – víka, 2 – okružní, 3 – topidlo, 4 – trubka, 5 – stahovací matice, 6 – vzorky, 7 – drenážní vrstva, 8 – teplotní čidla, 9 – bentonitová mezikružní, 10 – okružní s vnitřní drážkou, 11 – kroužek z porézního materiálu	77
Obr. 21 Ilustrační obrázek porovnání výsledného modelového stupně nasycení v čase 4380 hod v modelech při uvažování topidla. Obrázek vlevo zobrazuje výsledek modelu s tlakem sycení 0,01 MPa, obrázek uprostřed 2 MPa, obrázek vpravo 5 MPa. Legenda udává maximální, resp. minimální stupeň nasycení	77
Obr. 22 Ilustrační obrázek výsledků měření vzorku uhlíkové oceli optickou profilometrií před (nalevo) a po experimentu (napravo). Nahoře vzorek s korozní a bez korozní vrstvy	79
Obr. 23 Ilustrační obrázek rozložení vlhkosti v cele bez drenážní vrstvy po 0,25 r.....	80
Obr. 24 Ilustrační obrázek porovnání průměrného stupně saturace v závislosti na vzdálenosti od topidla pro experiment s drenážní vrstvou. A–J je označení vzorků bentonitu ve směru osy cely, u nichž byla stanovována vlhkost po experimentu v závislosti na vzdálenosti od topidla	80
Obr. 25 Dodaný vzorek bentonitu B-S-36-3. a) přední strana, b) odběr vrtnou korunkou.....	82
Obr. 26 Závislost bobtnacího tlaku na objemové hmotnosti bentonitu B75, Štáskva 2014 – II. Modré body reprezentují měření a modrá linie reprezentuje aproximační exponenciální křivku průběhu měření. Červená křivka představuje předpokládanou maximální hodnotu bobtnacího tlaku a zelená dolní odhad bobtnacího tlaku.....	89
Obr. 27 Výsledný geologický model okolí podzemního pracoviště Bukov. Běžová – pararuly, hnědá – migmatity, zelená – amfibolity, růžová – granulity, modrá – erlany až mramory	101
Obr. 28 Pohled na geomechanický model horninového prostředí (pararula P1 až P5, amfibolit A1 až A7, migmatit M1 až M6).....	102
Obr. 29 Ukázka geomorfologického schématu pro lokalitu Horka.....	106
Obr. 30 Maximální rozsahy kontinentálních a horských ledovců na území Česka. A. Přehledná mapa s vyznačením dotčených lokalit a výřezů zobrazených v obrázcích B-D. B. Horské ledovce na české straně Šumavy. C. Maximální rozsahy kontinentálních ledovců v severních Čechách a horské ledovce v Krkonoších. D. Maximální rozsahy kontinentálních ledovců na Moravě a ve Slezsku a horský ledovec v Hrubém Jeseníku. Upraveno dle Nývlt et al. (2011)	110
Obr. 31 Varianty možného vývoje koncentrací CO ₂ (nahore) a modelová odezva v podobě objemu kontinentálního zalednění na severní polokouli (dole) podle modelu LLN 2D NH. Varianty: A – CO ₂ koncentrace rovna 260 ppm během příštích 19 tisíc roků (analog MIS 5); B – CO ₂ koncentrace 260 ppm během příštích 11 tisíc roků (analog MIS 11); C – CO ₂ koncentrace vyšší než 280 ppm během příštích 50 tisíc roků; D – CO ₂ nižší než 220 ppm od doby před 20 tisíci roky (upraveno podle Loutre 2003).....	111

Obr. 32 Mapa seismických jevů z období 1991–2014 z databáze ČRSS. Vyneseny všechny seismické jevy s magnitudem Mag větším než 2 (určené světovými datovými centry – ISC, NEIC, SED apod.), v mapě jsou vyznačena průzkumná území HÚ	115
Obr. 33 Vizualizace detailního 3D strukturně geologického modelu lokality Čertovka s pozicí předpokládaného homogenního bloku. Žlutá plocha představuje předpokládaný homogenní blok, žlutý polygon průzkumné území SÚRAO. Červené strmé plochy reprezentují zlomy kategorie 1, modré plochy zlomy kategorie 2 a tmavě zelené plochy zlomy kategorie 3. Růžové plochy vymezují rozsah tiského plutonu. Fialovou, okrovou a hnědou barvou jsou znázorněny permokarbonské sedimentární pánve; sytě růžová pak představuje lubenecký granit a tmavě zelená metamorfní jednotky, převážně fylity	119
Obr. 34 Schéma rozdělení modelové domény (SKB 2008).....	124
Obr. 35 Schematický obrázek části úložného prostoru se superkontejnerem a vodivou poruchou, která protíná ukládací vrt. Na vodivé poruše (puklina) se předpokládá jako dominantní transportní proces advekce, v případě bentonitu je hlavním transportním procesem difúze. Koncept a rozměry dle ARP (2011) pro dva odlišné UOS s VJP (VVER 440 a VVER 1000).....	137
Obr. 36 Model reaktivního transportu ve 2D geometrii, a) modelová 2D doména, b) tlakové výšky v modelové doméně s naznačeným směrem toku a pozicemi pozorovacích bodů A a B	139
Obr. 37 Příklad výsledku modelu reaktivního transportu ve 2D geometrii pro SGW2/B-SGW2-ANOX (pH a Ca) v čase do 1 mil. let	140
Obr. 38 Sorpce vybraných radionuklidů na horninové vzorky (Cs, Sr, Se, U) a vzorky puklinových výplní (Cs, Sr, Se, U, Cl, I) ■ frakce C: 0,63–0,125 mm, ■ frakce D: 0,8–0,63 mm	144
Obr. 39 Hodnoty efektivních difúzních koeficientů (analytické řešení) tritia (³ H) vs. aniont (chlorid ³⁶ Cl, jodid ¹²⁵ I) – Havlová et al. (2019).....	146
Obr. 40 Lokalita Magdaléna – doba zdržení – ukázka vyhodnocení založeného na detailním hydraulickém modelu zpracovaném v SW Flow123D	153
Obr. 41 Experimentální koncentrační profily po 7 dnech trvání difúzních experimentů s plošným zdrojem s ⁸⁵ Sr, ¹³³ Ba a ²²³ Ra na bentonitu BaM nasyceném SGW2 vodou proložené odpovídajícím analytickým řešením.....	162
Obr. 42 Normalizace na objemovou hmotnost smektitu pro hodnoty zdánlivých difúzních koeficientů vody v BaM, Na-BaM, Ca-BaM a dalších materiálech (Kunigel V1, Kunipia F a Namontmorillonit) nasycených různými roztoky (DW – destilovaná/demineralizovaná voda; SGW-UOS, SGW2, SGW3 – syntetické granitické vody použité při studiu rozhraní bentonit-hornina, BSW – bentonitová syntetická voda) pomocí různých difúzních experimentů (TD – průniková difúzní metoda, PS – metoda plošného zdroje, HC – metoda polovičního bločku).....	164
Obr. 43 Schémata experimentů, které byly základem pro modelové úlohy – zleva: WPDE pro Task 9A, LTDE-SD pro Task 9B a TDE pro Task 9C (vrty 326, 324, 327)	168
Obr. 44 Ukázka výsledků porovnání modelů – vlevo Task 9A průniková křivka pro mírně sorbující sodík, vpravo Task 9C koncentrace v injektážním vrtu pro silně sorbující stopovač cesium.....	169

Obr. 45 Příklad výsledky vyhodnocení dat LTDE-SD pomocí konceptu mikro-DFN: vlevo profil ve vzorku horniny (A – kolmo na puklinu, D – radiálně od stěny vrtu), vpravo průběh v injektážním rezervoáru	169
Obr. 46 Pevnost v tlaku na vzorcích o rozměrech 50 × 50 × 50 mm.....	173
Obr. 47 Výsledky sorpčních experimentů s ¹²⁵ I ve formě retardačních koeficientů při dvou různých počátečních koncentracích nosiče ($c_0 = 10^{-4}$ a 10^{-6} mol l ⁻¹)	177
Obr. 48 Porovnání hodnot pH, vodivosti, koncentrace vápníku a křemičitanů ve výluzích z kolonových experimentů	179
Obr. 49 Konceptuální model zohledňující vliv lokalizace zdroje. Směr difúze je označen hrubě přes neporušené sudy. Konceptuální model ovšem uvažuje difúzní transport v meziprostoru mezi neporušenými kontejnery	183
Obr. 50 Schéma implementace alternativního konceptuálního modelu v prostředí GoldSim	183
Obr. 51 Prostorové rozložení tlakové výšky (m) v okolí experimentu GREET ve fázi drenáže – doména vzdáleného pole není zobrazena, pukliny a matrice blízkého pole jsou dále oříznuty dvěma plochami podélně s rozrážkou	188
Obr. 52 Model EB experimentu: rozložení suché objemové hmotnosti bentonitu $Mg \cdot m - 3$ v řezu B2 v čase 3827 dnů – vlevo výsledek modelu (symetrie) a vpravo interpolace z vzorků při rozebrání	189
Obr. 53 Model experimentu TAS04: vypočtené pole tlaku vody (vlevo) a vertikální složky tenzoru napětí (vpravo) v okolí tunelu v příčném řezu 3D modelu se zahrnutím sítě puklin (linie pod počvou)	189
Obr. 54 Závislost koncentrace radionuklidů na čase v zemědělské půdě, vypočtené modelem ÚJV a GRS.....	205
Obr. 55 Schéma lokality a monitoringu: podélný profil hydrogeologických podmínek tunelu, orientační umístění jednotlivých bodů měření.....	209
Obr. 56 Porovnání difúzních koeficientů tritia a jodidu (z dvou různých metod), vynesena v závislosti na poloze vzorků žuly v tunelu.....	210
Obr. 57 Vizualizace DFN modelu PVP Bukov z výstupního souboru *vtk v programu ParaView	214
Obr. 58 Postup hodnocení lokalit z hlediska vhodnosti pro umístění HÚ z hlediska dlouhodobé bezpečnosti.....	218
<i>Obr. 59 3D strukturně geologický model lokality ETE - Temelín</i>	<i>223</i>
<i>Obr. 60 Detail strukturně geologického modelu lokality ETE – Temelín.....</i>	<i>223</i>
Obr. 61 Schéma návaznosti jednotlivých ZL pro provedení bezpečnostního výpočtu v rámci ZL Bezpečnostní rozbor HÚ v lokalitě Kraví hor (PB-2017-PZ-S3852-034-Transport7)	236
Obr. 62 Požadavky na úložiště dané aktuálně platnou legislativou a vztah mezi bezpečnostními funkcemi (Gondolli et al. 2018a)	239

Seznam tabulek:

Tab. 1 Dílčí cíle a požadavky na řešení projektu	29
Tab. 2 Tabulka požadovaných dlouhodobých radionuklidů.....	41
Tab. 3 Množství vyřazovaných odpadů pro 1 blok JE Temelín (odhad).....	47
Tab. 4 Aktivita klíčových radionuklidů v jednotlivých typech materiálů JE Temelín, pro případ okamžitého vyřazování (pro jeden blok JE)	47
Tab. 5 Množství vyřazovaných odpadů pro 1 blok JE Temelín (odhad).....	47
Tab. 6 Aktivita klíčových radionuklidů v jednotlivých typech materiálů JE Temelín, pro případ odloženého vyřazování (pro jeden blok JE).....	47
Tab. 7 Množství vyřazovaných odpadů pro 1 blok JE Dukovany (odhad)	48
Tab. 8 Aktivita klíčových radionuklidů v jednotlivých typech materiálů JE Dukovany, pro případ okamžitého vyřazování (pro jeden blok JE)	48
Tab. 9 Množství vyřazovaných odpadů pro 1 blok JE Dukovany (odhad)	48
Tab. 10 Aktivita klíčových radionuklidů v jednotlivých typech materiálů JE Dukovany, pro případ odloženého vyřazování (pro jeden blok JE)	49
Tab. 11 Množství vyřazovaných odpadů pro NJZ (odhad).....	49
Tab. 12 Množství vyřazovaných odpadů pro reaktor LVR-15 (odhad)	49
Tab. 13 Přehled aktivačních produktů a jejich aktivit v případě serpentínového betonu použitého na JE Greifswald (experimentálně zjištěná data – $A_{\text{Greifswald}}$) a na JE Dukovany (teoretické hodnoty – A_{JEDU})	58
Tab. 14 Hodnoty maximálního horizontálního zrychlení (PGA) (v jednotkách m s^{-2}) vyvolané dvěma nejsilnějšími jevy vyskytnuvšími se uvnitř nebo v blízkém okolí ochranného pásma každé z uvažovaných lokalit. Výpočet je proveden pro povrch a pro hloubku 500 m	115
Tab. 15 Přehled hydrogeologických charakteristik posuzovaných lokalit	128
Tab. 16 Hodnoty CEC horninových vzorků metodou s Cu(II)-trienem (Havlová et al. 2019)	145
Tab. 17 Hodnoty specifických povrchů ($\text{m}^2 \text{ g}$) měřených pomocí (N_2 , Kr), hodnoty porozity stanovené pomocí Hg porozimetrie a kationtové výměnné kapacity (CEC) pro materiály puklinových výplní a horninové matrice (šedě označeno; Havlová et al. 2019).....	146
Tab. 18 Medián délky transportní cesty – srovnání výsledků použitých SW	151
Tab. 19 Medián doby zdržení – srovnání výsledků použitých SW	151
Tab. 20 Shrnutí vybraných geochemických charakteristik studovaných bentonitů; kationtová výměnná kapacita, CEC, byla stanovena jednak z úbytku mědi pomocí UV-VIS spektrofotometrie a ze sumy vytěsněných kationtů.....	159
Tab. 21 Shrnutí vybraných geotechnických charakteristik bentonitu BCV a z něho připravených forem; SI swell index, w_L mez tekutosti, k součinitel hydraulické vodivosti a σ_{sw} bobtnací tlak při dané objemové hmotnosti ρ_d	160
Tab. 22 Výsledky difúzních experimentů s plošným zdrojem s ^{125}I a ^{22}Na na homoionních formách bentonitu; DW – demineralizovaná voda.....	161

Tab. 23 Výsledky sorpčních experimentů s ^{85}Sr , ^{133}Ba a ^{233}Ba na bentonitu BaM ekvilibrovaném s vodou SGW2.....	162
Tab. 24 Aktualizované hodnoty efektivních difúzních koeficientů (ND = nebyl detekován průnik stopovače).....	174
Tab. 25 Identifikované parametry DFN sítě pro lokalitu Čertovka	213
Tab. 26 Celkový přehled provedených prací na 9 lokalitách	222
Tab. 27 Kritéria a jejich indikátory významné z hlediska dlouhodobé bezpečnosti, hodnocená pro danou lokalitu s cílem vyhodnocení lokalit pro umístění HÚ (Vondrovic et al. 2019).....	228

Seznam použitých zkratk:

1D	jednorozměrný
2D	dvourozměrný
3D	trojrozměrný
ABM	alternativní tlumící materiál
ADFNE	program pro hydrogeologické modelování (Alghalandis Discrete Fracture Network Engineering)
AMS	anizotropie magnetické susceptibility
ARP 2011	Projekt SÚRAO „Aktualizace referenčního projektu 2011“
ARP	Aktualizace referenčního projektu hlubinného úložiště radioaktivních odpadů v hypotetické lokalitě
AV ČR	Akademie věd České republiky
AZ	Atomový zákon, Zákon č. 263/2016 Sb.
BAT	best available technology
BaM	označení českého bentonitu (Bentonit a Montmorillonit)
BCV	označení českého bentonitu (Bentonit Černý vrch)
BDCF	biosférické dávkové konverzní faktory
BDZ	borehole disturbed zone
BET	metoda pro stanovení měrného povrchu pevných materiálů
BIOMASS	Biosphere Modelling and Assessment – koordinovaný výzkumný projekt IAEA
BIOPROTA	výzkumná platforma pro řešení nejistot při posuzování radiologických dopadů uvolňování radionuklidů s dlouhým poločasem života na biosféru
BSW	bentonitová syntetická voda
CAL	Centrální analytická laboratoř ÚJV Řež, a. s.
CCBM	compact conical borehole ended monitoring
CCBO	compact conical borehole ended overcoring
CEC	kationtová výměnná kapacita
CEG	Centrum experimentální geotechniky Fakulty stavební ČVUT v Praze
CPM	continuous porous medium
CSH	hydrosilikátové fáze
CVŘ	Centrum výzkumu Řež
CWFM	continuous wave frequency modulated
ČGS	Česká geologická služba
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav
ČR	Česká republika
ČSN	česká technická norma
ČVUT	České vysoké učení technické v Praze
DB	dokumentační bod
DECOVALEX	Development of Coupled Models and their Validation against Experiments
DEM	digitální model reliéfu
DFN	diskrétní puklinová síť (discrete fracture network)
DGR	deep geological repository (hlubinné úložiště)
DIAMO	DIAMO, státní podnik Stráž pod Ralskem
DMR	digitální model reliéfu 4. generace
DMS	distribuovaný monitorovací systém
DPZ	dálkový průzkum Země
DRS	počítačový model
DTM	model duálního transportu

DTS	technologie monitoringu prostorového rozložení teplot pomocí optického vlákna
DW	demineralizovaná voda
EB	inženýrské bariéry
EC	European Commission
EDU	jaderná elektrárna Dukovany
EDU-Z	lokalita Dukovany-západ
EDZ	Excavation Damaged Zone
EdZ	Excavation Disturbed Zone
EK-10	palivový soubor
EMS-98	Evropská makroseismická stupnice z roku 1998
ENDF/B – VII	Evalúovaná knihovna jaderných dat, ver. VII
EPM	ekvivalentní porézní médium (equivalent porous media)
ERT	elektrická odporová tomografie
ET	expertní tým
ETE	jaderná elektrárna Temelín
ETE-J	lokalita Temelín-jih
EU	Evropská unie
EUVN	European Vertical GPS Reference Network
FEBEX	Full-scale Engineered Barriers Experiment
FEFLOW, verze 6.0	program pro modelování transportu radionuklidů
FEP	features, events, processes (jevy, procesy a události)
FJFI	Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská ČVUT v Praze
Flow123d	program pro numerické modelování
FORGE	Fate Of Repository Gases
FSv	Fakulta stavební ČVUT v Praze
FTIR	Fourierova infračervená spektroskopie
GBI	Geosphere-Biosphere Interface
Gd1	typ palivového souboru
Gd2M	typ palivového souboru
Gd2M/Gd2M+	typ palivového souboru pro reaktor VVER-440
GeoDFN	geologický model
GoldSim	počítačový program
GPS	Global Positioning System
GREET	Hydro-mechanical-chemical-biological processes during groundwater recovery
GRS	Gesellschaft für Anlagen-und Reaktorsicherheit
GTS	Grimsel Test Site
GWB	The Geochemist's Workbench
GWFTS	Ground Water Flow and Transport of Solutes
GWV	groundwater vistas (počítačový program)
H	hydrologický
HC	metoda polovičního bločku
HCD	Hydraulic Conductor Domains
HG	hydrogeologický
HM	hydro-mechanický anebo heavy metal (těžký kov, myšlen uran)
HMM	homogeneous Mixture Model
HTO	tritiovaná voda
HÚ	hlubinné úložiště
HydroDFN	hydrogeologický model
IAEA	International Atomic Energy Agency
ICRP	International Commission on Radiological Protection
ID	identifikační číslo
IGD-TP	Implementing Geological Disposal Technology Platform
INBEB	Interactions in Bentonite Engineered Barriers

IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IRB	Fe redukující bakterie
IRF	Instant Release Fraction (okamžitě uvolnitelná frakce)
IRT-2M	palivový soubor výzkumného reaktoru
ISC	seismologické centrum
ISO	mezinárodní normy ve všech oblastech normalizace
ISŘ	integrováný systém řízení
J	jih
JAVYS	Jadrová a vyradovacia spoločnosť, a. s.
JE	jaderná elektrárna
JJV	jihojihovýchod
JJZ	jihojihozápad
JV	jihovýchod
JZ	jihozápad
KJCH	Katedra jaderné chemie FJFI ČVUT v Praze
KP	korozní produkt
LaP	limity a podmínky
LSC	kapalinová scintilační spektrometrie
LTDE-SD	Long Term Sorption Diffusion Experiment
MIR1200	tlakovodní reaktor nabízený konsorciem firem ŠKODA JS a.s., Atomstrojexport a.s. a OKB Gidopress
MIS	marinní izotopový stupeň
MK	manažer kvality projektu
MLMC	Multilevel Monte Carlo (matematická metoda)
MOx	mixed oxide fuel; směsné oxidické palivo
MPO TIP	zde projekt Ministerstva průmyslu a obchodu, v programu TIP, FR-TI1/362
MPO	Ministerstvo průmyslu a obchodu
MS	manuscript
MUNI	Masarykova univerzita v Brně
NAGRA	National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste (švýcarská waste management organizace)
NEA	Nuclear Energy Agency
NEWT	výpočetní sekvence programu SCALE
NRB	denitrifikační bakterie
NJZ	nový(é) jaderné zdroj(e)
o.z.	odštěpný závod
OK	organizační koordinátor projektu
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
PA	performance assessment
PAMINA	Performance Assessment Methodologies in Application to Guide the Development of the Safety Case – projekt 6. rámcového programu Evropské komise
PB	pozorovací bod
PDE	příkon dávkového ekvivalentu
PGA	peak ground acceleration
PGD	peak ground displacement
PGV	peak ground velocity
PK	plán kvality projektu
PM	plán managementu projektu
POSIVA	finská odborná organizace pro nakládání s jadernými odpady
PPMV	objemová část v milionu (parts per milion volume)
PS	metoda plošného zdroje
PVP	podzemní výzkumné pracoviště Bukov

PWR	Pressurized Water Reactor – tlakovodní reaktor
RAO	radioaktivní odpad(y)
RCP	reprezentativní vývoj koncentrace
RN	radionuklid
ŘV	řídící výbor
S	sever
s.p.	státní podnik
SBPOW	syntetická bentonitová pórová voda
SGW	syntetická granitická voda
SGW2	syntetická podzemní voda (odpovídá složení podzemní vodě z PVP Bukov, cca 500 m. pod povrchem); Červinka et al. (2016)
SGW3	syntetická podzemní voda (odpovídá složení podzemní vodě z PVP Bukov z hlubokého oběhu) Červinka et al. (2016)
SGW-UOS	syntetická podzemní voda, použitá při studiu životnosti ÚOS (Červinka et al. 2015; Gondolli et al. 2018c)
SHE	standardní vodíková elektroda
S-JTSK	systém jednotné trigonometrické sítě katastrální
SKB	Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company (švédská waste management organizace)
SRA	Scientific research agenda
SRB	síru redukující bakterie
SSR	Safety Standards (forma výstupů IAEA)
SSV	severoseverovýchod
SSZ	severoseverozápad
SÚJB	Státní úřad pro jadernou bezpečnost
SÚRAO	Správa úložišť radioaktivních odpadů
SÚRO	Státní ústav radiační ochrany
SW	software
SV	severovýchod
SZ	severozápad
TD	průniková difúzní metoda
TDE	Through-Diffusion experiment
THMC	termo-hydro-mechanicko-chemické procesy
TUL	Technická univerzita v Liberci
TVSA–T	typ palivového souboru pro reaktor VVER-1000
ÚGN	Ústav geoniky AV ČR
ÚJV	ÚJV Řež, a. s.
UOS	ukládací obalový soubor
UOx	oxid(y) uranu
URL	underground research laboratory (podzemní výzkumná laboratoř)
URZ	uzavřený radionuklidový zářič
ÚSMH	Ústav mechaniky a struktury hornin AV ČR
V/P výbor	vědecký/programový výbor
VAO	vysoce aktivní odpad
VBK	vlákno-betonový kontejner
VCP	věcný a časový plán projektu
VITA	označení vrtu v podzemní laboratoři Josef, ČVUT; zdroj podzemní vody pro některé experimenty
VJP	vyhořelé jaderné palivo
VJV	východojihovýchod
VSV	východoseverovýchod
VŠCHT	Vysoká škola chemicko-technologická v Praze
VTK	vědecko-technický koordinátor projektu

VUP	vlastnosti, události, procesy (ad FEP)
VVANTAGE-6	typ palivového souboru pro reaktor VVER-1000
VVER-1000	typ vodo-vodního energetického reaktoru
VVER-440	typ vodo-vodního energetického reaktoru
VVZ	věstník veřejných zakázek
XRD	X-ray diffraction; stanovení fázového složení
XRF	X-ray fluorescence; stanovení chemického složení
WPDE	Water Phase Diffusion Experiment
ZIZ	zdroj(e) ionizujícího záření
ZJZ	západojihozápad
ZL	zadávací list

Rozšířený abstrakt

Projekt Výzkumná podpora bezpečnostního hodnocení hlubinného úložiště (HÚ) představuje jeden z největších uceleně zaměřených projektů SÚRAO (dále Projekt). Cílem Projektu bylo získat data, modely a argumenty a další informace potřebné pro podporu potřeb pracovníků SÚRAO při hodnocení bezpečnostních charakteristik zkoumaných lokalit. Výzkumná podpora pro bezpečnostní hodnocení hlubinného úložiště je nezbytná pro bezpečnostní analýzy, kterými se prokazuje bezpečnost hlubinného úložiště, což je jedno z rozhodujících kritérií při výběru lokalit pro umístění HÚ. Podpora byla poskytována v následujících oblastech:

- i. Chování vyhořelého jaderného paliva (dále jen VJP) a forem radioaktivních odpadů (dále jen „RAO“) nepřijatelných do přípovrchových úložišť v prostředí hlubinného úložiště.
- ii. Chování obalových souborů pro VJP a RAO nepřijatelných do přípovrchových úložišť v prostředí hlubinného úložiště.
- iii. Chování tlumících a výplňových materiálů a dalších konstrukčních materiálů a jevů a procesů v prostředí hlubinného úložiště.
- iv. Řešení úložných vrtů.
- v. Chování horninového prostředí.
- vi. Transport radionuklidů z úložiště.
- vii. Výzkum charakterizace horninového prostředí.

Projekt pracoval s 9 potenciálními lokalitami, a to Březový potok, Čertovka, Čihadlo, Janoch (ETE-J), Horka, Hrádek, Kraví hora, Magdaléna, Na Skalním (EDU-Z).

Tato zpráva shrnuje průběh řešení projektu, jeho cíle a výsledky. V prvních kapitolách jsou definovány požadavky na řešení projektu, způsob řešení projektu a řešitelský kolektiv.

V letech 2014-2020 bylo v řešitelském týmu hlavního dodavatele ÚJV Řež, a. s. a 7 hlavních subdodavatelů (Česká geologická služba, Progeo spol. s r.o., ČVUT v Praze, Technická univerzita v Liberci, Centrum výzkumu Řež, Ústav geoniky AV ČR, Chemcomex, a.s.) řešeno 44 dílčích projektů za celkové účasti cca 240 odborníků. Za šest let trvání projektu bylo vydáno téměř 240 průběžných a závěrečných zpráv, z toho 36 v anglickém jazyce, dále mapové podklady, geologické a hydrogeologické modely, odborné publikace, konferenční příspěvky apod. Výsledkem byly samozřejmě i metodiky, vyvíjené zejména s cílem charakterizovat horninové prostředí, soubory dat, které jsou přímo použitelné pro hodnocení bezpečnosti, či validace modelů v mezinárodních benchmarcích. Největší počet ZL i zpráv byl vydán v oblasti podpory Chování horninového prostředí, kterou následovala oblast podpory Transport radionuklidů.

Vzhledem k rozsáhlosti a komplexnosti projektu bylo nedílnou součástí vypracování a implementace Plánu řízení projektu a Plánu kvality projektu. Projekt byl složen ze skupiny na sobě více či méně závislých dílčích projektů (zde nazývaných Zadávací listy, ZL), jejichž cíle směřovaly k naplnění základních cílů a požadavků projektu. Kroky procesu plánování a řízení ZL v projektu jsou popsány ve zprávě Prchal et al. (2020). Tento systém byl aplikován napříč subdodavatelským týmem, včetně akademických pracovišť.

V další části projektu je popsáno poskytování výzkumné podpory ve formě každého jednotlivého zadávacího listu (ZL), a to přehledně dle zařazení do jednotlivých oblastí poskytované podpory. V každém ZL je uveden autorský kolektiv, cíle řešení a jeho výsledky, nejistoty spojené s řešením a návrh dalších prací.

Ačkoli zadání projektu dělilo ZL do jednotlivých oblastí, celým projektem se komplexně prolínala vzájemná propojenost jednotlivých ZL, které buď navzájem tvořily návazný systém vstup – výstup, či tvořily clustery, skládající plnění cílů projektu.

Obecně se projektem, jak je shrnuto v kapitole Komplexní vyhodnocení, prolínají následující základní tématatické linky:

- Hodnocení bezpečnosti, a to včetně popisu vlastností a procesů bariér HÚ;
- Hodnocení lokalit;
- Vývoj/hodnocení modelových nástrojů;
- Vývoj metod, směřujících k popisu vlastností geologického prostředí.

Roční efektivní dávku na reprezentativní osobu jako základní legislativně daný limit pro hodnocení dlouhodobé bezpečnosti HÚ je možno kvantifikovat s pomocí výpočtu transportu radionuklidů z úložiště s uvážením různých scénářů vývoje hlubinného úložiště. Pro provedení pilotního výpočtu byla vybrána lokalita Kraví hora, pro kterou je v současnosti k dispozici nejvíce dat. Jako nutný předpoklad pro provedení, byť i pilotních výpočtů, bylo nutno kvantifikovat vlastnosti a procesy bariér HÚ, které vstupují do bezpečnostního výpočtu jako vstupní data, a to jak pro zdrojový člen, inženýrské bariéry i horninové prostředí. Výsledky tak poskytovaly vstupní podklady k provedení vlastních bezpečnostní výpočtů v rámci zadávacího listu Bezpečnostní rozbor HÚ v lokalitě Kraví hora. Dlouhodobá bezpečnost byla posuzována pro dva časové intervaly hodnocení 0-10 250 let s krokem 1 rok (hodnocení dopadu okamžitého poškození 10 UOS v čase 10 000 let) a 0-1 milion let s krokem 100 let (hodnocení postupného selhávání 60 UOS po vypršení jejich životnosti). Z provedeného výpočtu vyplývá, že pro zvolený centrální scénář v obou časových intervalech hodnocení nedojde k překročení stanovené dávkové optimalizační meze $0,25 \text{ mSv rok}^{-1}$ – maximum vypočtené roční efektivní dávky na reprezentativní osobu dosahuje hodnoty $0,136 \text{ mSv rok}^{-1}$ (54,4 % dávkové optimalizační meze) v roce 10 020 (20 let po náhlém poškození 10 UOS současně v jednom roce).

Provedení celého procesu bezpečnostního hodnocení s využitím dat z reálného prostředí potenciální lokality prokázalo, že v realizačním týmu je dostatek dat, argumentů, znalostí a výpočetních nástrojů, které umožňují provedení bezpečnostního hodnocení na odpovídající úrovni a vyhodnotit legislativně požadované hodnoty pro reprezentativní osoby, žijící na lokalitě. Pro další zúžení počtu lokalit na hlavní a záložní lokalitu v dalším procesu vývoje HÚ je provedení bezpečnostního hodnocení na každé z lokalit, podložené výsledky recentního invazivního průzkumu do předpokládané hloubky HÚ, nezbytně nutné.

Druhým významným cílem bylo shromáždění podkladů pro hodnocení vhodnosti 9 potenciálních lokalit pro umístění HÚ pro VJP a RAO z hlediska hodnocení dlouhodobé bezpečnosti. Pro proces zúžení počtu lokalit bylo celkem připraveno 22 zpráv shrnujících geologické a hydrogeologické charakteristiky, založené na recentní geofyzikálních měřeních, poznatky o stabilitních charakteristikách (geomorfologie, klima, seismika) a o charakteristikách, které by mohly ovlivnit budoucí antropogenní vstupy do prostor HÚ (přítomnost nerostných surovin apod.). Kritéria, popsaná a hodnocená v těchto zprávách, a jejich vyhodnocení přímo vstoupila do procesu porovnání potenciálních lokalit a přispěla k předložení návrhu zúžení počtu lokalit na 4. Po vlastním hodnocení a po vyjádření Poradního panelu expertů SÚRAO k předloženému hodnocení byl návrh preferovaných lokalit pro další etapu prací SÚRAO předán nadřízenému ministerstvu (Ministerstvu průmyslu a obchodu ČR). Po mezirezortním připomínkovém řízení bude návrh preferovaných lokalit postoupen vládě ČR

k odsouhlasení (Vondrovic et al. 2020). V další fázi přípravy HÚ v ČR pak budou další práce pokračovat prakticky výhradně na vybraných 4 lokalitách.

Jedním z požadovaných kritérií při posuzování vhodnosti horninového masivu pro situování HÚ je absence regionálních vodivých zón v izolační části úložiště. Není však možné vyloučit přítomnost menších vodivých zón, které mohou tvořit část preferenčních cest z prostor HÚ do biosféry. Vzniká tak potřeba testovat transport radionuklidů přes puklinové systémy procházející prostorem ÚOS do návazných puklinových systémů s napojením do biosféry. Celým projektem se tedy prolínal i vývoj modelů a jejich verifikace, které by umožnily detailní popis puklinového prostředí a migrace radionuklidů, případně i komplexního modelu hodnocení bezpečnosti. Šlo především o následující témata řešení:

- Vývoj DFN (discreet fracture network) modelů popisujících reálně puklinovou síť horninového masivu;
- Vývoj propojení deterministických modelů popisujících puklinovou síť, hydrogeologii a transport radionuklidů na komplexní model v prostředí GoldSim, který hodnotí dlouhodobou bezpečnost HÚ a dopad na člověka a životní prostředí;
- Vývoj jednotlivých kompartmentů komplexního modelu v prostředí GoldSim (blízké pole, biosféra);
- Validace modelů v rámci mezinárodních benchmarkových projektů (Ground Water Flow and Transport of Solutes, GWFTS; Decovalex) nebo se zahraničními partnery (GRS Braunschweig).

Poslední oblastí řešení Projektu byl rozvoj metod pro charakterizaci, hodnocení a monitoring horninového prostředí pro účely podpory hodnocení bezpečnosti. Tyto metody je nutno ověřit ještě před jejich rutinním použitím pro charakterizaci horninového prostředí kandidátních lokalit. Pro tyto účely sloužila dvě podzemní pracoviště, a to podzemní výzkumné pracoviště (PVP) Bukov v prostoru uzavřeného dolu Rožná (SÚRAO; <https://www.pvpbukov.cz/o-pvp-bukov/>), a vodárenský přivaděč Bedřichov (TUL).

V popisu každého ZL byla uvedena i detailní doporučení pro další práce. V kapitole 6 byla tato doporučení zobecněna a uvedena pro každou oblast poskytované podpory.

Ukončením projektu Výzkumná podpora bezpečnostního hodnocení HÚ a návrhem zúžení počtu lokalit z 9 na 4 se uzavírá významná etapa v programu vývoje HÚ v ČR. Pro úspěšné pokračování programu vývoje HÚ v ČR je možno doporučit především zachování stávajícího týmu řešitelů, který v současné době dosáhl evropské úrovně, a to především v oblasti vývoje HÚ v krystalických horninách. Nelze opomenout ani výchovu mladé generace, neboť cesta k otevření HÚ v roce 2065 je dlouhá a uchování vědomostí a zkušeností je nutností. Provázanost s dalšími projekty, jako je např. projektové řešení či vývoj technologických komponent je taktéž zcela nevyhnutelné. A konečně – jen zahájení výzkumných a průzkumných prací přímo na lokalitách bude posouvat program vývoje HÚ v ČR do další fáze.

Klíčová slova

Hlubinné úložiště, bezpečnostní hodnocení, inženýrské bariéry, výběr lokalit

Executive summary

The Research Support for the Safety Assessment of the Deep Geological Repository (DGR) project (hereinafter referred to as the “project”) comprised one of the most extensive comprehensively focused projects ever conducted for SÚRAO. The aim of the project was to determine the data, models, arguments and other information required to support the needs of SÚRAO concerning the safety assessment of deep geological repository at potential sites. Research support is necessary for the compilation of safety analyses that serve to prove the safety of the facility, which comprises one of the most decisive criteria in the overall DGR site selection process. Support was provided in the following areas:


- viii. The behaviour of SNF and forms of RAW that are unacceptable for disposal in near-surface repositories, in the deep geological repository environment;
- ix. The behaviour of SNF and RAW waste disposal packages (WDP) in the deep geological repository environment;
- x. The behaviour of damping, backfill and other construction materials in the deep geological repository environment;
- xi. The design of the disposal wells and their influence on the properties of the surrounding rock environment;
- xii. The behaviour of the rock environment;
- xiii. The transport of radionuclides from the repository;
- xiv. Research on rock environment characterisation.

The project considered 9 candidate sites, i.e. Březový potok, Čertovka, Čihadlo, Janoch (ETE-S), Horka, Hrádek, Kraví hora, Magdaléna and Na Skalním (EDU).

This report provides a summary of the progress of the project, its objectives and results. The first chapters define the requirements of, and the approach adopted concerning, the design of the project, and the research team.

During the period 2014 - 2020, the research team of the main supplier, ÚJV Řež, a.s. and those of 7 principal subcontractors (Czech Geological Survey, Progeo spol. s.r.o., CTU in Prague, Technical University of Liberec, Research Centre Řež, Institute of Geonics of the Czech Academy of Sciences, and Chemcomex) conducted 44 partial projects with the participation of a total of around 240 experts. During the six years of the project, almost 240 interim and final reports (of which 36 were translated into English) as well as maps, professional publications, conference papers, etc. were published, and a range of geological and hydrogeological models were constructed and applied. The results included methodologies for the characterisation of the rock environment and data sets that can be employed directly for both safety assessment purposes and the validation of models via international benchmarking procedures. The largest number of reports and partial reports concerned the provision of support for the “behaviour of the rock environment” and the “transport of radionuclides” study areas.

Due to its scale and complexity, the development and implementation of the so-called Project Management Plan and the Project Quality Plan formed an integral part of the project. The project comprised a set of more or less inter-dependent partial projects, the aims of which were to fulfil the basic objectives and requirements set by the Client. The various stages involved in the partial report planning and management process are described in detail in a

 SÚRAO	Závěrečná zpráva projektu Výzkumná podpora pro bezpečnostní hodnocení HÚ	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 462/2020

report by Prchal et al. (2020). This organisational system was applied across the subcontracting team network, including the various academic institutions involved.

Part of the project was devoted to a description of the provision of research support presented in the form of the various partial reports and according to their classification into specific areas of support. Each partial report provides details of the team of authors, the aims and results of the research, the uncertainties involved in the research and proposals for further research.

Although the project plan required its division into partial projects focusing on specific research areas, the various partial projects were comprehensively interconnected in the form either of continuous input-output systems or clusters aimed at the overall fulfilment of the project objectives.

In general, the following basic areas interconnected with the project, as summarised in the Comprehensive Assessment chapter of the report:

- The safety assessment, including a description of the properties of, and the processes affecting the engineered barriers of the DGR;
- The site evaluation;
- The development/assessment of modelling tools;
- The development of methods aimed at forming a description of the properties of the geological environment .

The annual effective dose per representative person (as the basic legislative limit for the assessment of the long-term safety of the DGR) can be quantified by calculating the transport of radionuclides from the repository, fully taking into account the various DGR development scenarios. The Kraví hora site (for which the most data was available) was selected for the pilot transport calculation. A necessary prerequisite for the performance of even pilot calculations comprises the quantification of the properties and processes of the various barriers of the DGR that are included in the safety calculation as input data concerning the source member, the engineered barriers and the rock environment. The results thus provided input data for the determination of site-specific safety calculations as part of the Safety Analysis of the DGR at the Kraví hora site partial project. Long-term safety was assessed with concern to two assessment intervals, i.e. 0 - 10 250 years with 1-year steps (the assessment of the impact of immediate damage to 10 WDPs over 10,000 years) and 0 - 1 million years with 100-year steps (the assessment of the gradual failure of 60 WDPs following the expiry of their expected lifetimes). The calculation determined that for the selected central scenarios of both time assessment intervals, the set dose optimisation limit of 0.25 mSv/year would not be exceeded, i.e. it was determined that the maximum calculated annual effective dose per representative person would not exceed a value of 0.136 mSv/year (54.4% of the dose optimisation limit).


The application of the safety assessment process employing data from the real environment of one of the candidate sites proved that the research team had sufficient data, arguments, knowledge and computational tools to both compile the safety assessments at the appropriate level and to assess compliance with legally-set values for a representative person living at the sites. In order to reduce the number of sites to a main and reserve site as part of the DGR development process going forward, it will be necessary to compile detailed safety assessments for each of the sites based on the results of invasive geological surveys conducted at the expected depth of the future DGR.

A further important objective was to gather data for the evaluation of the suitability of the 9 SNF and RAW DGR candidate sites for long-term safety assessment purposes. A total of 22 reports were compiled concerning the reduction of the number of sites that summarised the geological and hydrogeological characteristics based on recent geophysical measurements, current knowledge of the stability characteristics (geomorphology, climate, seismics) and those characteristics that might influence future anthropogenic intrusion into the DGR (the presence of minerals, etc.). The criteria described and assessed in these reports provided direct input for the candidate site comparison process and contributed towards the submission of a proposal to reduce the number of sites to 4. Following a detailed assessment of the research work by the SÚRAO Expert Advisory Panel, SÚRAO submitted a proposal of 4 preferred candidate sites recommended for the next phase of investigation work to the responsible ministry (the Ministry of Industry and Trade). Following the standard inter-ministerial comments procedure, the preferred site proposal will be submitted to the Government of the Czech Republic for final approval (Vondrovic et al. 2020). The next phase of DGR development in the Czech Republic will, thus, continue only at the 4 selected sites.

While one of the required criteria when assessing the suitability of rock masses for the siting of DGRs concerns the absence of regional conductive zones in the isolation part of the repository, it is not possible to rule out the presence of small-scale conductive zones which may provide so-called preferential pathways from the DGR to the biosphere. Thus, it is necessary to test the transport of radionuclides through fracture systems that traverse the WDP disposal area to other fracture systems that connect with the biosphere. Consequently, the project involved the development and verification of models that provide for the detailed description of the fracture environment and the migration of radionuclides, as well as a comprehensive safety assessment model that concerned principally the following topics:

- The development of procedures for the generation of fracture networks employing the DFN (discreet fracture network) method, which is more representative than procedures that apply the equivalent pore continuum (EPM) method that are commonly used for the description of geological massifs.
- The development of the integration of deterministic models that describe the fracture network, the local hydrogeology and radionuclide transport into the form of a complex model constructed in the Goldsim environment, which provides for the assessment of the long-term safety of the DGR and its impact on humans and the environment.
- The development of individual compartments of a complex model compiled in the Goldsim environment (near-field, biosphere).
- The validation of models in the context of international benchmark projects (Ground Water Flow and the Transport of Solutes, GWFTS; Decovalex) or with foreign partners (GRS Braunschweig).

The final research area covered by the project comprised the development of methods for the characterisation, assessment and monitoring of the rock environment for safety assessment support purposes. Since these methods must be verified prior to their routine application for the characterisation of the rock environments of the candidate sites, two underground facilities were selected for testing, i.e. the Bukov Underground Research Facility (URF) located in the former Rožná mine complex (SÚRAO; <https://www.pvpbukov.cz/o-pvp-bukov/>) and the Bedřichov water supply tunnel (TUL).

 SÚRAO	Závěrečná zpráva projektu Výzkumná podpora pro bezpečnostní hodnocení HÚ	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 462/2020

Each of the partial reports included detailed recommendations for further research work. These recommendations were subsequently generalised and presented with respect to each area of support in Chapter 6 of the report.

The completion of the Research Support for the Safety Assessment of the DGR project and the proposal to reduce the number of sites from 9 to 4 concludes a significant phase of the Czech DGR development programme. With respect to the continuation of the DGR development programme in the Czech Republic, support is recommended for the maintaining of existing teams of researchers which have reached the European scientific level, especially with concern to the siting of DGRs in crystalline rock massifs. Moreover, it is important that the education of young generations of scientists not be neglected since the path towards the opening of the Czech DGR in 2065 is multi-generational and the preservation of existing knowledge and experience is essential. It is also important that the various other related projects, e.g. design projects and the development of technological components be interlinked. And, finally, only the commencement of research and investigation work at the selected sites will move the Czech DGR development programme forward to the next phase.

Keywords

Deep geological repository, safety assessment, engineering barriers, site selection

1 Úvod

Lokalita pro hlubinné úložiště (HÚ) musí být charakterizována do úrovně podrobnosti dostačující k podpoře obecné znalosti charakteristik lokality a vývoje lokality v průběhu času. Charakteristika lokality musí zahrnovat její současný stav, její pravděpodobný přirozený vývoj a možné přírodní jevy, ale i lidské plány a činnosti v okolí, které mohou mít vliv na bezpečnost úložiště po dobu jeho existence. Musí také zahrnovat pochopení vlivu na bezpečnostní funkce, události a procesy spojené s lokalitou úložiště (viz IAEA SSR-5 Požadavek 15).

Charakterizace (popis) lokality je činnost prováděná za účelem pochopení přírodních prvků, událostí a procesů v lokalitě (v současné době, v minulosti a případně i v budoucnu) a odpovídajícím způsobem popisuje její prostorový a časový rozměr a variabilitu. Charakterizace lokality přispívá ke komplexnímu popisu lokality, který zahrnuje informace o antropogenních charakteristikách (např. využití území a dopravní infrastruktura pro environmentální studie).

Zhodnocení bezpečnosti úložiště radioaktivních odpadů na zvolených lokalitách jak před jeho uzavřením, tak i po jeho uzavření musí vycházet z rozboru scénářů definovaných na základě identifikace a analýzy vlastností, událostí a procesů, které mohou ovlivnit jeho bezpečnost. V případě vysokoaktivních odpadů a odpadů s nezanedbatelným množstvím dlouhodobých radionuklidů je třeba uvažovat časovou dobu prokázání bezpečnosti v řádu statisíců let. Je třeba identifikovat jak vlastnosti, procesy a události normálního vývoje úložiště, tak i vlastnosti, události a procesy, které mohou narušit normální vývoj úložiště včetně odhadu pravděpodobnosti jejich výskytu (například zemětřesení nebo permafrost). Tento požadavek není možné splnit bez potřebného poznání lokality, kde by mělo být úložiště umístěno, bez porozumění procesům probíhajícím v úložném systému a bez vytvoření koncepčních, matematických a výpočetních modelů, popisujících a predikujících vývoj úložného systému, zahrnujícího jak přírodní, tak i inženýrské bariéry. Všechny tyto modely navíc musí projít procesem validace a verifikace.

V roce 2014 tedy SÚRAO jako Objednatel zadal projekt „Výzkumná podpora bezpečnostního hodnocení hlubinného úložiště“, v němž hlavním úkolem pro Zhotovitele bylo poskytovat pro Objednatele výzkumnou podporu pro bezpečnostní hodnocení hlubinného úložiště, a to získat vybraná data, modely, argumenty a další informace, potřebné pro zhodnocení potenciálních lokalit pro umístění HÚ z hlediska dlouhodobé bezpečnosti.

Následně byl projekt ve formě dodatků 1–3 rozšířen i na oblast hodnocení lokalit z hlediska vhodnosti pro umístění HÚ s cílem podpořit proces zúžení počtu lokalit z 9 na 4 a byla v rámci něj produkována i podpůrná data a argumenty (např. ZL Geologická interpretace terénních geofyzikálních dat pro aktualizaci 3D strukturně-geologických modelů potenciálních lokalit HÚ), s prodlouženým plněním až do roku 2020.

Tato zpráva byla zpracována jako závěrečná zpráva projektu, na jehož řešení se podílelo více než 230 odborníků z více než 13 výzkumných organizací České republiky. Způsob řízení, koordinace a zajištění kvality projektu jsou popsány ve zprávě Prchal et al. (2020).

Zpráva shrnuje v 7 kapitolách výsledky řešení Projektu ve 39 zadaných zadávacích listech. 5 dílčích projektů bylo buď Objednatelem zrušeno nebo nepostoupilo k dalšímu řešení. V kapitole 2 jsou shrnuty cíle projektu a v kapitole 3 je popsán způsob jeho řešení. V nejrozsáhlejší kapitole 4 jsou shrnuty výsledky všech řešení dílčích projektů, a to především ve vztahu k cílům každého ZL. Popis řešení ZL je řazen na základě příslušnosti ZL k jednotlivým oblastem poskytované podpory. V každé subkapitole jsou také shrnuty nejistoty,

spojené s řešením či výsledky dílčího projektu a v návaznosti s tím i detailní návrh budoucích prací. Na konci každé kapitoly jsou ve výčtu uvedeny dosažené výstupy projektu. Odkazy k literatuře jiné, než jsou výstupy daného dílčího projektu, je možno nalézt v kapitole 8 Reference. V kapitole 5 jsou výsledky řešení dílčího projektů shrnuty a vyhodnoceny ve smyslu hlavních proudů řešení Projektu. Kapitola 6 shrnuje a zobecňuje návrhy dalších prací, a to zejména ve vztahu k hlavním oblastem poskytované podpory. Zprávu uzavírá shrnující kapitola 7 Závěr.

2 Cíle projektu

Cílem projektu Výzkumná podpora bezpečnostního hodnocení HÚ bylo získat data, modely, a argumenty a další informace potřebné pro podporu potřeb Objednatele, pracovníků SÚRAO při hodnocení bezpečnostních charakteristik zkoumaných lokalit. Výzkumná podpora pro bezpečnostní hodnocení hlubinného úložiště je nezbytná pro bezpečnostní analýzy, kterými se prokazuje bezpečnost hlubinného úložiště, což je jedno z rozhodujících kritérií při výběru lokalit HÚ. Předpokladem pro provedení finálního výběru dvou kandidátních lokalit je kromě realizace průzkumných geologických prací i zajištění dat, modelů a informací nezbytných pro posouzení, zda úložiště ve zkoumané lokalitě bude dlouhodobě bezpečné a proveditelné. Bezpečnostní charakteristiky bylo tedy nutno posuzovat co nejdříve při výběru vhodných lokalit, tj. ještě před fází podrobné charakterizace lokalit, což dále umožnilo i upřesnit či modifikovat kritéria pro výběr lokalit pro hlubinné úložiště. Důležitým posláním průběžného hodnocení bezpečnostních charakteristik bylo identifikovat nejistoty a oblasti výzkumu potřebné pro jejich odstranění či zmírnění jejich vlivu na dlouhodobou bezpečnost.

V rámci zadání byly konkretizovány následující oblasti poskytování výzkumné podpory pro bezpečnostní hodnocení hlubinného úložiště v rámci přípravy hlubinného úložiště, a to v oblastech (viz Příloha 1 Smlouvy):

1. Chování vyhořelého jaderného paliva (dále jen „VJP“) a forem radioaktivních odpadů (dále jen „RAO“) nepřijatelných do přípovrchových úložišť v prostředí hlubinného úložiště.
2. Chování obalových souborů pro VJP a RAO nepřijatelných do přípovrchových úložišť v prostředí hlubinného úložiště.
3. Chování tlumících a výplňových materiálů a dalších konstrukčních materiálů a jevů a procesů v prostředí hlubinného úložiště.
4. Řešení úložných vrtů.
5. Chování horninového prostředí.
6. Transport radionuklidů z úložiště.
7. Výzkum charakterizace horninového prostředí.

Díličí cíle a požadavky SÚRAO v rámci projektu jsou uvedeny v Tab. 1.

 SÚRAO	Závěrečná zpráva projektu Výzkumná podpora pro bezpečnostní hodnocení HÚ	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 462/2020

Tab. 1 Dílčí cíle a požadavky na řešení projektu

Oblast řešení	Požadavky na řešení	Odpovídající ZL
I. Chování VJP a forem RAO nepřijatelných do přípovrchových úložišť v prostředí hlubinného úložiště	Upřesnění inventáře radionuklidů v matici VJP, mezeře mezi povlakem a maticí VJP, konstrukčních materiálech VJP, inventáře RAO z vyřazování JE, vyřazených zářičů atd. na základě analýzy předchozích zpráv a nových informací z výsledků zahraničních projektů a případně dodatečných výpočtů, a identifikace nejistot, které je třeba vyřešit v další fázi přípravy úložiště.	Databáze VJP pro bezpečnostní rozborů
	Upřesnění a zdůvodnění hodnoty loužitelnosti VJP a RAO pro bezpečnostní rozborů, frakce okamžitě uvolnitelných radionuklidů v závislosti na stupni vyhoření paliva na základě analýzy výsledků zahraničních projektů, a identifikace nejistot, které je třeba vyřešit v další fázi přípravy úložiště.	Analýza výsledků EC projektu „First Nuclides“
	Shrnutí informací o vlastnostech ostatních forem RAO určených do HÚ (všechny odpady mimo VJP) do formy databáze a návrh postupu jejich testování a případně i vývoje optimálních forem odpadů.	Vlastnosti RAO nepřijatelných do přípovrchových úložišť Charakterizace RAO nepřijatelného do přípovrchového úložiště z vyřazování jaderné elektrárny – biologické stínění reaktoru
	Charakterizace ostatních vlastností RAO podle vyhlášky SÚJB 307/2002 Sb. a identifikace nejistot, které je třeba vyřešit v další fázi přípravy úložiště.	
II. Chování obalových souborů pro VJP a RAO nepřijatelných do přípovrchových	Zavedení metodiky hodnocení životnosti obalových souborů s cílem určit jejich střední životnost a parametry distribuce selhávání jednotlivých obalových souborů.	Experimenty s materiály UOS pro bezpečnostní rozborů Korozní produkty

Oblast řešení	Požadavky na řešení	Odpovídající ZL
úložišť v prostředí hlubinného úložiště		Test omezení koroze UOS využitím drenážní vrstvy v úložných vrtech
	Návrh a zahájení implementace laboratorního experimentálního programu zaměřeného na mikrobiální korozi materiálů obalových souborů.	Mikrobiální koroze
	Návrh a implementace vhodných modelových a výpočetních nástrojů pro stanovení maximálního množství obalových souborů, které mohou selhat v jednom roce v různých obdobích vývoje úložiště během 1 miliónu let, a identifikace nejistot, které je třeba vyřešit v další fázi přípravy úložiště.	
III. Chování tlumících a výplňových materiálů a dalších konstrukčních materiálů a jevů a procesů ovlivňujících jejich vlastnosti	Aktualizace poznatků o dlouhodobých vlastnostech tlumících, výplňových a konstrukčních materiálů a návrh podrobného laboratorního a <i>in-situ</i> výzkumného programu.	Verifikace metodiky pro stanovení kationtové výměnné kapacity bentonitu (metoda Cu-trien)
	Návrh a zahájení experimentální testování dlouhodobých vlastností tlumících, výplňových a konstrukčních materiálů a jejich interakce s ostatními bariérami a kritickými radionuklidy.	Experimentální hodnocení plynopropustnosti inženýrských bariér hlubinného úložiště
	Návrh programu modelování chování tlumících, výplňových a konstrukčních materiálů a predikce změny funkčních vlastností tlumících, výplňových a konstrukčních materiálů v různých obdobích vývoje úložiště během 1 milionu let a identifikovány nejistoty, které je třeba vyřešit v další fázi přípravy úložiště.	

Oblast řešení	Požadavky na řešení	Odpovídající ZL
IV. Řešení úložných vrtů	Definování požadavků na úložné vrtů z hlediska jejich vlivu na dlouhodobou bezpečnost úložiště, například: požadavky na porušenou zónu (EDZ), maximální přítoky do vrtu či odprýskávání (spalling).	Vznik a monitoring EDZ při výstavbě PVP Bukov
	Identifikace jevů, procesů a událostí majících vliv na kvalitu povrchu vrtů (typy horniny, hloubka, teplo, použité technologie) z hlediska jejich vlivu na dlouhodobou bezpečnost.	
	Návrh a implementace výzkumného programu pro kandidátní typy hornin z potenciálních lokalit zaměřeného na porozumění vlivu identifikovaných faktorů na dlouhodobou bezpečnost.	
	Návrh a implementace vhodných matematických a výpočetních nástrojů pro analyzování dlouhodobé geomechanické stability výrubů a výlomů.	
	Identifikace, a případně modelování, vlivu kvality vrtu na dlouhodobou bezpečnost úložiště, a identifikace nejistot, které je třeba vyřešit v další fázi přípravy úložiště.	
V. Chování horninového prostředí	Shrnutí dostupných dat o geologii a hydrogeologii potenciálních lokalit a vytvoření regionálních a lokálních hydrogeologických modelů pro potenciální lokality a všechny fáze vývoje úložiště (před zahájením hornické činnosti, po zahájení hornické činnosti, při provozu, po uzavření) v horizontu 1 milionu let, zohledňujícího všechny důležité jevy, procesy a události. Podrobnost připravených modelů bude postupně zvyšována s rostoucím množstvím znalostí z lokalit.	Studie napjatostních poměrů a vnitřní anizotropie v prostředí granitických hornin Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov Příprava experimentů v PVP Bukov

Oblast řešení	Požadavky na řešení	Odpovídající ZL
		Plán experimentů PVP Bukov pro podporu bezpečnostního rozboru lokality Kraví hora
	Pilotní vytvoření 3D strukturně-geologického modelu (Site Descriptive Model) pro potenciální lokality.	3D strukturně-geologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště
	Vytvoření nástrojů pro 3D vizualizaci geologických, hydrogeologických a geochemických dat pro bezpečnostní rozbor a projektové řešení úložiště.	Hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště
	Shrnutí dostupných dat o tektonickém/seizmickém stavu potencionálních lokalit a jejich předpokládaném vývoji a vytvoření tektonických/seizmických modelů ve všech fázích vývoje úložiště (před zahájením hornické činnosti, po zahájení hornické činnosti, při provozu, po uzavření) v horizontu 1 milionu let, zohledňující všechny důležité jevy, procesy a události. Modelové zhodnocení vlivu tektonických změn na pohyby horninových bloků v jednotlivých lokalitách a následně na možnost poškození obalových souborů umístěných v hlubinném úložišti. Podrobnost připravených modelů bude postupně zvyšována s rostoucím množstvím znalostí z lokalit.	Seismická stabilita území
	Kvalifikovaný odhad eroze a denudace v potencionálních lokalitách v horizontu 1 000 000 let.	Erozní stabilita území
	Kvalifikovaný odhad klimatických změn v potencionálních lokalitách v horizontu 1 000 000 let.	Klimatická stabilita území
	Shrnutí dostupných dat o geochemickém vývoji potencionálních lokalit s využitím existujících dat a vytvoření komplexního geochemického modelu pro všechny fáze vývoje úložiště (před zahájením hornické činnosti, po zahájení	Příprava geochemického modelu úložiště

Oblast řešení	Požadavky na řešení	Odpovídající ZL
	<p>hornické činnosti, při provozu, po uzavření) v horizontu 1 milionu let, zohledňující všechny důležité jevy, procesy a události včetně vlivu inženýrských bariér a dalších konstrukčních prvků (například změna redukčního prostředí na oxidační a naopak). Podrobnost připravených modelů bude postupně zvyšována s rostoucím množstvím znalostí z lokalit.</p>	
	<p>Shrnutí hodnot rozpustnosti/speciace kritických radionuklidů při využití konzervativních, ale reálných dat z připravených geochemických modelů. Výstupem práce bude tabulka maximální koncentrace radionuklidů v prostředí potencionálních lokalit s využitím všech dostupných dat a informací, a to ve formě vhodné pro deterministické a pravděpodobnostní modelování.</p>	
	<p>V první fázi do roku 2016 budou připraveny modely na základě dostupných dat z existujících zdrojů, dat získaných z povrchu a dat ze zahraničních hlubinných vrtů a podzemních laboratoří v krystalických horninách. Předpokládá se, že hlubinné vrty na lokalitách budou realizovány až v projektu podrobnějšího geologického průzkumu lokalit (2016–2018).</p>	
VI. Transport radionuklidů z úložiště	<p>Odhad preferenčních cest pro migraci radionuklidů v potencionálních lokalitách z úložiště do životního prostředí se zvážením vývoje lokality a návrh průzkumných prací pro jejich upřesnění. Testování různých způsobů stanovení preferenčních cest pro transport radionuklidů z úložiště do životního prostředí v potencionálních lokalitách s využitím vytvořených hydrogeologických modelů.</p>	<p>Vstupní parametry a procesní modely pro hodnocení transportu radionuklidů přes horninové prostředí</p> <p>Aktualizace integrovaného, transportního modelu pro hodnocení dlouhodobé bezpečnosti</p> <p>Vývoj a ověřování metodik modelování THMC procesů v rámci mezinárodního projektu DECOVALEX 2019</p>

Oblast řešení	Požadavky na řešení	Odpovídající ZL
	<p>Shrnutí dat pro hodnocení migračních vlastností inženýrských bariér (bentonitu, a případně bentonitu s příměsí inertních přísad) a horninového prostředí krystalických hornin (rozpuštěnosti, sorpční a difúzní koeficienty) na základě analýzy dostupných zahraničních databází a recenzovaných publikací. Přednostně budou data uvedena ve formě distribučních funkcí hodnot migračních parametrů pro definované podmínky měření a definovaný materiál. V případě, že dostupné distribuční funkce nebudou dostupné, budou uvedeny naměřené hodnoty z recenzovaných publikací včetně přesných podmínek měření a budou diskutovány nejistoty.</p>	<p>Vstupní parametry a procesní modely pro hodnocení transportu radionuklidů přes inženýrské bariéry</p>
	<p>Shrnutí a aktualizace dostupných procesních modelů popisujících migraci radionuklidů přes inženýrské bariéry a horninové prostředí.</p>	<p>Testování transportních modelů s využitím <i>in-situ</i> zahraničních experimentů</p>
	<p>Identifikace všech jevů, procesů a událostí ovlivňujících transport radionuklidů (například vliv koloidů či mikroorganismů) a odhad jejich vlivu na hodnoty migračních parametrů.</p>	
	<p>Návrh a implementace laboratorního a <i>in-situ</i> experimentálního programu, ve kterém budou zhodnoceny transportní vlastnosti (difuzivita a sorpce) vzorků inženýrských bariér na bázi tuzemských surovin a hornin z kandidátních lokalit pomocí standardizovaných metod. Srovnání výsledků s daty ze zahraničních publikací.</p>	<p>Transport radionuklidů přes materiály na bázi cementu</p>
	<p>Aktualizace získaných dat pro bezpečnostní rozborů do formy databáze včetně identifikace zbylých nejistot.</p>	<p>Bezpečnostní rozbor HÚ v lokalitě Kraví hora</p>

Oblast řešení	Požadavky na řešení	Odpovídající ZL
	Identifikace nejistot, které je třeba vyřešit v další fázi přípravy úložiště.	Hodnocení nejistot transportu radionuklidů z hlubinného úložiště
VII. Výzkum charakterizace horninového prostředí	Analýza aplikovatelnosti metodik charakterizace horninového prostředí – identifikace a testování vybraných metodik, které je třeba zavést pro specifické prostředí hlubinného úložiště (např. podle čl. 1.25 až 52 IAEA SSG-14).	<p>Vývoj a ověřování metodik pro charakterizaci horninového prostředí</p> <p>Předběžné hodnocení lokalit z hlediska dlouhodobé bezpečnosti</p> <p>Geologická interpretace terénních geofyzikálních dat pro aktualizaci 3D strukturně-geologických modelů potenciálních lokalit HÚ</p> <p>Matematické modelování křehkého porušení horninového prostředí metodou DFN</p>

 SÚRAO	Závěrečná zpráva projektu Výzkumná podpora pro bezpečnostní hodnocení HÚ	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 462/2020

Následně byl projekt ve formě dodatků 1–3 rozšířen i na oblast hodnocení lokalit z hlediska vhodnosti pro umístění HÚ s cílem podpořit proces zúžení počtu lokalit z 9 na 4 a v jeho rámci byla predikována podpůrná data a argumenty (např. ZL Geologická interpretace terénních geofyzikálních dat pro aktualizaci 3D strukturně-geologických modelů potenciálních lokalit HÚ), s prodlouženým plněním až do roku 2020.

 SÚRAO	Závěrečná zpráva projektu Výzkumná podpora pro bezpečnostní hodnocení HÚ	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 462/2020


3 Způsob plnění projektu

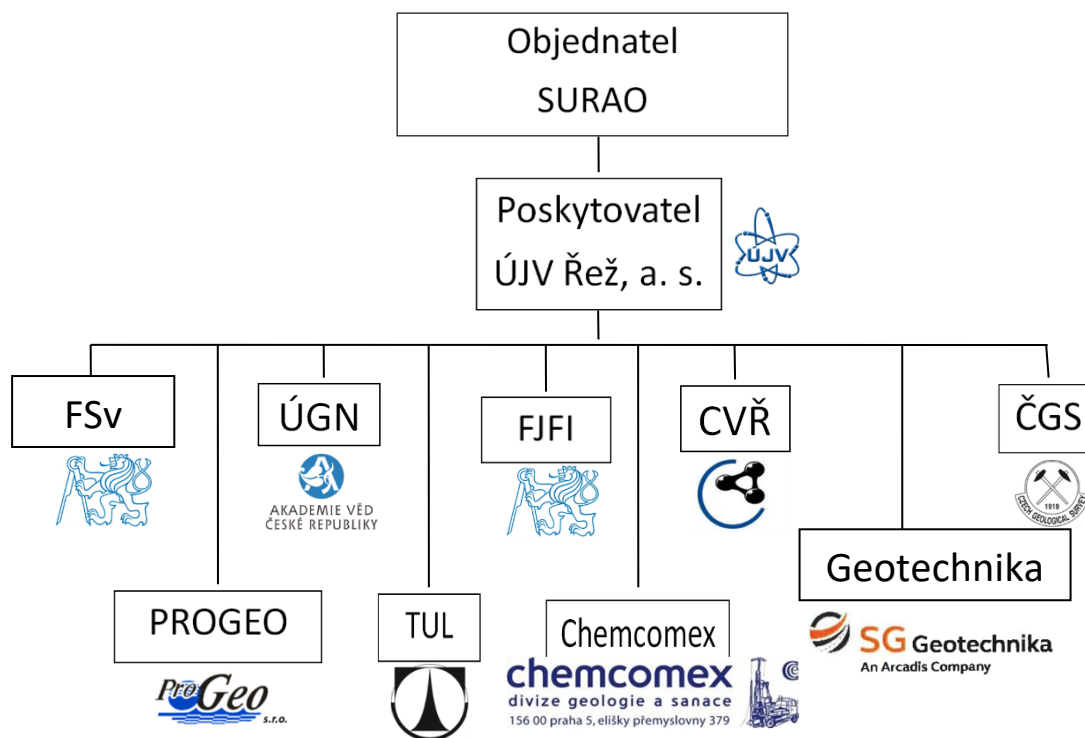
Na základě veřejného zadávacího řízení byla v červenci 2014 uzavřena čtyřletá smlouva s ÚJV Řež, a. s. a jeho subdodavateli: Českou geologickou službou; ČVUT v Praze; Technickou univerzitou v Liberci; Ústavem Geoniky AV ČR, v. v. i.; a společnostmi SG Geotechnika a.s.; PROGEO, s. r. o.; Chemcomex Praha, a. s., a Centrum výzkumu Řež s. r. o. o poskytování výzkumné podpory hodnocení dlouhodobé bezpečnosti v následujících oblastech:

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

Kromě hlavních dodavatelů působili v rámci řešení projektu i další významní subdodavatelé, jako Vysoká škola chemicko-technologická (VŠCHT) či Geotest, a.s. Celkově v průběhu řešení projektu působilo 232 odborníků.

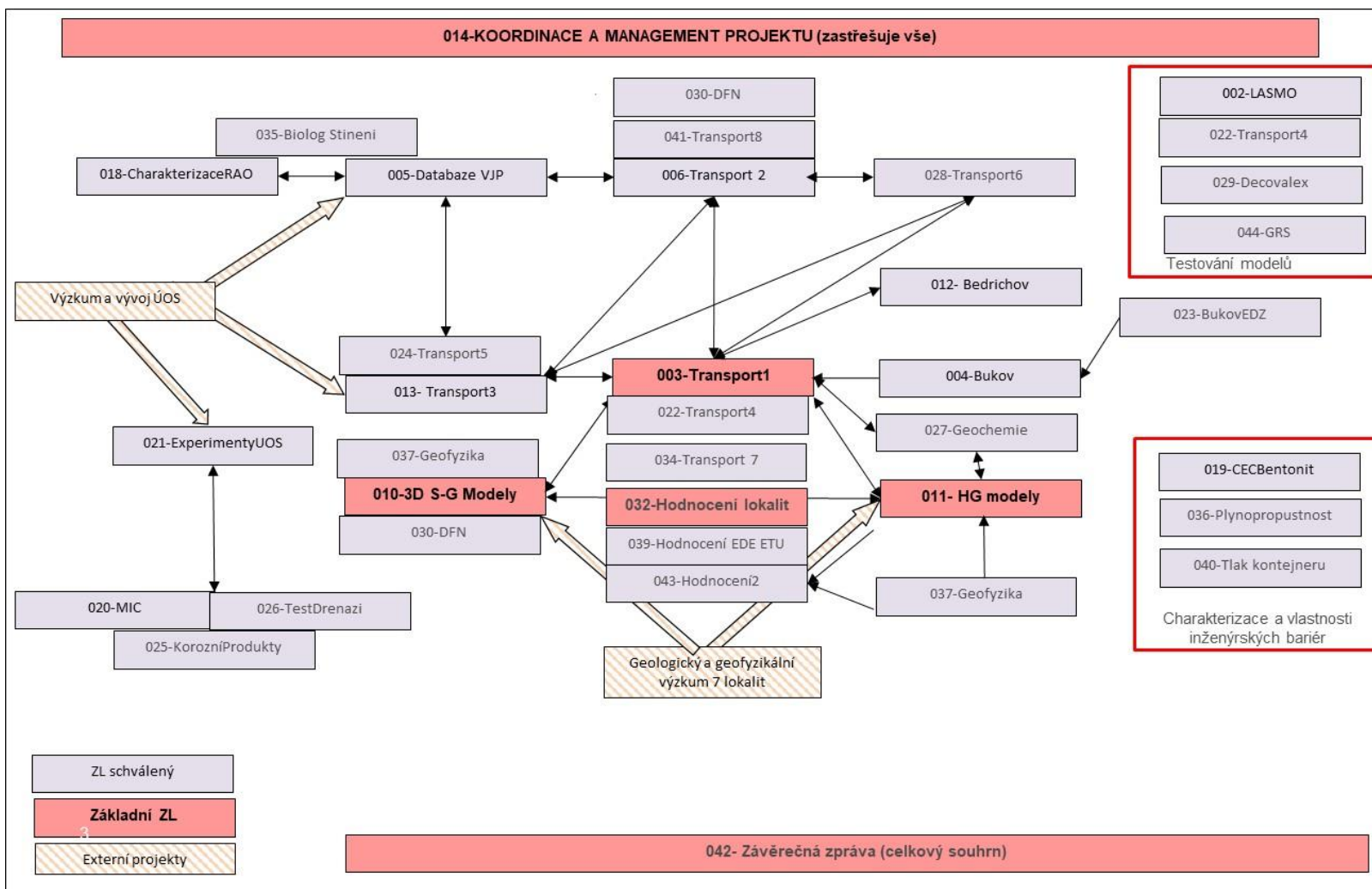
Systém plnění zakázky je uveden na následujícím obrázku Obr. 1. Řízení projektu je zakotveno v dokumentu Prchal a Scheinherr (2017).

 SÚRAO	Závěrečná zpráva projektu Výzkumná podpora pro bezpečnostní hodnocení HÚ	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 462/2020



Obr. 1 Schéma týmu pro realizace projektu

Projekt byl složen ze skupiny na sobě více či méně závislých dílčích projektů (zde nazývaných Zadávací listy, ZL), jejichž cíle směřovaly k naplnění základních cílů projektu. Požadavek na konkretizaci prací v jednotlivých ZL vydával Objednatel. Kroky procesu plánování a řízení ZL v projektu jsou popsány ve zprávě Prchal et al. (2020). Provázanost jednotlivých ZL je znázorněna na Obr. 2. Harmonogram projektu se řídil jednak základními milníky projektu, definovanými ve Smlouvě mezi Poskytovatelem a Objednatelem, jednak harmonogramy jednotlivých ZL, uvedenými ve Věcném a časovém plánu (VCP) každého ZL, včetně ZL PB-2015-ZL-S0046-014-Koordinace a management projektu (Prchal et al. 2020).



Obr. 2 Provázanost jednotlivých ZL v rámci projektu

4 Poskytování výzkumné podpory v rámci jednotlivých oblastí řešení

4.1 Chování VJP a forem RAO, nepřijatelných do přípovrchových úložišť, v prostředí hlubinného úložiště

4.1.1 Databáze VJP pro bezpečnostní rozbor (PB-2014-ZL-S2565-005- Databáze VJP)

Hlavní autoři: Rataj J.; Frýbort J.; Heraltová L.; Fejt F. (FJFI ČVUT v Praze)

4.1.1.1 Cíl ZL

Cílem plnění tohoto dílčího projektu bylo získat vstupní parametry a procesní modely pro přípravu zdrojového členu pro bezpečnostní rozbor.

Předmětem řešení tohoto dílčího projektu bylo především:

1. identifikace dostupných dat (stupeň vyhoření, obohacení, doba skladování, typ paliva atd.) o ozářených palivových souborech ze stávajících jaderných elektráren EDU a ETE a předpokládaných typech paliva pro 60 let životnosti elektráren;
2. návrh rozdělení jednotlivých palivových souborů z obou JE do několika skupin, například podle stupně vyhoření, typu paliva apod;
3. provést výpočet množství dlouhodobých nuklidů uvedených v tabulce (či další pouze po dohodě s objednatelem) k době po 60 letech skladování a zároveň vyjádřit jejich podíl na množství příslušného chemického prvku v palivu pro vybrané skupiny s využitím nejnovějších dostupných výpočetních kódů. Výpočty měly pokrývat jak dlouhodobé radionuklidy v palivu, tak i v konstrukčních materiálech palivových souborů a odhad kontaminace povrchu palivových souborů dlouhodobými nuklidy;
4. pro vybrané skupiny palivových souborů provést výpočty tepelného výkonu k 60 letům po skladování;
5. výsledky uspořádat do přehledné databáze tak, aby je bylo možno přímo využít v rámci připravovaného integrovaného transportního modelu.

Tab. 2 Tabulka požadovaných dlouhodobých radionuklidů

Aktivační produkty	Aktinidy					Štěpné produkty
	²²⁹ Th	²³⁰ Th	²³² Th			
¹⁰ Be						⁷⁹ Se
¹⁴ C	²³¹ Pa					⁹⁰ Sr
³⁶ Cl	²³³ U	²³⁴ U	²³⁵ U	²³⁶ U	²³⁸ U	⁹³ Zr
⁴¹ Ca	²³⁷ Np					⁹⁹ Tc
⁵⁹ Ni	²³⁸ Pu	²³⁹ Pu	²⁴⁰ Pu	²⁴¹ Pu		¹⁰⁷ Pd
⁶³ Ni	²⁴¹ Am	^{242m} Am	²⁴⁰ Am			¹²⁶ Sn
⁹³ Zr	²⁴⁴ Cm	²⁴⁵ Cm	²⁴⁶ Cm			¹²⁹ I
⁹³ Mo						¹³⁵ Cs
⁹⁴ Nb						¹³⁷ Cs
^{108m} Ag					²²⁶ Ra	¹⁵¹ Sm
^{166m} Ho						

4.1.1.2 Zhodnocení řešení projektu

Cílem ZL bylo získat vstupní parametry a procesní modely pro přípravu zdrojového členu vyhořelého jaderného paliva pro bezpečnostní rozbory. Pro účely dosažení cílů tohoto dílčího projektu byl připraven seznam palivových souborů a jejich výsledných vyhoření relevantní pro bezpečnostní rozbory českých jaderných elektráren. Jedná se o konstrukčně různé palivové soubory pro reaktory typu VVER-440 a dva typy palivových souborů pro VVER-1000: VVANTAGE-6 a TVSA-T. Vzhledem k účelu projektu bylo sledováno složení vyhořelého jaderného paliva po 65 letech od skončení vyhořívání. Ve vyhořelém palivu byly sledovány pouze nuklidy, které jsou důležité z hlediska nakládání s vyhořelým jaderným palivem a je pro ně určena jejich výsledná hmotnost a aktivita.

Hlavním výstupem tohoto dílčího projektu je databáze s výsledky výpočtů (Rataj et al. 2015b). Výsledky jsou rozděleny na základě typu reaktoru a povahy ukládaných dat (aktivita nebo hmotnost). Každý záznam obsahuje identifikaci sledovaného izotopu, zdroj jeho vzniku a údaje o aktivitě, resp. hmotnosti.

Jednoduchá struktura databáze umožňuje přehledné zobrazení jednotlivých záznamů. Navíc je databáze doplněna o tzv. „vzorové dotazy“, který umožňují filtrovat zobrazené hodnoty. Databázi je dále možné rozšířit v případě potřeby o další sledované izotopy, resp. o doplňující informace k již vloženým izotopům. Všechny typy záznamů byly ve zprávě (Rataj et al. 2015b) podrobně popsány.

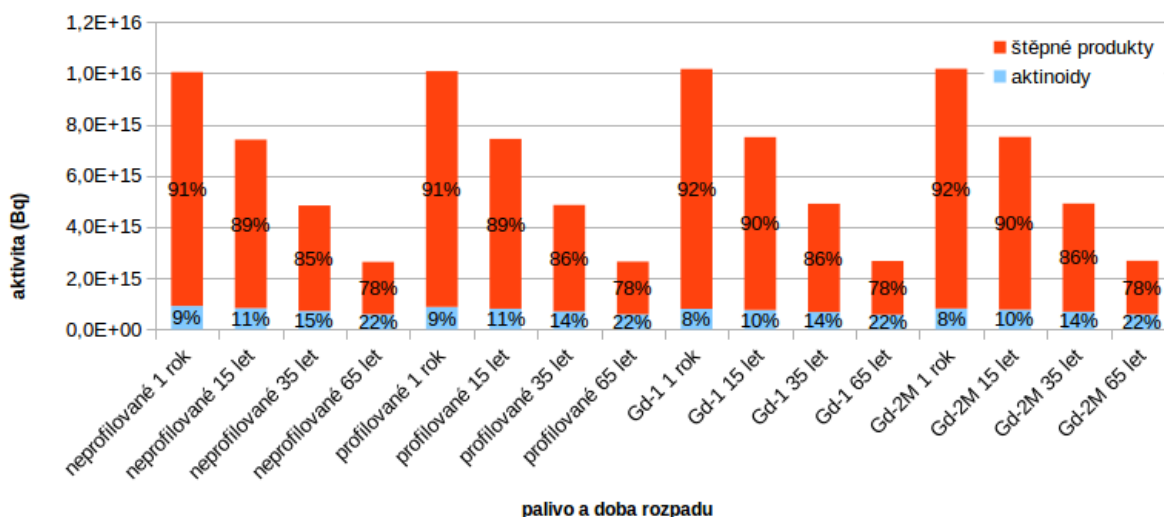
Pro potřeby výpočtů složení vyhořelého paliva byl využit výpočetní balík SCALE ve verzi 6.1.3. Výpočty probíhaly s pomocí řídicího modulu TRITON s využitím 2D transportního kódu NEWT. Z důvodu konzervativního uvažování aktivace konstrukčních materiálů a 2D podstatě řešeného problému, jsou do výpočetního modelu zahrnuty všechny konstrukční materiály o

takové hustotě, aby byl zachován poměr jejich hmotnosti v modelu k celkové hmotnosti uranu v palivu.

Aby bylo možné provést potřebné výpočty kvalifikovaně, byl nejprve ověřen výpočetní model. Ten odráží běžné provozní podmínky jaderného paliva s několika zjednodušeními. Bylo otestováno, zda se nelze dopustit závažné chyby v případě, kdy se použije výchozí (a autory doporučené) nastavení pro aproximaci anizotropie rozptylu neutronů a interpretace válcových ploch. Další testy se týkaly délky časového kroku při výpočtu vyhoření a citlivosti modelu na běžné odchylky od hodnot nominálních parametrů. Bylo zjištěno, že teplota paliva či moderátoru ovlivňuje výsledné aktivity, resp. hmotnosti izotopů pouze mírně. Zásadnější chyby je možné se dopustit při neuvážování přítomnosti kyseliny borité v moderátoru či při zanedbání časové závislosti specifického výkonu paliva během jednotlivých překládek paliva.

Nejprve proběhly výpočty pro složení vyhořelého paliva reaktoru VVER-440. Parametry výpočtu odpovídají souhrnu z průběžné zprávy (Rataj et al. 2015a). Celkem se jednalo o 19 výpočtů pro čtyři typy paliv: neprofilovaná kazeta, profilovaná kazeta, kazeta Gd1 a kazeta Gd2M.

Výsledná aktivita aktinoidů a štěpných produktů je v grafu na Obr. 3 znázorněna pro různá paliva reaktoru VVER-440 (obdobně lze z databáze získat také data pro palivo TVSA-T a VVANTAGE-6) při stejném výsledném vyhoření 50 MWd/kgHM. Jednotlivé datové řady odpovídají různým dobám od ukončení vyhořívání v reaktoru. Je patrné, že výsledky jsou pro jednotlivá paliva srovnatelné. Nelze pozorovat žádné významné rozdíly v závislosti na geometrii či materiálovém řešení paliva.



Obr. 3 Aktivita skupin sledovaných nuklidů v čase od skončení vyhořívání pro různá paliva reaktoru VVER-440 pro vyhoření 50 MWd/kgHM

V databázi VJP (pro ilustraci databáze je na Obr. 4 přiložen snímek uložených dat) jsou pro každý záznam (nuklid) uloženy následující informace:

- sloupec **Z**; protonové číslo nuklidu;
- sloupec **jmeno**; název prvku (ekvivalentní protonovému číslu);
- sloupec **A**; hmotnostní číslo nuklidu;
- sloupec **aktivita/hmotnost**; obsahuje aktivitu nuklidu v Bq, nebo hmotnost v g daného nuklidu;

- sloupec **skupina**; ukazuje, zda daný nuklid patří do skupiny aktinoidů (aktinoid), štěpných produktů (fprodukt) a aktivačních produktů (aprodukt);
- sloupec **zdroj**; ukazuje původ daného nuklidu. Možné záznamy jsou:
 - palivo, e110 a e125 pro paliva reaktoru VVER-440;
 - palivo, e110 a e635 pro paliva typu TVSA-T reaktoru VVER-1000;
 - palivo, inconel, zircaloy4, ss304, ifba pro paliva typu VVANTAGE-6 reaktoru VVER-1000;
- sloupec **reaktor**; obsahuje označení typu reaktoru;
- sloupec **palivo**; obsahuje identifikaci paliva. Možné záznamy jsou:
 - pro VVER-440 neprofilované, profilované, GD1 a GD2M;
 - pro VVER-1000 TVSA-T, TVSA-T-profil, VVANTAGE6 a VVANTAGE6-profil;
- sloupec **obohaceni**; obsahuje hodnotu středního obohacení paliva;
- sloupec **vyhoření**; obsahuje vyhoření daného paliva v jednotkách MWd/kgHM;
- sloupec **rozpad**; ukazuje dobu uplynulou od konce vyhořívání v letech;

ID	Z	jmeno	A	aktivita	skupina	zdroj	reaktor	palivo	obohaceni	vyhoření	rozpad
1	90	Th	229	3473,3	aktinoid	palivo	VVER-1000	TVSA-T	1,3	10	65
2	90	Th	230	13053800	aktinoid	palivo	VVER-1000	TVSA-T	1,3	10	65
3	90	Th	232	13,2751	aktinoid	palivo	VVER-1000	TVSA-T	1,3	10	65
4	91	Pa	231	720570	aktinoid	palivo	VVER-1000	TVSA-T	1,3	10	65
5	92	U	233	940820	aktinoid	palivo	VVER-1000	TVSA-T	1,3	10	65
6	92	U	234	22100600000	aktinoid	palivo	VVER-1000	TVSA-T	1,3	10	65
7	92	U	235	494233000	aktinoid	palivo	VVER-1000	TVSA-T	1,3	10	65
8	92	U	236	28569600000	aktinoid	palivo	VVER-1000	TVSA-T	1,3	10	65
9	92	U	238	4410944200000	aktinoid	palivo	VVER-1000	TVSA-T	1,3	10	65
10	93	Np	237	30363900000	aktinoid	palivo	VVER-1000	TVSA-T	1,3	10	65
11	94	Pu	238	4398800000000	aktinoid	palivo	VVER-1000	TVSA-T	1,3	10	65
12	94	Pu	239	9308300000000	aktinoid	palivo	VVER-1000	TVSA-T	1,3	10	65
13	94	Pu	240	9407000000000	aktinoid	palivo	VVER-1000	TVSA-T	1,3	10	65
14	94	Pu	242	12638400000	aktinoid	palivo	VVER-1000	TVSA-T	1,3	10	65
15	95	Am	241	55108000000000	aktinoid	palivo	VVER-1000	TVSA-T	1,3	10	65
16	95	Am	242m	12770500000	aktinoid	palivo	VVER-1000	TVSA-T	1,3	10	65
17	95	Am	243	51337200000	aktinoid	palivo	VVER-1000	TVSA-T	1,3	10	65
18	96	Cm	244	1807810000000	aktinoid	palivo	VVER-1000	TVSA-T	1,3	10	65
19	96	Cm	245	102717000	aktinoid	palivo	VVER-1000	TVSA-T	1,3	10	65
20	96	Cm	246	7055900	aktinoid	palivo	VVER-1000	TVSA-T	1,3	10	65
21	88	Ra	226	182469	aktinoid	palivo	VVER-1000	TVSA-T	1,3	10	65
22	84	Po	210	80035	aktinoid	palivo	VVER-1000	TVSA-T	1,3	10	65
23	82	Pb	210	80002	aktinoid	palivo	VVER-1000	TVSA-T	1,3	10	65
24	90	Th	229	0	aktinoid	e110	VVER-1000	TVSA-T	1,3	10	65
25	90	Th	230	0	aktinoid	e110	VVER-1000	TVSA-T	1,3	10	65
26	90	Th	232	0	aktinoid	e110	VVER-1000	TVSA-T	1,3	10	65
27	91	Pa	231	0	aktinoid	e110	VVER-1000	TVSA-T	1,3	10	65
28	92	U	233	0	aktinoid	e110	VVER-1000	TVSA-T	1,3	10	65
29	92	U	234	0	aktinoid	e110	VVER-1000	TVSA-T	1,3	10	65
30	92	U	235	0	aktinoid	e110	VVER-1000	TVSA-T	1,3	10	65
31	92	U	236	0	aktinoid	e110	VVER-1000	TVSA-T	1,3	10	65
32	92	U	238	0	aktinoid	e110	VVER-1000	TVSA-T	1,3	10	65
33	93	Np	237	0	aktinoid	e110	VVER-1000	TVSA-T	1,3	10	65
34	94	Pu	238	0	aktinoid	e110	VVER-1000	TVSA-T	1,3	10	65
35	94	Pu	239	0	aktinoid	e110	VVER-1000	TVSA-T	1,3	10	65
36	94	Pu	240	0	aktinoid	e110	VVER-1000	TVSA-T	1,3	10	65
37	94	Pu	242	0	aktinoid	e110	VVER-1000	TVSA-T	1,3	10	65
38	95	Am	241	0	aktinoid	e110	VVER-1000	TVSA-T	1,3	10	65
39	95	Am	242m	0	aktinoid	e110	VVER-1000	TVSA-T	1,3	10	65
40	95	Am	243	0	aktinoid	e110	VVER-1000	TVSA-T	1,3	10	65
41	96	Cm	244	0	aktinoid	e110	VVER-1000	TVSA-T	1,3	10	65
42	96	Cm	245	0	aktinoid	e110	VVER-1000	TVSA-T	1,3	10	65
43	96	Cm	246	0	aktinoid	e110	VVER-1000	TVSA-T	1,3	10	65
44	88	Ra	226	0	aktinoid	e110	VVER-1000	TVSA-T	1,3	10	65

Obr. 4 Náhled databáze VJP (MS Access 2010) s výsledky výpočtů pro aktivitu nuklidů v palivu reaktoru VVER-1000

4.1.1.3 Nejistoty řešení ZL

Nejistoty řešení byly analyzovány prostřednictvím citlivostních analýz pro nastavení numerické částí výpočtového modelu a vlivu neurčitosti vstupních dat na výsledné hodnoty. Vliv parametrů numerického řešení na aktivity, resp. hmotnosti jednotlivých izotopů se ve většině případů ukázal jako zanedbatelný. Výjimku tvoří nastavení časového kroku pro vyhořívání, které musí být dostatečně jemné (vhodná velikost kroku vyhořívání 5 dní), jinak může dojít k rozdílu až jednotek procent u následujících nuklidů: ^{97}Mo , ^{99}Tc , ^{135}Cs , ^{91}Zr , ^{127}I a ^{115}Sn .

Pozorovatelný je také vliv teplot (jak teploty paliva, tak teploty chladiva) na hmotnost jednotlivých izotopů. Celkově lze shrnout, že pro většinu nuklidů se lze dopustit chyby ve stanovení výsledné hmotnosti maximálně 0,1 % (1,0 % pro transurany) při nepřesně stanovené teplotě paliva či chladiva s použitím výpočetního nástroje SCALE v ověřovaném rozsahu teplot (nárůst/pokles teploty chladiva o 10 K a teploty paliva o 50 K) kolem nominálního stavu.

Jako parametr nejvíce ovlivňující výsledné vlastnosti vyhořelého jaderného paliva se během řešení ukázal být obsah kyseliny borité v moderátoru. Pro většinu sledovaných nuklidů byl pozorován rozdíl ve výsledné hmotnosti (při rozdílu 3 g H_3BO_3 na 1 kg moderátoru) mezi -10 % a + 5 %.

Důležitost příměsí je přímo závislá na vybraném sledovaném nuklidu. Vzniká-li zájmový nuklid primárně z aktivace (rozpadu) prvku, který je příměsí, je zřejmé, že celková hmotnost sledovaného nuklidu je významně závislá na množství zdrojového prvku.

4.1.1.4 Návrh dalších prací

Na základě rozboru obdržených výsledků a postupů prací na výpočtech je možno nalézt několik směrů pro rozvoj tématu.

Nejprve by bylo vhodné kriticky posoudit výběr sledovaných nuklidů. Během řešení bylo opakovaně diskutováno, zda je výběr uvedený v zadávacím listu projektu dostatečný (či naopak není příliš široký). Nicméně nebylo dosaženo v tomto ohledu jednoznačných závěrů. Navrhujeme připravit hlediska, podle kterých by bylo možné posoudit význam jednotlivých nuklidů a dosáhnout tak objektivních hodnotících kritérií, ze kterých by vyšel nový revidovaný seznam nuklidů, významných z dlouhodobé bezpečnosti. Na základě tohoto seznamu by bylo možné doplnit stávající databázi VJP, resp. blíže analyzovat chování menšího počtu nuklidů s větším důrazem na jejich významnost.

Dalším směrem by mělo být časové rozšíření zkoumaného období ve výpočtech hmotností jednotlivých izotopů ve VJP. Bylo by vhodné sledovat časové chování vyhořelého paliva i v delším časovém období. Pro čas delší než 1 000 let již bude významný podíl některých z dceřiných produktů aktinoidů, které jsou dlouhodobými nositeli radiotoxicity vyhořelého paliva. Takto získaná data by byla použita pro databázi VJP, čímž by se rozšířila volba poskytovaných informací (rozpad po 65 letech resp. 1 000 letech).

V průběhu řešení projektu bylo zjištěno, že příměs dusíku v palivu je zcela zásadní pro tvorbu radioaktivního ^{14}C . Mohlo by být přínosné podobně analyzovat také další příměsi a identifikovat významné přispěvatele k aktivitě vyhořelého paliva.

Pozitivní přínos lze také očekávat od analýzy míry konzervativnosti, během níž budou blíže popsány jevy, které mají vliv na nadhodnocení/podhodnocení výsledků. Závěry navrhovaného výzkumu lze následně použít při (i) snaze umožnit takové způsoby zavezení vyhořelého paliva do úložiště, které by při současném konzervativním stavu nebyly možné, (ii) prokázání konzervativnosti návrhu.

V neposlední řadě bude vhodné provést užší propojení s inventářem paliva přítomného v jaderných elektrárnách Temelín a Dukovany a počítat tak výsledky pro reálné historické provozní podmínky s následným srovnáním výsledků s odhady/měřeními/výsledky provozovatele elektrárny.

4.1.1.5 Výstupy ZL

RATAJ J., FRÝBORT J., HERALTOVÁ L., FEJT F. (2015a): Rešerše složení a geometrie analyzovaných palivových souborů. - MS SÚRAO TZ 7/2015, Praha.

RATAJ J., FRÝBORT J., HERALTOVÁ L., FEJT F. (2015b): Databáze VJP pro bezpečnostní rozborů. - MS SÚRAO TZ 28/2017, Praha.

4.1.2 Chování VJP a forem RAO nepřijatelných do přípovrchových úložišť v prostředí HÚ /Vlastnosti RAO nepřijatelných do přípovrchových úložišť (PB-2015-ZL-S0945-018-CharakterizaceRAO)

Hlavní autoři Touš M., Havlová V., Večerník P., Gondolli J., Otcovský T., Hejný T., Trtílek R. (ÚJV); Čubová K., Baborová L., Němec M., John J. (FJFI ČVUT)

4.1.2.1 Cíl ZL

Cílem plnění tohoto dílčího projektu bylo získat vstupní parametry pro výpočet zdrojového členu pro bezpečnostní rozborů hlubinného úložiště pro RAO nepřijatelné do přípovrchových úložišť. Předpokládá se, že toto úložiště by mělo být na stejné lokalitě jako úložiště pro vyhořelé jaderné palivo, a to v takové vzdálenosti od úložiště VJP, že nebude hrozit jejich vzájemné ovlivňování.

Předmětem řešení tohoto dílčího projektu bylo:

- 1) Shrnutí informace potřebné pro predikci zdrojového členu hlubinného úložiště pro uložení RAO nepřijatelných do přípovrchových úložišť. Jde zejména o množství a inventář radionuklidů odpadů z vyřazování jaderných elektráren EDU, ETE (a případně NJZ) a ostatních odpadů zatím skladovaných u původců či v úložišti Richard. Soustředit se zejména na určení inventáře mobilních, dlouhodobých radionuklidů, které mohou nejvíce ovlivnit bezpečnost hlubinného úložiště a jejich chování v úložišti (například možné formy a chování ^{14}C či ^{41}Ca po jejich uvolnění z odpadů) na základě analýzy dostupných informací.
- 2) Shrnutí RAO nepřijatelné do přípovrchových úložišť, zejména z vyřazování jaderných elektráren podle jejich formy (typy kovů, beton, organika).

- 3) Na základě rešerše dostupné literatury navrhnout vhodné formy matrice odpadů, které bude třeba solidifikovat, a odhadnout jejich vlastnosti potřebné pro výpočet zdrojového členu (např. vyluhovatelnost, stabilita).
- 4) Navrhnout další práce pro hodnocení bezpečnosti hlubinného úložiště pro RAO nepřijatelné do přípovrchových úložišť.

4.1.2.2 Zhodnocení řešení projektu

Na základě analýz, zpracovaných v technické zprávě Inventarizace RAO nepřijatelných do přípovrchových úložišť, Touš et al. (2017) lze pro uložení v HÚ předpokládat následující materiály radioaktivních odpadů, jiné než VJP:

- uhlíková ocel (vnitřní stěny šachty reaktoru ETE, stavební části reaktoru ETE, EDU);
- nerezová ocel (reaktorová nádoba ETE a EDU včetně výstelky reaktoru ETE, EDU, a vnitřních částí reaktoru ETE, EDU);
- litinová drť (EDU);
- materiály Al (absorpční tyče – slitina B4C + Al; koš aktivní zóny, horizontální kanály a tepelná kolona – slitina hliníku AlMg5; reaktor CVŘ);
- slitina BeO (berylliové reflektory; reaktor CVŘ);
- beton (šachta reaktoru);
- těžký beton;
- serpentinitový beton (zásypy);
- vitrifikát – sodno-hlinité fosfátové sklo ($\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Na}_2\text{O} - \text{P}_2\text{O}_5$);
- beton (solidifikované výšeaktivní kapaliny nebo kaly);
- URZ (zdroje ionizujícího záření v těsném ocelovém pouzdře, ZIZ v kovové nebo krystalické formě, v Pb nebo U stínění, hladinoměry, terapeutické ozařovače, průmyslové ozařovače);
- ionizační hlásiče požáru (kovové plíšky s napařeným radionuklidem, převážně ^{241}Am , ve zdvojeném OS, vlastní RAO bez zpevnění pro případné další využití pro přepracování).

V technické zprávě Touš et al. (2018) jsou poskytnuty detailní informace o hmotnostní bilanci aktivovaných technologických částí reaktorů uvažovaných pro ukládání, odhad množství tzv. betonkontejnerů ukládaných do HÚ na základě předpokládaného inventáře z vyřazování dané jaderné elektrárny a přehled aktivačních produktů v technologických částech reaktorů a jejich předpokládaná aktivita. Tato data jsou zpracována jak pro okamžitou, tak i odloženou variantu vyřazování z provozu (40 let po ukončení provozu).

JE Temelín

a) Varianta okamžitého vyřazování z provozu

Množství odpadů je shrnuto v Tab. 3. Aktivita vybraných radionuklidů v jednotlivých typech materiálů je uvedena v Tab. 4.

Tab. 3 Množství vyřazovaných odpadů pro 1 blok JE Temelín (odhad)

	Hmotnost (kg)	Počet betonkontejnerů
Ocel	408 135	
Serpentinitový beton	32 060	
Celkem	440 195	195
Ostatní aktivované předměty z provozu	14 000	14

Tab. 4 Aktivita klíčových radionuklidů v jednotlivých typech materiálů JE Temelín, pro případ okamžitého vyřazování (pro jeden blok JE)

Materiál	Aktivita radionuklidů (Bq)			
	¹⁴ C	⁴¹ Ca	⁵⁹ Ni	⁶³ Ni
Konstrukční uhlíková ocel	1,01 ⁶	0	3,11 · 10 ¹⁰	3,40 · 10 ¹²
Nerezová ocel	6,86 · 10 ¹³	2,41 · 10 ¹	3,25 · 10 ¹⁴	4,68 · 10 ¹⁶
Serpentinitový beton	2,37 · 10 ⁹	2,90 · 10 ¹⁰	0	0

b) Varianta odloženého vyřazování z provozu

Množství odpadů je shrnuto v Tab. 5. Aktivita vybraných radionuklidů v jednotlivých typech materiálů je uvedena v Tab. 6.

Tab. 5 Množství vyřazovaných odpadů pro 1 blok JE Temelín (odhad)

	Hmotnost (kg)	Počet betonkontejnerů
Ocel	384 145	
Serpentinitový beton	32 060	
Celkem	416 205	133
Ostatní aktivované předměty z provozu	14 000	14


Tab. 6 Aktivita klíčových radionuklidů v jednotlivých typech materiálů JE Temelín, pro případ odloženého vyřazování (pro jeden blok JE)

Materiál	Aktivita radionuklidů (Bq)			
	¹⁴ C	⁴¹ Ca	⁵⁹ Ni	⁶³ Ni
Konstrukční uhlíková ocel	8,73 · 10 ⁵	0	2,70 · 10 ¹⁰	2,24 · 10 ¹²
Nerezová ocel	6,18 · 10 ¹³	2,39 · 10 ¹	2,91 · 10 ¹⁴	3,20 · 10 ¹⁶
Serpentinitový beton	2,36 · 10 ⁹	2,90 · 10 ¹⁰	0	0

JE Dukovany

a) Varianta okamžitého vyřazování z provozu EDU

Množství odpadů je shrnuto v Tab. 7. Aktivita vybraných radionuklidů v jednotlivých typech materiálů je uvedena v

 SÚRAO	Závěrečná zpráva projektu Výzkumná podpora pro bezpečnostní hodnocení HÚ	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 462/2020

Tab. 8.

Tab. 7 Množství vyřazovaných odpadů pro 1 blok JE Dukovany (odhad)

	Hmotnost (kg)	Počet betonkontejnerů
Ocel	220 000	
Serpentinitový beton	77 000	
Konstrukční betony	200 000 kg	
Celkem	497 000	497
Ostatní aktivované předměty z provozu	50 000	50

Tab. 8 Aktivita klíčových radionuklidů v jednotlivých typech materiálů JE Dukovany, pro případ okamžitého vyřazování (pro jeden blok JE)

Materiál	Aktivita radionuklidů (Bq)			
	¹⁴ C	⁴¹ Ca	⁵⁹ Ni	⁶³ Ni
Konstrukční ocel	$1,95 \cdot 10^7$	0	$9,71 \cdot 10^{10}$	$1,00 \cdot 10^{13}$
Nerezová ocel	$2,88 \cdot 10^{13}$	2,15	$2,80 \cdot 10^{14}$	$4,17 \cdot 10^{16}$
Serpentinitový beton	$2,23 \cdot 10^{10}$	$2,65 \cdot 10^{11}$	0	0

b) Varianta odloženého vyřazování z provozu EDU

Množství odpadů je shrnuto v Tab. 9. Aktivita vybraných radionuklidů v jednotlivých typech materiálů je uvedena v Tab. 10.

Tab. 9 Množství vyřazovaných odpadů pro 1 blok JE Dukovany (odhad)

	Hmotnost (kg)	Počet betonkontejnerů
Ocel	220 000	
Serpentinitový beton	77 000	
Konstrukční betony	200 000 kg	
Celkem	497 000	497
Ostatní aktivované předměty z provozu	50 000	50

Tab. 10 Aktivita klíčových radionuklidů v jednotlivých typech materiálů JE Dukovany, pro případ odloženého vyřazování (pro jeden blok JE)

Materiál	Aktivita radionuklidů (Bq)			
	¹⁴ C	⁴¹ Ca	⁵⁹ Ni	⁶³ Ni
Konstrukční ocel	$1,94 \cdot 10^7$	0	$9,71 \cdot 10^{10}$	$7,59 \cdot 10^{12}$
Nerezová ocel	$2,86 \cdot 10^{13}$	2,15	$2,80 \cdot 10^{14}$	$3,16 \cdot 10^{16}$
Serpentinitový beton	$2,22 \cdot 10^{10}$	$2,65 \cdot 10^{11}$	0	0

Nové jaderné zdroje

V dlouhodobých plánech provozovatele v současnosti provozovaných JE je výstavba nových jaderných zdrojů (NJZ). Konkrétně se má jednat o dva bloky v JE Temelín o celkovém výkonu cca 2 000 MW a jeden blok v JE Dukovany o výkonu max. 1 700 MW. Uvažovaná doba provozu je 60 let a předpokládá se okamžité vyřazování z provozu. Množství vyřazených odpadů je uvedeno v Tab. 11.

Tab. 11 Množství vyřazených odpadů pro NJZ (odhad)

	Hmotnost (kg)	Počet betonkontejnerů
Ocel	1 775 320	
Serpentinitový beton	372 000	
Celkem	2 147 320	2 188*
Ostatní aktivované předměty z provozu	40 000	50

*Číslo zahrnuje počet VBK pro 2 bloky v lokalitě ETE a 1 blok v lokalitě EDU, číslo vychází z údajů v databázi (zhruba odpovídá konzervativní úvaze 1000 kg = 1 ks VBK)

Vyřazování výzkumného reaktoru LVR-15 z provozu

Odhad způsobu vyřazování a materiálové bilance pro vyřazování výzkumného reaktoru LVR-15 (provozovaný Centrem výzkumu Řež s.r.o.) je založen na předpokladu, že délka provozu reaktoru je 35 let – viz Tab. 12.

Tab. 12 Množství vyřazených odpadů pro reaktor LVR-15 (odhad)

	Hmotnost (kg)	Počet betonkontejnerů
Ocel (08Ch18N10T):	7 900	10
Hliník (AlMg5)	275	11
Absorpční tyče – B ₄ C + Al	10	

Vyřazování ostatních pracovišť v ÚJV z provozu

RAO uvažované pro uložení v HÚ bude vznikat pouze z výše uvedeného výzkumného reaktoru LVR-15 a ZIZ (^{60}Co), uložených a užívaných v ozařovnách. Jejich uvažované vyřazování je po r. 2040. Jedná se o pět kusů ^{60}Co zářičů, jejichž aktuální aktivita se pohybuje od $1,0 \cdot 10^{11}$ do $1,0 \cdot 10^{14}$ Bq. Celková aktivita výše uvedených zdrojů bude v roce 2040 $2,38 \cdot 10^{12}$ Bq.

RAO v režimu skladování v ÚRAO

Jedná se o směsný materiál, jehož aktivita byla (k 31. 10. 2016) $1,34 \cdot 10^{15}$ Bq a hmotnost 48 174 kg.

Zdroje ionizujícího záření v provozu na území ČR

Celkem se jedná o 4 968 zdrojů, jejichž celková aktivita je $1,99 \cdot 10^{16}$ Bq (k 10. 12. 2015). Jedná se například o zdroje typu ^{241}Am , ^{239}Pu nebo $^{241}\text{Am}/\text{Be}$, $^{239}\text{Pu}/\text{Be}$.

Vyhořelé jaderné palivo z výzkumného reaktoru

VJP vzniklé v minulosti (208 palivových souborů EK-10 - obohacení 10 %, 254 souborů IRT-2M – obohacení 80 % a 91 ks – obohacení 36 %) bylo přepraveno v roce 2007 do Ruské federace k přepracování. Odhaduje se, že v roce 2028 bude navraceno 740 kg vitrifikovaného (alumino-fosfátové sklo) RAO o celkové aktivitě $3,67 \cdot 10^{15}$ Bq a objemu $0,297 \text{ m}^3$.

Druhý odvoz VJP se uskutečnil v roce 2013 a v jeho rámci bylo odvezeno 112 ks palivových souborů IRT-2M s obohacením 36 %. Odhaduje se, že v roce 2033 bude navraceno 720 kg vitrifikovaného RAO o celkové aktivitě $2,59 \cdot 10^{15}$ Bq a objemu $0,289 \text{ m}^3$.

Lze předpokládat, že vitrifikovaný odpad bude uložen ve speciálním ukládacím obalovém souboru.

Z výše uvedených výsledků vyplývá, že RAO vzniklé při vyřazování (v případě okamžitého vyřazování) z provozu stávajících jaderných zařízení (JE Temelín, JE Dukovany a výzkumný reaktor LVR-15) by bylo nutné uložit do 2 627 betonových ukládacích kontejnerů. Tyto kontejnery představují celkový objem $11 401 \text{ m}^3$. Nicméně podstatnou část z tohoto množství RAO tvoří serpentinitový a konstrukční beton z JE Dukovany. Celkem se jedná o 1 108 kusů betonových ukládacích kontejnerů, které by byly potřebné pro uložení tohoto typu RAO v HÚ. Je to téměř polovina ukládacích betonových kontejnerů požadovaných pro RAO z obou JE a více jak 50násobné množství kontejnerů, než jaké je potřebné pro uložení betonu při vyřazování JE Temelín. Je tedy zřejmé, že vhodnou optimalizací vyřazovacího procesu lze toto množství, a tím i požadavek na ukládací prostor v HÚ, významně snížit. Velkou neurčitost v oblasti ukládání RAO z vyřazování jaderných zařízení z provozu samozřejmě vytvářejí nové jaderné zdroje, o jejichž počtu a typu nebylo v současné době rozhodnuto.

Informace získané v rámci inventarizace RAO pro ukládání v HÚ byly také souhrně shrnuty do databázového souboru ve formátu (MS Excel; Touš et al. 2018). Databáze obsahuje následující charakteristiky a kategorie dříve uvedených položek RAO:

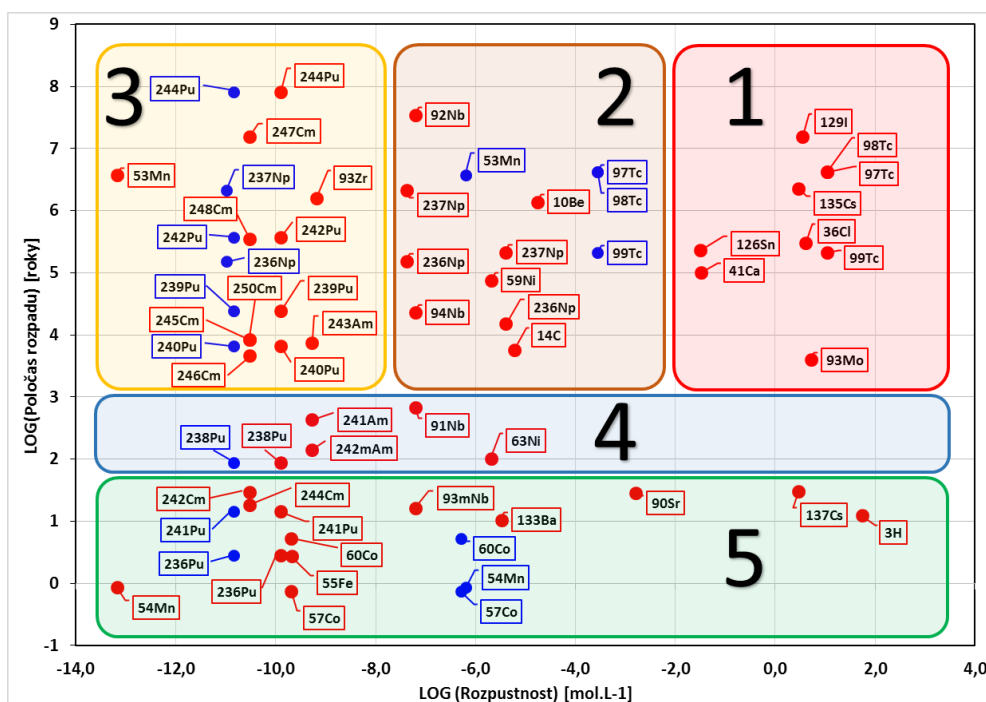
- Kategorie RAO.
- Charakteristika RAO.

Dále byly identifikovány radionuklidy, které by mohly tvořit zdrojový člen pro hodnocení bezpečnosti HÚ v případě ukládání výše uvedených RAO. Jedná se o radionuklidy, které mohou nejvíce ovlivnit bezpečnost HÚ, přičemž kritériem výběru byla jejich mobilita, poločas rozpadu, a i jejich dlouhodobý negativní účinek na lidský organismus. Jedná se o následující

radionuklidy: ^{10}Be , ^{14}C , ^{36}Cl , ^{41}Ca , ^{55}Fe , ^{59}Ni , ^{63}Ni , ^{90}Sr , ^{93}Mo , ^{93}Zr , ^{99}Tc , ^{94}Nb , ^{129}I , ^{135}Cs , ^{137}Cs , ^{133}Ba , ^{237}Np , ^{252}Cf a izotopy Am, Pu a Cm.

Mobilita (rozpuštěnost) těchto radionuklidů v prostředí interakce cementových materiálů, které se předpokládají jako nejpravděpodobnější pro solidifikaci těchto odpadů, byla obšírně řešena ve studii Čubová et al. (2017). Výsledek byl získán kombinací získaných rozpustností a zavedených 3 skupin radionuklidů, dělených podle jejich poločasu rozpadu. Toto rozdělení je celkově vedlo k rozdělení radionuklidů do 5 skupin, kombinujících rozdělení dle poločasu rozpadu a rozpustnosti (graficky znázorněno na Obr. 5):

1. První skupina představuje RN s velmi dlouhým poločasem a vysokou rozpustností v mírně oxidačních podmínkách. Jedná se především o nuklidy tvořící aniontové formy – Tc, Cl a I a prvky ze skupiny alkalických kovů a kovů alkalických zemin, konkrétně se jedná o ^{41}Ca a ^{137}Cs . Z pohledu speciace v cementové pórové vodě představuje tato skupina nejkritičtější radionuklidy.
2. Druhá skupina je přechodem mezi dobře a velmi špatně rozpustnými radionuklidy, se všemi důsledky na pomezí mezi skupinami 1 a 3.
3. Třetí skupina zahrnuje velmi špatně rozpustné RN s velmi dlouhými poločasy.
4. Čtvrtá skupina je vymezena hlavně poločasy v rozmezí stovky až tisíce let, která obsahuje málo rozpustné radionuklidy.
5. Pátá skupina představuje z pohledu uložení krátkodobé radionuklidy s poločasy rozpadu do 30 let.



Obr. 5 Rozdělení radionuklidů podle rozpustnosti v podmínkách, podmíněných interakcí cementu s vodou. (Červeně jsou uvedeny rozpustnosti nuklidů v mírně oxidačních podmínkách, modře v redukčních podmínkách, pokud se od oxidačních liší. Data jsou vybrána z tabulek uvedených ve studii (Čubová et al 2017). Použity byly PhreeqC a The Geochemist's Workbench®.)

Z hlediska struktury výše uvedených potenciálních odpadů k uložení do HÚ (Touš et al. 2017 a 2018) se jako principálně vhodný materiál matrice pro solidifikaci odpadů jeví materiál

na bázi cementu, se kterým se v dané oblasti dlouhodobě pracuje a autoři této studie ve své rešerši nenarazili prakticky na žádný jiný další použitý materiál (viz Touš et al. 2018).

Cement je známý svými pasivačními účinky na kovové materiály (ocel), čímž by docházelo ke snížení rychlosti uvolňování radionuklidů z kovových částí vyřazených JE. Problematickou se jeví silně alkalická reakce s vodou, produkující alkalickou frontu, která může ovlivnit vlastnosti jak výplňových materiálů (zejména v případě použití bentonitu jako výplňového materiálu) či okolní horniny a změnit jejich příspěvek k hlavní bezpečnostní funkci HÚ. I z tohoto důvodu se předpokládá výstavba částí úložiště pro RAO jiné než VJP v jiné části HÚ než úložné chodby s VJP.

Cementovou "zálivku" lze použít buď pro zalití fragmentovaných částí vyřazených JE do sudů (koncept sud v sudu), nebo na zalití velkých kusů materiálu přímo do ukládacího obalového souboru, či na vyplnění prostor mezi uloženými sudy. Cement zde funguje jako další bariérový materiál, který přispívá ke zvýšení izolační funkce celého HÚ.

Dále je nutno uvažovat přepravní hmotnost a následně hmotnost při manipulaci při ukládání do HÚ (po vyplnění výplňovou hmotou), tj. zda řešit zalití cementovou směsí již před přepravou či až na lokalitě HÚ. A konečně bude nutno uvažovat i vyšší tlaky v HÚ, které mohou působit na betonkontejner a tedy i požadavky na pevnostní charakteristiky materiálů.

Obdobně tomu bude s betonovou sutí z vyřazených JE. Zde se nabízí možnost zpracování betonové drtě, kterou by bylo možno smísit přímo s cementovou směsí a plnit jí buď sudy nebo betonkontejnery napřímo. Zde je však nutno brát v úvahu i sledování rovnoměrnosti rozložení aktivity, radiační bezpečnost při přípravě drtě z aktivovaného betonu apod.

Kromě cementu jako matrice pro ukládané odpady, jiné než VJP, lze potenciálně uvažovat i o geopolymerní matrici.

Matrice pro vitrifikát či pro URZ v tomto okamžiku nebyla navrhována. Lze předpokládat, že vitrifikovaný odpad bude uložen ve speciálním ukládacím obalovém souboru.

4.1.2.3 Nejistoty řešení ZL

Pro plnění projektu bylo nutným předpokladem získání podkladů, týkajících se typů odpadů a jejich původců, případně dalších relevantních informací, (jedná se především o informace z návrhů způsobů vyřazování předložených původci). Tyto informace byly problematicky dostupné, ne zcela obsažné a nejednotné (zejména pro JE Temelín a JE Dukovany).

Určení množství odpadů neuložitelných do přípovrchových úložišť, pocházejících z vyřazování JE a NJZ bylo založeno na informacích z návrhů způsobu vyřazování a na expertním odhadu, nikoli na plánech vyřazování, které detailně popisují součásti JE a jejich zpracování.

Výsledná databáze a její řešení je výsledkem konzultací zhotovitele se zadavatelem. Možnosti databázového řešení je celá řada a nebyly zcela vyčerpány.

Identifikace složení a aktivity některých odpadů byla problematická, a to jak z důvodu jednak ne zcela jednoznačné dokumentace a dokladování, tak i z důvodů nejistot externích. Např. při návratu přepracovaného paliva z výzkumných reaktorů nebudou pravděpodobně známy aktivity všech požadovaných radionuklidů, neboť měření jsou prováděna dle možností závodu na přepracování paliva Maják (Ruská federace), a ne pro všechny radionuklidy.

Návrh vhodné formy matrice pro dotčené odpady a odhad jejich vlastností, potřebné pro výpočet zdrojového členu (vyluhovatelost, stabilita), bylo založeno na rešerši literatury, na zkušenostech s využitím VBK na Slovensku (JAVYS, a.s., osobní sdělení) a na expertním odhadu.

4.1.2.4 Návrh dalších prací

Na základě dostupných podkladů (Touš et al. 2018) byly navrženy následující směry pro řešení problematiky ukládání těchto druhů odpadu. Jsou to především:

- Zpřesnění a zaktualizování množství a předpokládané radionuklidové složení serpentinitového a stavebního betonu z vyřazování JE ve spolupráci s provozovatelem JE.
- Zpřesnění a zaktualizování množství a předpokládané radionuklidové složení ostatních aktivovaných předmětů pocházejících z provozu JE ve spolupráci s provozovatelem JE.
- Verifikace množství a radionuklidového inventáře provozovaných ZIZ na území ČR a přehodnocení jejich vlastnictví a následné ukládání v ČR ve spolupráci se SÚJB.
- Sestavení bilance plánovaného VJP z výzkumného reaktoru (suché skladování vs. vitrifikát, ukládací OS do HÚ, RN složení) ve spolupráci s provozovatelem výzkumných reaktorů.
- Zhodnocení odpadů, které bude třeba uložit do HÚ z hlediska požadavku na izolaci odpadu. V úvahu je třeba vzít jejich formu (fyzikální a chemickou), inventář radionuklidů přítomných v konkrétním odpadu (např. vyřazené vysokoaktivní zářiče, aktivované kovové materiály, aktivovaný beton biologického stínění aj.), lokalizaci radionuklidů v odpadu a možnosti jejich uvolnění z odpadu za podmínek úložiště (např. aktivované kovové materiály vs. solidifikované kapalné odpady). Na základě tohoto zhodnocení poté zvážit použití speciálních materiálů obalových souborů (např. vysokopevnostní, nízkopropustný beton betonkontejnerů) sloužících jako dodatečná bariéra, případně řešit izolaci odpadu primárně formou výplně ukládacích prostor (použití zásypu s požadovanými parametry, např. sorpční schopností, nízkou propustností aj.).
- Definovat požadavky na ukládání odpadů (přímé ukládání odpadů do ukládacích obalových souborů vs. ukládání sud v sudu).
- Definovat/navrhnout způsob ukládání nestandardních typů odpadů. Jedná se především o RAO, které svým charakterem – radiační charakteristikou nespĺňují platné limity a podmínky přijatelnosti do přípovrchového úložiště, a proto se do doby zprovoznění HÚ skladují v ÚRAO Richard. Dále zdroje ionizujícího záření v provozu na území ČR.
- Definovat požadavky na obalové soubory s ohledem na izolaci odpadů – korozní odolnost (u kovových souborů), pevnost, minimální propustnost pro vodu, stínění, aj. V případě, že obalové soubory budou použity i jako přepravní, zohlednit požadavky na materiály i z tohoto hlediska.
- Na základě výsledků předchozích bodů (1 a 2) definovat potřebné materiály pro ukládací obalové soubory – zejména cementové, pokud budou uvažovány betonkontejnery, případně kovové.
- V případě, že zbývající volný vnitřní prostor ukládacích obalových souborů s odpadem bude třeba vyplnit, navrhnout vhodný materiál výplně spolu s požadavky na jeho vlastnosti.

- S ohledem na materiál ukládacích obalových souborů navrhnout způsob uložení v HÚ, např. do oddělených velkoprofilových chodeb nebo do jedné velké kaverny (obdobně jako např. švédský koncept super-sila), a tomu odpovídající způsob vyplnění těchto prostor zásypem při jejich uzavření po zaplnění odpadem.
- Navrhnout výplňový materiál s ohledem na uložené obalové soubory, odpad v nich, požadavek na izolaci, sekci úložiště VJP (pokud bude sekce RAO a VJP součástí jednoho HÚ, i v případě odlišných hloubkových horizontů).
- Přímé ukládání fragmentovaných materiálů do ukládacího obalového souboru (bez konceptu sud v sudu) by bylo vhodné ověřit v rámci bezpečnostního hodnocení HÚ, a to zejména v předprojektové fázi vývoje HÚ.

4.1.2.5 Výstupy ZL

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.

TOUŠ M., ČUBOVÁ K., OTCOVSKÝ T., HEJNÝ J., KRÍŽ P., PODLAHA J., TRTÍLEK R., HAVLOVÁ V., JOHN J., NĚMEC M. (2017): Inventarizace RAO nepřijatelných do přípovrchových úložišť. – MS SÚRAO TZ 201/2017, Praha.

TOUŠ M., HAVLOVÁ V., ČUBOVÁ K. (2018): Inventarizace RAO nepřijatelných do přípovrchových úložišť. – MS SÚRAO, ZZ 230/2018, Praha.

TOUŠ M., HAVLOVÁ V., ČUBOVÁ K. (2018): Properties of radioactive waste unacceptable for subsurface radioactive waste repositories. Final report. – MS SÚRAO, ZZ 230/2018/ENG, Praha.

4.1.3 Charakterizace RAO nepřijatelného do přípovrchového úložiště z vyřazování jaderné elektrárny – biologické stínění reaktoru (PB-2016-ZL-S4289-035-BiologStineni)

Hlavní autoři: Svoboda K., Šír D., Burian P., Miler V., Matěcha J., Pošvař R., Trtílek R. (ÚJV)

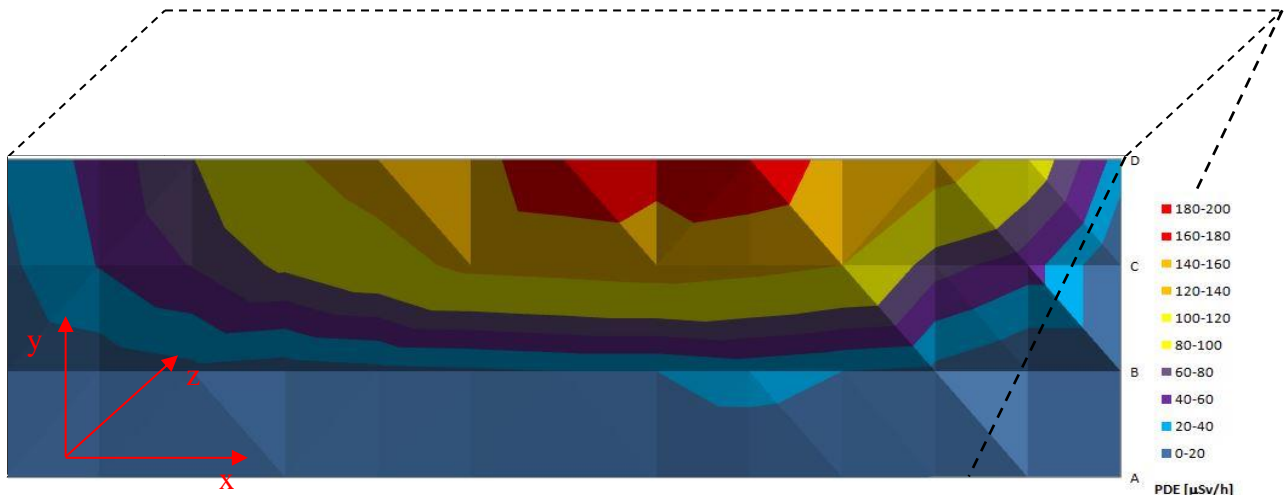
4.1.3.1 Cíl ZL

Cílem ZL Charakterizace RAO nepřijatelného do přípovrchového úložiště z vyřazování jaderné elektrárny – biologické stínění reaktoru bylo ověřit údaje pro výpočet zdrojového členu pro bezpečnostní rozboru hlubinného úložiště pro biologické stínění reaktoru jako zdroje RAO nepřijatelného do přípovrchových úložišť, se zvláštním zřetelem k obsahu radionuklidů ^{14}C , ^{36}Cl a ^{41}Ca . K tomuto účelu byla využita unikátní možnost destruktivní radiochemické analýzy reálných vzorků ozářeného betonu, pocházející z vyřazované jaderné elektrárny Greifswald, která byla stejného typu jako je jaderná elektrárna Dukovany.

4.1.3.2 Zhodnocení řešení projektu

Byla provedena charakterizace bloku betonu Greifswald na povrchu na boční straně válcové plochy v síti 5 x 8 bodů (cca 0,3 x 0,3 m) a to přímým měřením příkonu dávkového ekvivalentu. Segment není vertikálně (rozměr rovnoběžný se svislou osou reaktorové nádoby), ani radiálně

ozáření rovnoměrně. To lze dokumentovat (viz Obr. 6) průběhem příkonu dávkového ekvivalentu (PDE) na povrchu betonu podél jeho výškové osy a v radiálním směru (tloušťka betonu). PDE se pohybuje v rozpětí od 10 do 175 $\mu\text{Sv}/\text{hod}$. V části segmentu s nejvyšší hodnotou PDE lze očekávat, že byly nejvyšší fluence neutronů uniklých z aktivní zóny.



Obr. 6 Rozložení dávkového příkonu na povrchu segmentu

Z betonu bylo odebráno 7 vzorků v radiálním směru v místě max. dávkového příkonu. Vzdálenost mezi odběrovými místy byla 100 mm, první odběr byl ve vzdálenosti 50 mm od nerezové obličovky. Odběr byl proveden pomaloběžným odvrtáním vrtákem průměru 20 mm tak, aby teplota v místě odběru nepřekročila 50 °C.

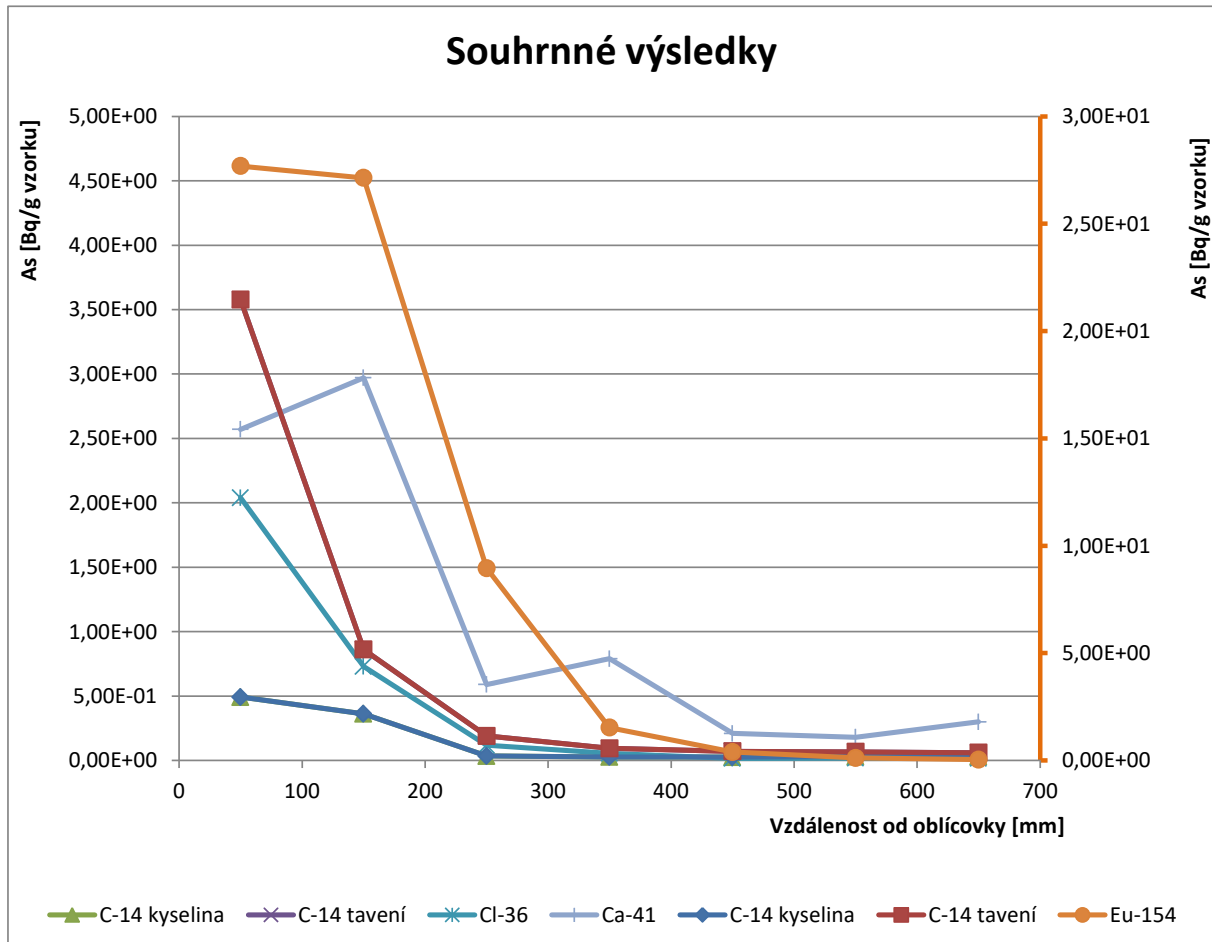
Na odebraných vzorcích byla provedena kompletní gama spektrometrická analýza (stanovení měrné aktivity radionuklidů emitujících záření gama). Gama spektrometrie byla provedena vysokorozlišovací polovodičovou spektrometrií záření gama na pracovišti laboratoře CAL podle akreditovaného standardního operačního postupu R-01 – Stanovení aktivity izotopů – zářičů gama – metodou gama spektrometrie s vysokým rozlišením. Měřeno bylo veškeré množství vzorku získaného odběrem pro dosažení maximální citlivosti.

Radiochemické stanovení obsahu (měrné aktivity) radionuklidů ^{14}C , ^{41}Ca a ^{36}Cl bylo provedeno metodami podle schválených standardních operačních postupů akreditované zkušební laboratoře CAL na přístrojích LSC Quantulus (^{14}C , ^{36}Cl , ^{41}Ca) a na detektoru nízkoenergetického gama záření SLP10190 (^{41}Ca). Jedná se o akreditované postupy R-18 – Stanovení aktivity ^{36}Cl metodou kapalinové scintilační spektrometrie a R-05 – Stanovení aktivity ^{14}C kapalinovou scintilační spektrometrií a neakreditovaný postup LP CA-41 – Stanovení ^{41}Ca ve vzorcích z provozu jaderných elektráren a okolí metodou gama spektrometrie s vysokým rozlišením.

Měření byla provedena 1x, tam kde to bylo nezbytné, bylo měření opakováno. Součástí měření bylo i zajištění QA použitím tzv. blanků (požadové vzorky bez analytu k prokázání čistoty během analýzy) a kontrolních měření tzv. opakováním vybraných vzorků pro ověření spolehlivosti analýz.

Profil aktivity radionuklidů je uveden na Obr. 7.

Všechny výsledky jsou přepočteny ke dni ukončení ozařování - 29.11.1989.



Obr. 7 Profil aktivity detekovaných radionuklidů v závislosti na vzdálenosti od vnitřní obličkovky betonového segmentu (Pro přehlednost grafu gama radionuklidy reprezentuje pouze ^{154}Eu , jehož aktivity jsou vyneseny na ose vpravo označené oranžovou barvou. Levá osa zobrazuje hodnoty pro ostatní radionuklidy.)

Pro ověření údajů použitých pro výpočet zdrojového členu pro bezpečnostní rozboru hlubinného úložiště pro biologické stínění reaktoru, jako zdroje RAO nepřijatelného do přípovrchových úložišť, se zvláštním zřetelem k obsahu radionuklidů ^{14}C , ^{36}Cl a ^{41}Ca , byl použit výpočetní model MCNP5. Jednalo se o 2D model reaktoru sestavený podle dostupné dokumentace poskytnuté dodavatelem bloku biologického stínění. Aktivní zóna byla homogenizována do objemového zdroje ve tvaru válce o poloměru 1502 mm. Bylo uvažováno čerstvé palivo UO_2 bez obsahu Gd, s obsahem H_3BO_3 ve vodě, ocelovým reflektorem. Byly zachovány hmotnostní zlomky všech materiálů. Neutronové spektrum vysílané homogenizovanou zónou bylo charakterizováno Wattovou distribucí s parametry $a = 0,988$, $b = 2,249$. Neutronové spektrum v betonu bylo vypočteno ve formátu 238 energetických grup pomocí karty TALLY FMESH. Statistická nejistota vypočteného spektra nepřekročila v jednotlivých grupách hodnotu 10 %.

Klíčovým problémem u provedených výpočtů bylo stanovení přesného složení serpentinitového betonu. Složení betonu se může lišit především množstvím kontaminantů (Cl, Cd a Eu), které jsou pro tento typ betonu typické a také obsahem vodíku. Složení je určeno přírodními

materiály, z nichž byl beton vyroben, a také postupy použitými při jeho výrobě. Složení betonu má vliv nejen na radionuklidy vznikající následkem reakce s neutrony, ale i na změnu spektra neutronů. Oba problémy jsou navíc vzájemně závislé.

Z dat poskytnutých dodavatelem bloku biologického stínění bylo možné stanovit pouze jeho hustotu, která byla $2,280 \text{ g/cm}^3$. Detailní prvkové složení betonu bylo pro účely výpočtu spektra neutronů převzato z benchmarkových experimentů prováděných na reaktoru LR-0, jejichž cílem bylo studovat vliv betonu použitého v JE Temelín na spektrum neutronů.

Pro výpočet produktů aktivace bylo použito jiné složení betonu, které vycházelo z kompendia Gesh et al. (2011), s hustotou upravenou tak, aby odpovídala hustotě $2,280 \text{ g/cm}^3$. Jedná se o standardizované složení serpentinových betonů, doporučené pro účely výpočtů. Do tohoto složení byly uměle přidány kontaminanty kobaltu a europia podle dokumentu Carrol (2001) a chloru podle dokumentu National Ready Mixed Concrete Association (2017). Nicméně je nutné konstatovat, že použité složení nemusí odpovídat přesnému složení serpentinového betonu, který se nachází ve zkoumaném segmentu z JE Greifswald.

Produkty reakce s neutrony v různých vrstvách betonu byly vypočteny pomocí kódu ORIGEN. Pro výpočet byla uvažována hustota toku neutronů na vnitřním povrchu stínění, která byla převzata z dokumentace poskytnuté dodavatelem segmentu betonového stínění. Rekonstrukce přesného časového průběhu výkonu, a tím i hustoty toku neutronů, byla provedena dle dokumentace poskytnuté dodavatelem ve formě tištěných grafů, z kterých byla rekonstrukce provedena. Čas od ukončení aktivace do měření činí 10 135 dnů.

Na základě výše uvedených údajů byly provedeny výpočtové analýzy. Ty posloužily pro ověření experimentálně získaných výsledků radiochemických analýz.

Získané experimentální hodnoty z radiochemických analýz biologického betonového stínění reaktorové nádoby 5. bloku JE Greifswald mohou posloužit k ověření výpočtových predikcí, které byly zpracovány v rámci návrhu způsobu vyřazování z provozu JE Dukovany. Na 5. bloku JE Greifswald byl provozován stejný typ jaderného reaktoru (VVER-440/213) jako jsou provozovány v JE Dukovany.

Výsledky výpočtů aktivačních produktů v technologických částech reaktoru JE Dukovany jsou zpracovány v dokumentu EGP Invest (2012). Pro účely srovnání s výsledky z analýz biologického betonového stínění z JE Greifswald byly vybrány v dokumentu EGP Invest (2012) hodnoty aktivit radionuklidů, které jsou očekávány v případě zahájení okamžitého vyřazování JE Dukovany z provozu. Jedná se o vyřazování po dosažení projektové životnosti elektrárny, tj. 30 let. Vybrány byly pouze radionuklidy, které byly identifikovány i v analyzovaném biologickém betonovém stínění JE Greifswald. V případě JE Greifswald byly použity hodnoty z analýzy vzorku nejbližší reaktorové nádobě. Srovnání hodnot aktivit těchto radionuklidů je provedeno v Tab. 13.

Tab. 13 Přehled aktivačních produktů a jejich aktivit v případě serpentinitového betonu použitého na JE Greifswald (experimentálně zjištěná data – $A_{\text{Greifswald}}$) a na JE Dukovany (teoretické hodnoty – A_{JEDU})

Radionuklid	$A_{\text{Greifswald}}$ (Bq g ⁻¹)	A_{JEDU} (Bq g ⁻¹)	$A_{\text{Greifswald}} / A_{\text{JEDU}}$
⁶⁰ Co	282,57 ± 3,06	102	2,77
³⁶ Cl	2,04 ± 0,24	0,101	20,20
⁴¹ Ca	2,20 ± 0,47	4 240	5,19·10 ⁻⁴
¹⁴ C (kyselina)	0,490 ± 0,039	364	1,35·10 ⁻³
¹⁴ C (spalování)	3,78		1,04·10 ⁻²
¹⁴ C (tavení)	3,57 ± 0,12		9,80·10 ⁻³

Naměřené a modelově vypočtené hodnoty aktivit vybraných radionuklidů jsou ve vzájemném rozporu, který v případě některých radionuklidů dosahuje až násobků jednoho řádu. Z analýzy získaných dat vyplývá, že hlavní neurčitost spočívá v nepřesném popisu složení betonu. Aby mohla být experimentálně zjištěná data s dostatečnou přesností výpočtově ověřena, je nutné určit přesné složení zkoumaného betonu. Toho lze docílit pouze na základě dodatečných analýz biologického stínění (ať už betonu z JE Greifswald, tak i stínění z JE Dukovany).

4.1.3.3 Nejistoty řešení ZL


V dané fázi hodnocení je jednoznačné, že nedostatek informací o chemickém složení biologického stínění bude zatěžovat hodnocení značnou dávkou nejistoty. Bude podléhat možnému zkreslení z využití informací získaných pro střední složení podobných betonů. Použitá vstupní data vychází z malého množství informací, a to zejména z literární rešerše, a jsou mnohdy založena na expertním odhadu, zkušenostech řešitelského kolektivu a archivních datech.

Provedení detailních chemických rozborů použitých betonů biologických stínění JE Greifswald a JE Dukovany nejistoty srovnání výpočtů s experimentálně provedenými analýzami značně sníží.

4.1.3.4 Návrh dalších prací

Pro zpřesnění výpočtů pomocí MCNP by bylo přínosné provést chemické nebo jiné (např. NAA) analýzy, které by pomohly upřesnit složení betonu a zpřesnit tak výpočtový model. Vhodné by bylo, co nejpřesněji určit nejen primární množství příměsí, ale také prvků vedoucích k produkci vybraných kritických radionuklidů (¹⁴C a ⁴¹Ca), kterými jsou například dusík nebo vápník. Při výpočtech nebyla vůbec zaznamenána produkce uhlíku ¹⁴C, což lze vysvětlit tím, že dusík nebyl uveden v chemickém složení betonu a tudíž nebyl zadán do výpočetního modelu. Přitom reakce ¹⁴N(n,p)¹⁴C je o více jak tři řády pravděpodobnější než reakce ¹³C(n,γ)¹⁴C.

Z pohledu výpočtů je, kromě příměsí, důležité také znát množství vodíku, který má vliv na spektrum neutronů. Ocenit tento vliv lze na základě informací z dostupné literatury a provedení

 SÚRAO	Závěrečná zpráva projektu Výzkumná podpora pro bezpečnostní hodnocení HÚ	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 462/2020

potřebné citlivostní analýzy, která však je časově náročná. Výpočet spektra v jednotlivých vrstvách betonu trvá přibližně 21 dnů. Nicméně i tato analýza by byla přínosná.

4.1.3.5 Výstupy ZL

SVOBODA K., ŠÍR D., BURIAN P., MILER V., MATĚCHA J., POŠVAŘ R., TRTÍLEK R. (2017): Charakterizace RAO nepřijatelného do přípovrchového úložiště z vyřazování jaderné elektrárny – biologické stínění reaktoru. – MS SÚRAO ZZ 203/2017, Praha.

4.2 Chování ukládacích obalových souborů (UOS) VJP a RAO v prostředí hlubinného úložiště

4.2.1 Mikrobiální koroze (PB-2015-ZL-S1411-020-MIC)

Hlavní autoři: Steinová J., Černík M., Shrestha R., Ševců A. (TUL), Dobrev D. (ÚJV), Stouilil J. (VŠCHT), Špaček P. (Chemcomex)

4.2.1.1 Cíl ZL

Jedním z kritických parametrů dlouhodobé životnosti kovových materiálů obalového souboru je ovlivnění korozních procesů mikroorganismy v prostředí HÚ. Cílem prací bylo zhodnocení diverzity mikroorganismů, které se mohou v prostředí HÚ v reálných podmínkách v ČR vyskytovat (především etapa 3). Dalším cílem bylo stanovit limitní podmínky pro životaschopnost těchto mikroorganismů (etapa 4), jakými jsou:

- teplota,
- pH,
- tlak,
- pórovitost (použitá suchá objemová hmotnost bentonitu).

Další práce pak měly objasnit vliv mikroorganismů přirozeně se vyskytujících v podzemních vodách (především ve vodě VITA z podzemní laboratoře Josef, dále ve vodě z podzemní laboratoře v Grimselu) na korozi zejména uhlíkové oceli a mědi. Sledovanými parametry byly zejména:

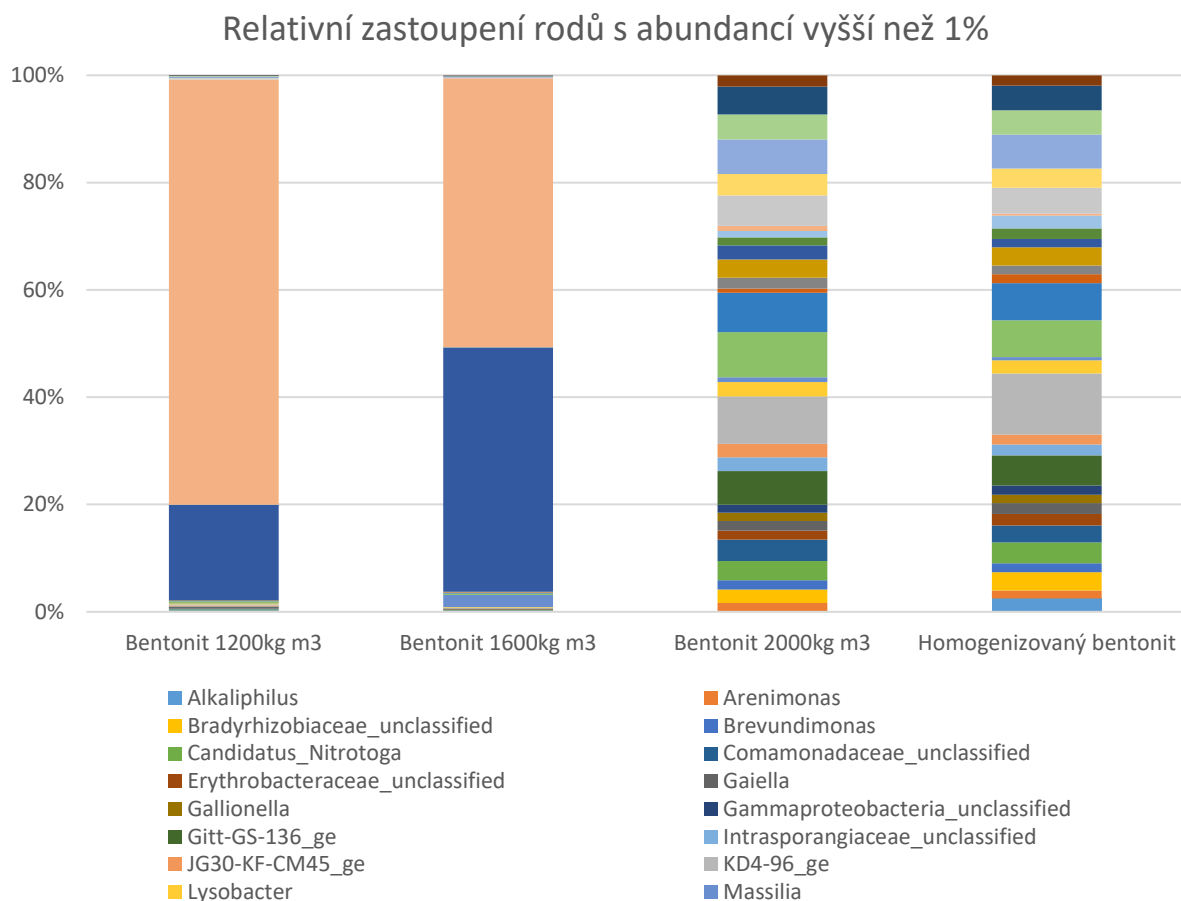
- teplota,
- složení pórového roztoku bentonitu,
- vliv jednotlivých axenických izolátů,
- vliv konkrétních změn prostředí simulující různé metabolismy mikroorganismů.

4.2.1.2 Zhodnocení řešení projektu

Mikrobiologické poměry v podzemních vodách Českého masivu: V průběhu řešení projektu byla studována mikrobiální diverzita podzemních vod na třech lokalitách: Josef, Bukov a Melechov (s využitím Steinová et al. 2019). Na všech lokalitách byly zaznamenány bakterie, které mají schopnost výrazně ovlivnit bezpečnost hlubinného úložiště. Šlo především o síran-redukující (SRB), síru-oxidující, železo-redukující a železo oxidující bakterie. SRB byly nejhojněji zjištěny ve vodě VITA ze štoly Josef, a proto byla tato voda využívána v dalších experimentech.

Limitní faktory pro rozvoj mikrobiální aktivity v prostředí kompaktovaného bentonitu: Při studiu relevantních faktorů, které mohou limitovat rozvoj mikroorganismů v prostředí kompaktovaného bentonitu byly jednotlivé experimenty prováděny v prostředí syntetického roztoku bentonitové pórové vody (SBPOW) bentonitu BaM, dále v prostředí bentonitové suspenze a dále v prostředí kompaktovaného bentonitu (vždy se jednalo o bentonit BaM). Při experimentu studujícím vliv pH došlo pouze při použití nejvyšší studované hodnoty (pH 10) k omezení růstu mikroorganismů. Jako nejlepší způsob vedoucí k omezení mikrobiální aktivity (nikoliv však jejího utlumení) bylo na základě provedených experimentů stanoveno použití

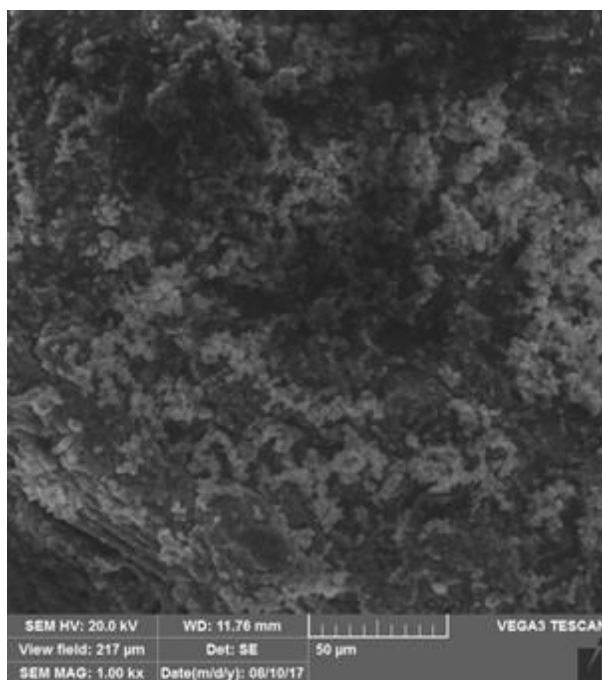
vysoce kompaktovaných bentonitů. Bylo zjištěno, že čím vyšší použítá suchá objemová hmotnost, tím menší mikrobiální aktivita. Nejnižší mikrobiální aktivita byla zaznamenána u vzorku zhutněném na 2000 kg m⁻³ (viz Obr. 8), na kterém je patrné, že vzorek zhutněný na nejvyšší hodnotu má v podstatě identické složení mikrobiální komunity jako vstupní použitý suchý prášek). Experimenty s bentonitovou suspenzí (s a bez zvýšeného tlaku) pak napomohly lépe porozumět limitujícím faktorům v prostředí kompaktovaného bentonitu. Jejich cílem bylo stanovit, zda hlavním limitujícím faktorem je samotný chemismus bentonitu, tlak či prostorová omezení. Z výsledků vyplynulo, že chemismus bentonitu samotný pro bakterie toxický není, naopak v prostředí bentonitové suspenze za anaerobních podmínek dochází k jejich rychlému rozvoji (především denitrifikačních a železo-redukujících mikroorganismů). Vliv tlaku a prostorových omezení se prozatím jednoznačně odlišit neprokázalo a měl by být tedy dále zkoumán v dalších případných experimentech. Významným poznatkem získaným z těchto experimentů bylo, že mikrobiální komunita vyskytující se v prostředí vodou nasyceného bentonitu je určena bakteriemi přirozeně se vyskytujícími v bentonitu, nikoliv bakteriemi dodanými z vnějšího prostředí.



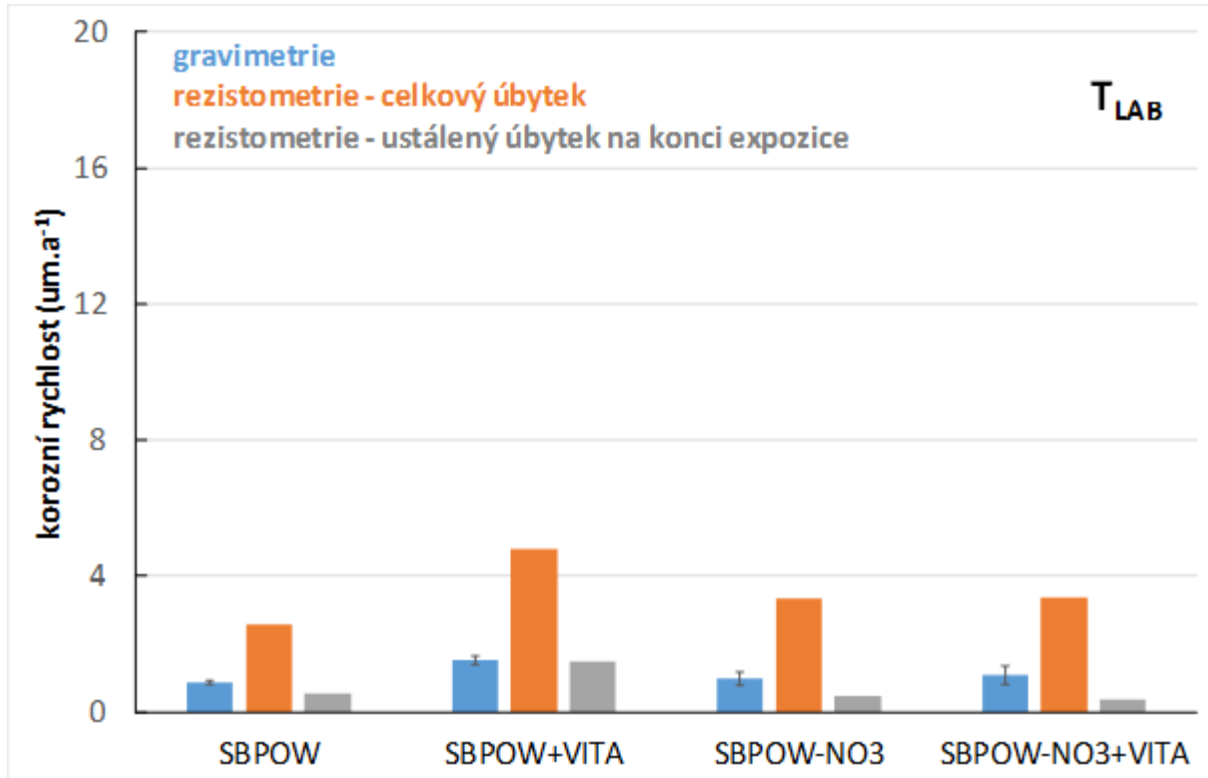
Obr. 8 Relativní zastoupení nejhojnějších rodů mikroorganismů ve vzorcích bentonitu s různou suchou objemovou hmotností (1200, 1600 a 2000 kg m⁻³)

Mikrobiální koroze (etapa 5): Na počátku studie byly provedeny experimenty pro směsi podzemní vody VITA se syntetickou bentonitovou vodou bentonitu BaM (SBPOW) v objemovém poměru 1:9. Vodě VITA dominují síran redukující bakterie (SRB), další metabolické skupiny jsou zastoupeny v menším množství. V případě smíchání vody VITA

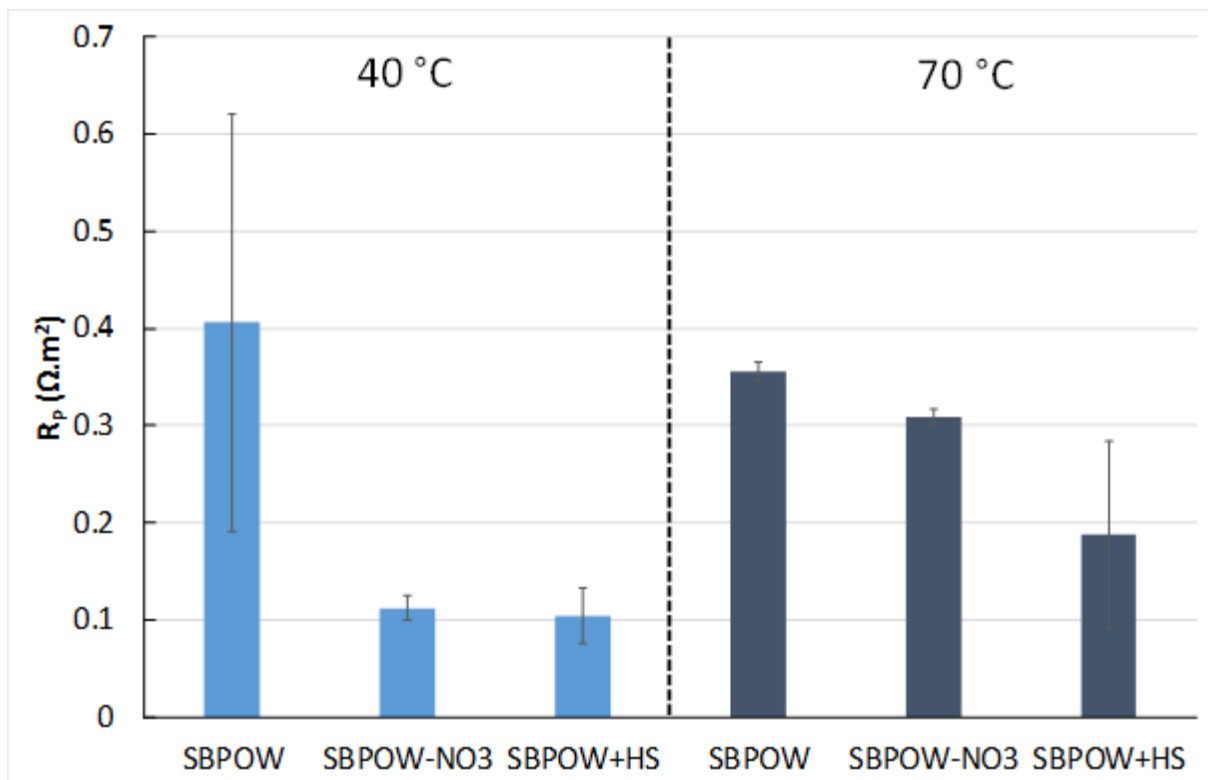
s roztokem SBPOW dojde ke změně druhového složení mikrobiální komunity z důvodu chemického složení roztoku SBPOW. Ve směsi vody VITA a roztoku SBPOW, bohatého na dusičnany, dominovaly denitrifikační bakterie (NRB), u kterých došlo za laboratorní teploty (T_{LAB}) k výrazné proliferaci a osídlení povrchu studovaných vzorků (viz Obr. 9). Za vyšších teplot nebyly bakterie z konsorcia vody VITA životaschopné, protože jsou v podzemní vodě adaptovány na teploty kolem 12 °C. Změny složení roztoku byly během tříměsíční expozice zanedbatelné a neměly přímý vliv na korozní chování uhlíkové oceli. Ovlivnění korozního mechanismu spočívalo převážně v mechanickém blokování povrchu a zvýšení porozity korozních produktů, které tak neměly ideální bariérový účinek. Projevem byla nejen zvýšená celková korozní rychlost stanovená gravimetricky, ale i lokalizace napadení stanovené rezistometrickou sondou, oboje viditelné na Obr. 10. Naopak při absenci dusičnanových aniontů v SBPOW nedošlo k rozvoji NRB a korozní chování uhlíkové oceli ovlivněno nebylo. Při použití axenických izolátů SRB a IRB nedošlo během expozice k výraznému oživení prostředí, přesto byl znatelný slabý vliv SRB na korozi mědi. Následně byly sledovány i uměle vyvolané změny v prostředí do extrémních hodnot spotřebování dusičnanů bakteriemi NRB a redukce síranů na hydrogensulfidy bakteriemi SRB. Odstranění dusičnanů má na uhlíkovou ocel malý vliv, v podobě poklesu polarizačního odporu (nepřímo úměrný korozní rychlosti), viz Obr. 10. Dusičnany umožňují vznik kompaktnější vrstvy magnetitu na povrchu. Redukce síranů na hydrogensulfidy nemá již žádný vliv na uhlíkovou ocel (viz Obr. 11). U mědi je vliv odstranění dusičnanů na korozní chování nejasný. Nicméně redukce síranů na hydrogensulfidy má za následek extrémní pokles polarizačního odporu, tedy zvýšení korozní rychlosti o dva řády (viz Obr. 12).



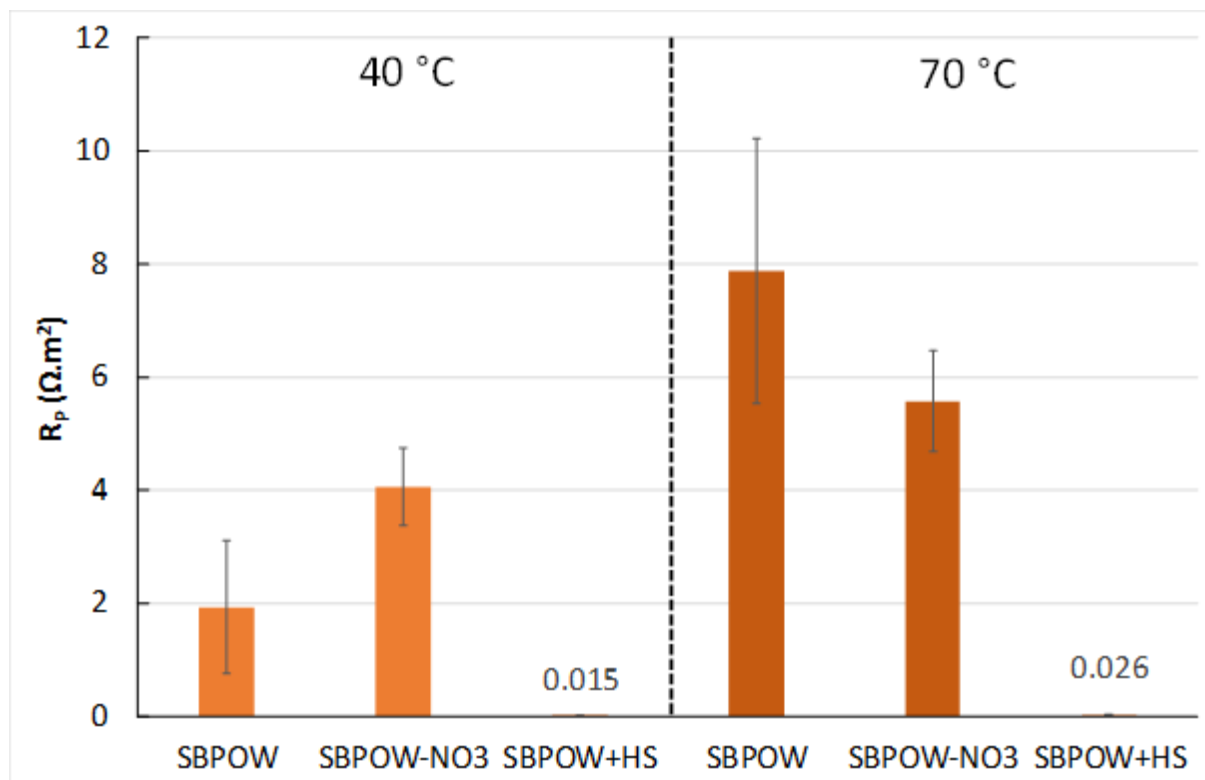
Obr. 9 Povrch uhlíkové oceli s bakteriemi NRB po 3měsíční expozici v anaerobní směsi vody VITA a SBPOW



Obr. 10 Výsledky korozního napadení na vzorcích uhlíkové oceli po 3měsíční expozici v anaerobním roztoku SBPOW, ve směsi vody VITA a SBPOW, v roztoku SBPOW bez dusičnanů a ve směsi vody VITA a roztoku SBPOW bez dusičnanů



Obr. 11 Výsledky měření samovolného korozního potenciálu a polarizačního odporu uhlíkové oceli v roztocích SBPOW s proměnným složením, ve variantě bez dusičnanů a se sírany alternovanými hydrogensulfidy



Obr. 12 Výsledky měření samovolného korozního potenciálu a polarizačního odporu mědi v roztocích SBPOW s proměnným složením, ve variantě bez dusičnanů a se sírany alternovanými hydrogensulfidy

4.2.1.3 Nejistoty řešení ZL

Při studiu mikrobiologických poměrů na studovaných lokalitách výsledky významně ovlivňuje aerobní prostředí výstupu podzemních vod a dále nízká míra oživení hlubokých podzemních vod. Tomu bude v dalších projektech třeba uzpůsobit způsob odběru vzorků podzemních vod, tak aby byl vliv těchto faktorů minimalizován (např. použitím speciálních vzorkovačů pro zapakované vrty, navržených ve zprávě Černík et al. 2019).

Hlavním zdrojem nejistot byla příliš pomalá proliferace mikroorganismů během korozních experimentů. Prostředí bentonitového pórového roztoku je nutričně chudé a nedovoluje v krátkodobém horizontu významné změny v prostředí, způsobené metabolismem mikroorganismů, nebo vznik masivního biofilmu na povrchu kovu. Pozorovaný vliv na korozní procesy tak byl ve většině případů zanedbatelný. Přesto se nedá významný rozvoj mikroorganismů v delším časovém horizontu vyloučit.

4.2.1.4 Návrh dalších prací

V dalších projektech by bylo vhodné zaměřit pozornost zejména na tyto jevy, klíčové pro predikci životnosti kontejneru:

- Ovlivnění funkčních vlastností bentonitu mikrobiální aktivitou (např. illitizace bentonitu atd.). Experimenty by měly probíhat v prostředí anaerobní bentonitové suspenze, ve které po určitém čase dominují železo-redukující bakterie.
- Stanovení limitních hodnot suché objemové hmotnosti pro rozvoj mikrobiální aktivity pro všechny zvažované typy bentonitů.

- Studium korozních dějů v prostředí bentonitové suspenze.
- Možnost tvorby biofilmu SRB na povrchu a vznik okludovaných (kyselých H₂S) roztoků pod biofilmem – možnost korozního praskání uhlíkové i korozivzdorné oceli.
- Možnost tvorby thiosíranů (S₂O₃²⁻) – jako agresivního anionu schopného způsobit bodovou korozi korozivzdorné oceli a stanovit kritické podmínky pro vznik napadení.
- Stanovení limitních hodnot použité suché objemové hmotnosti bentonitu pro rozvoj mikrobiální aktivity za *in-situ* podmínek.
- Studium změn ve struktuře a funkčních vlastnostech bentonitu za *in-situ* podmínek.
- Studium korozních dějů za *in-situ* podmínek.

V případě laboratorních korozních experimentů by měla být provedena intenzifikace a urychlení pozorovaných dějů, i za cenu přídavek nutrientů, které nejsou běžnou součástí pórových bentonitových roztoků.

4.2.1.5 Výstupy ZL

- ČERNÍK M., SHRESTHA R, STEINOVÁ J., STOULIL J., ŠEVCŮ A., ŠPAČEK P., DOBREV D. (2015): Mikrobiální koroze za podmínek hlubinného úložiště pro koncepci ocelový UOS – zhutněný bentonit – Rešeršní práce a plán experimentů. – MS SÚRAO 31/2015, Praha, 73 str.
- ČERNÍK M., STEINOVÁ J., ŠEVCŮ A., MIKEŠ J., ŠPAČEK P., DOBREV D., ČERNOUŠEK T., STOULIL J. (2016): Mikrobiální koroze za podmínek hlubinného úložiště pro koncepci ocelový UOS – zhutněný bentonit. – MS SÚRAO, TZ SÚRAO 71/2016, Praha, 52 str.
- ČERNÍK M., STEINOVÁ J., BURKARTOVÁ K., ČERNÁ K., ŠEVCŮ A., MIKEŠ J., ŠPAČEK P., DOBREV D., ČERNOUŠEK T., STOULIL J. (2017): Mikrobiální koroze za podmínek hlubinného úložiště pro koncepci ocelový UOS – zhutněný bentonit. – MS SÚRAO TZ 196/2017, Praha, 60 str.
- ČERNÍK M., STEINOVÁ J., MIKEŠ J., ŠPAČEK P., DOBREV D., ČERNOUŠEK T., STOULIL J. (2018): Mikrobiální koroze za podmínek hlubinného úložiště pro koncepci ocelový UOS – zhutněný bentonit. – MS SÚRAO TZ 340/2019, Praha, 53 str.
- ČERNÍK M., STEINOVÁ J., MIKEŠ J., ŠPAČEK P., DOBREV D., ČERNOUŠEK T., STOULIL J. (2019): Mikrobiální koroze za podmínek hlubinného úložiště pro koncepci ocelový UOS – zhutněný bentonit. – MS SÚRAO ZZ 403/2019, 81 str.
- ČERNÍK M., STEINOVÁ J., MIKEŠ J., ŠPAČEK P., DOBREV D., ČERNOUŠEK T., STOULIL J. (2019): Microbial corrosion under the conditions of a deep geological repository for the concept of steel UOS – compacted bentonite. Final report. – MS SÚRAO ZZ 403/2019, 81 str.

4.2.2 Korozní produkty (PB-2016-ZL-S0145-025-Korozni Produkty)

Hlavní autoři: Gondolli J., Dobrev D., Klajmon M., Mendoza Miranda A., Kašpar V. (ÚJV); Stouil J. (VŠCHT)

4.2.2.1 Cíl ZL

Cílem tohoto dílčího projektu bylo:

- Shrnutí a analýza dostupných informací o vzniku korozních produktů při korozi uhlíkové oceli a jejich možný vliv na vlastnosti jílové bariéry ukládacího obalového souboru.

- Rešerše dostupných informací o vzniku plyných korozních produktů a jejich migrace v prostředí bentonitu se zvláštním zaměřením na vodík.
- Návrh experimentů zaměřených na stanovení korozních produktů (především pevných) za podmínek úložiště se zhuštěným bentonitem (1600 kg m⁻³).
- Realizace navržených experimentů s cílem získat dostatek korozních produktů pro jejich analytickou identifikaci.
- Vytvoření modelu vzniku korozních produktů za podmínek experimentů s výhledem na jejich extrapolaci na podmínky HÚ.

4.2.2.2 Zhodnocení řešení projektu

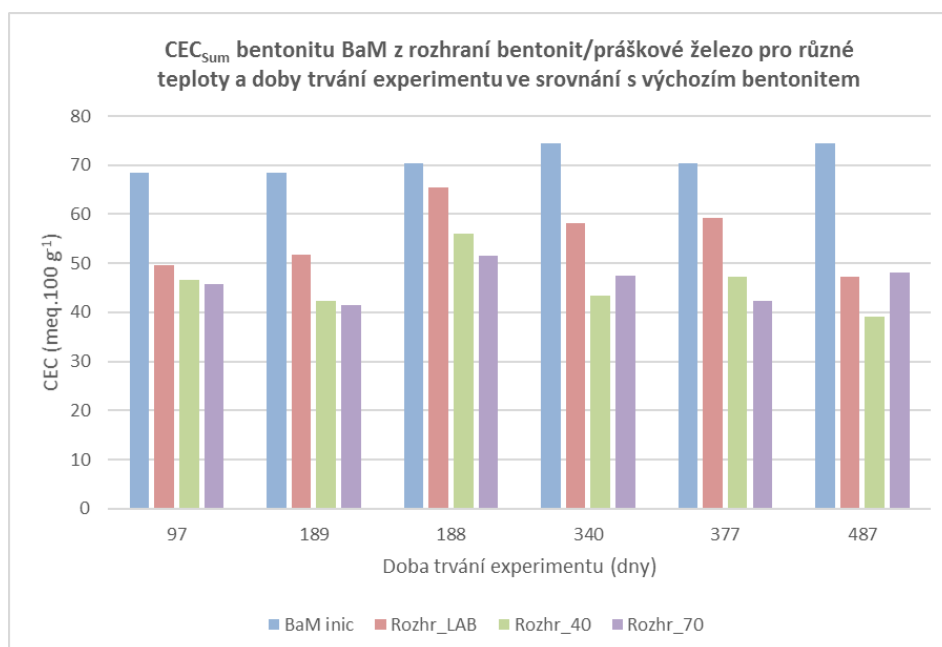
Účelem experimentálního programu v rámci tohoto projektu bylo provést experimenty simulující stav s intenzivní dotací bentonitu ionty železa produkovanými korozí. Tohoto stavu bylo experimentálně dosaženo použitím práškového železa s velkým reakčním povrchem a zvýšeného poměru železo/bentonit ve srovnání s celistvými kovovými vzorky, které se běžně používají při korozních zkouškách. S výjimkou teploty (laboratorní, 40 °C a 70 °C) a času (trvání experimentu od 97 až do 487 dnů) byly ostatní parametry zvoleny jako pevně dané – množství železa a bentonitu v reakčním systému (poměr bentonit/Fe = 3,5:1), složení sytící kapaliny a její tlak (syntetická podzemní voda, 5 MPa) a anaerobní podmínky (experiment byl realizován v rukavicovém boxu; Gondolli et al. 2016 a 2018b). Současně byly vyhodnoceny práce obdobného charakteru, sledující i vývoj plynů při korozních procesech (Mendoza Miranda 2018). Výsledky analýz jednotlivých komponent poskytly následující informace o experimentálním systému (Gondolli et al. 2018c):

- Korozní produkty byly zvolenými analytickými technikami identifikovány pouze v korozní buňce, reprezentující systém železo-voda (resp. železo-pórová voda bentonitu). Těmito korozními produkty jsou magnetit a uhličitany železa (čukanovit, ojediněle siderit). Magnetit byl identifikován prakticky výhradně v korozních celách při 70 °C, čukanovit byl přítomen i v korozních celách při 40 °C.
- Značná část práškového železa, které bylo v experimentálním systému přítomno, nezreagovala. Je pravděpodobné, že došlo k intenzivní reakci železa s vodou na začátku experimentu a poté, kdy došlo k vyplnění mikropórů korozními produkty, došlo k výraznému zpomalení reakcí.
- V alteračním rozhraní bentonitu nebyly identifikovány žádné krystalické minerální fáze, které by nebyly přítomné i ve výchozím bentonitu BaM. V několika vzorcích byly identifikovány illit, kalcit, dolomit; avšak jejich přítomnost nelze jednoznačně spojit s procesy probíhajícími v experimentálním systému, protože se tyto minerály mohou vyskytovat i v přírodním bentonitu a jejich přítomnost či nepřítomnost ve vzorku může být dána heterogenitou bentonitu.
- Vizualní stav bentonitu interakčního rozhraní indikuje přítomnost korozních produktů či alteračních produktů bentonitu (viz Obr. 13), avšak použitými metodami se je nepodařilo identifikovat. Je pravděpodobné, že značná část produktů není krystalická, a proto je nebylo možné identifikovat rentgenovou difrakcí.



Obr. 13 Kompaktovaný bentonit z cely č. 6 (40 °C) po částečném odstranění vrstvy zbytků práškového železa s korozními produkty

- U všech vzorků bentonitu z alteračního rozhraní došlo k výraznému poklesu kationtové výměnné kapacity (CEC) ve srovnání s výchozím bentonitem (viz Obr. 14). Použitá metoda stanovení CEC však neumožňuje odlišit, zda je tento pokles způsoben alterací montmorillonitu nebo přítomností novotvořených korozních produktů či alteračních produktů s velmi nízkou CEC. Také byla u všech těchto vzorků zjištěna změna zastoupení iontů hořčíku a vápníku na iontovýměnných pozicích bentonitu s teplotou – s rostoucí teplotou klesá frakce zastoupení hořčíku v mezivrstvě jílových minerálů, a naopak roste frakce zastoupení vápníku. Frakce zastoupení železa je však velmi nízká.



Obr. 14 Grafické srovnání hodnot CEC_{Sum} vzorků bentonitu BaM z interakčního rozhraní pro různé teploty (laboratorní, 40 a 70 °C) a doby trvání experimentu a výchozího bentonitu BaM. Na ose x je uvedena celková doba trvání každé série vzorků ve dnech, série trvající 188 dnů je replikace půlroční série

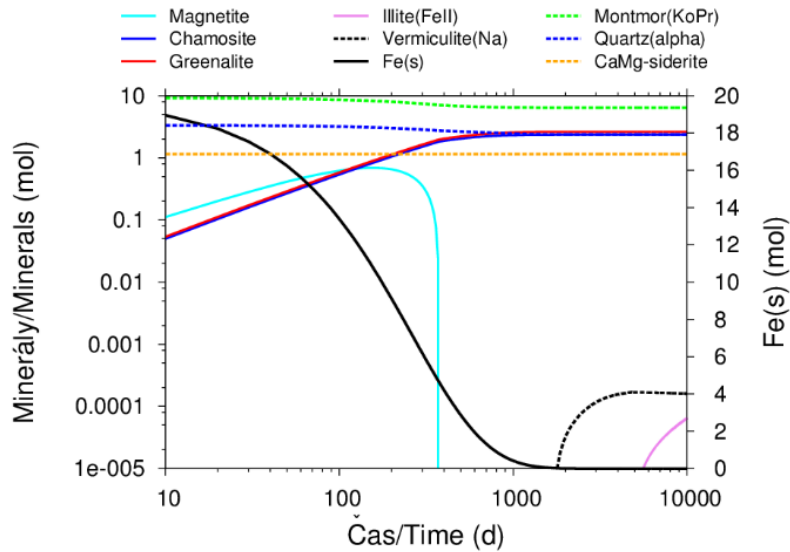
Účelem modelování interakcí v systémech železo-bentonit-voda je přispět k porozumění probíhajících procesů a poskytnout předpovědi jejich chování v dlouhodobém měřítku. Hlavním cílem modelování v projektu byl vývoj prvotního, racionálně zjednodušeného, a přitom stále komplexního modelu pro simulace interakcí mezi Fe, bentonitem a vodou a jeho aplikace na konkrétní zájmový systém.

Geochemický model byl vytvářen v programu PhreeqC (verze 3) s aplikací databáze Thermoddem (verze V1.10) a byl vyvíjen postupně od modelu rovnovážného přes kinetický až po model reakčně-transportní. V každém z uvedených stádií byl model úspěšně aplikován na studovaný systém železo-bentonit-voda a v některých případech také ve zjednodušeném systému železo-voda. Mimo to byl také vytvořen a využit model pro predikci pórové vody bentonitu BaM (Gondolli et al. 2018a).

Při tvorbě modelů se obecně nabízí mnoho možností, které jevy v modelu zahrnout a jakým způsobem je popsat a parametrizovat, přičemž mnoho z důležitých parametrů může být zatíženo značnými nejistotami. Takovými parametry jsou např. korozní rychlost nebo kinetické parametry. Z tohoto důvodu byly v rámci výše uvedených typů modelování provedeny také výpočetní testy s cílem prozkoumat vliv těchto parametrů na modelové výsledky.

Rovnovážné modelování spočívalo v prosté ekvilibraci systému železo-bentonit-voda a nebyly v něm zahrnuty efekty kinetické ani transportní. Za anoxických podmínek byl v systému železo-bentonit-voda predikován ve většině výpočetních scénářů jako dominantní korozní produkt (KP) chamosit (chlorit) a významným se ukázal také greenalit. Za oxických podmínek byl vždy jediným KP hematit. Vliv teploty se na výsledcích příliš neprojevil.

Kinetické modelování, ve kterém bylo zahrnuto i časové měřítko procesů, ukázalo, že použití experimentálně určeného specifického povrchu práškového železa, tj. $10 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$, vede v modelu k nereálně rychlému zreagování železa; modelové výpočty proto byly provedeny se sníženým povrchem $0,1 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ (Gondolli et al. 2018c). Kinetický model pro systém železo-bentonit-voda předpověděl, že za anoxických podmínek je v počáteční fázi vývoje systému dominantním KP magnetit, jehož reakce se ovšem v dlouhodobém měřítku obrátí v rozpouštění a úlohu hlavních KP převzou další minerály inkorporující Fe: greenalit, chamosit a ve velmi dlouhodobém měřítku (stovky, tisíce let) také Fe-illit. Minoritním KP v systému je také čukanovit a za vyšší teploty ($70 \text{ }^\circ\text{C}$) siderit – tyto minerály jsou zřejmě pouze dočasnými KP, které se ve stavu rovnováhy již nevyskytují (viz Obr. 15). Kinetické výsledky jsou ve velmi dobré shodě s výsledky rovnovážnými a poskytly vhled do reakcí, které k rovnovážnému stavu vedou. Kinetické výsledky dále demonstrovaly, že různou volbou parametrů (např. korozní rychlost nebo specifické povrchy minerálů) lze sice dospět k odlišným kvantitativním výsledkům (např. rozdílné časy reakcí), ovšem kvalitativně jsou výsledky vždy podobné, což je reprezentováno neměnnou povahou KP.



Obr. 15 Vývoj minerálních fází v systému železo-bentonit-voda při 70 °C ($A_{sp,Fe} = 0,1 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$)

1D reakčně-transportní modelování v systémech železo-bentonit-voda zohledňovalo navíc difúzní jevy a jeho výsledky obecně v dobré shodě navázaly na zjištění modelu kinetického. Transportní model navíc odhalil, že KP magnetit, čukanovit a greenalit se tvoří zejména přímo v prostoru práškového Fe, a nikoliv uvnitř bentonitu. Uvnitř bentonitu dle modelových výpočtů dochází k tvorbě chamositu a v menší míře i greenalitu, přičemž tvorba greenalitu uvnitř bentonitu byla modelem předpovězena buď za vyšší teploty (70 °C), nebo až v dlouhodobém horizontu. U provedených experimentálních prací (doba 487 dnů), se však identifikovat tyto korozní produkty nepodařilo. Byla provedena také dlouhodobá predikce reálného systému s UOS v rozsahu 10 000 let.

Ač jsou vytvořené modely zjednodušené, obsahují popis mnoha důležitých procesů, např. kineticky kontrolovanou korozi Fe, reakční kinetiku rozpouštění/srážení minerálů, kationtovou výměnu a difúzní transport), a poskytují výsledky, které jsou ve srovnání s jinými modely v literatuře principiálně ve velmi dobrém souladu. Výsledky je však vhodné interpretovat s dostatečnou rezervou, jelikož mnoho z modelových parametrů je zatíženo značnými nejistotami. Např. pro rychlost koroze byla použita pouze odhadnutá hodnota, jelikož pro reálný studovaný systém není známa. Nejistoty jsou rovněž v kinetických parametrech (např. pro srážení chamositu aj.) a v rámci nich zejména v reakčním povrchu minerálů.

S ohledem na hodnocení bezpečnosti HÚ, obdržené modelovací výsledky napovídají, že (i) bentonitová bariéra bude podléhat degradaci v podobě transformace montmorillonitu na fylosilikátové minerály, jako jsou např. chamosit a greenalit (negativní efekt), (ii) vytvářený korozní produkt magnetit může vyplňovat prostor na rozhraní železo-bentonit a snížit tak rychlost reakce železa (pozitivní efekt). Časové měřítko a míra těchto procesů je však předmětem značné nejistoty, jelikož pro mnoho důležitých parametrů byly v modelování použity pouze orientační/odhadované hodnoty.

4.2.2.3 Nejistoty řešení ZL

Výsledky modelování názorně ukázaly, že krátkodobé korozní experimenty nemohou poskytnout data pro validaci výpočtů modelů v dlouhodobém horizontu. Z dlouhodobého hlediska (více jak stovky let) by bylo nutné využít archeologických analogů. Proveditelné

dlouhodobé experimenty v řádu 5 a více let by mohly poskytnout validaci modelu v počátečních fázích, kdy by mělo docházet k tvorbě magnetitu, sideritu a čukanovitu. Volba práškového železa s velkým reakčním povrchem na jednu stranu umožnila urychlit reakci železa a dotaci bentonitu železem (ve srovnání s celistvými kovovými vzorky), na druhou stranu neočekávaně velký (resp. příliš velký) reakční povrch použitého práškového železa daný jeho mikroporézní strukturou vedl pravděpodobně k rychlé reakci na počátku experimentu a po zaplnění volného pórového prostoru korozními produkty došlo k výraznému zpomalení a možná i zastavení koroze v následujícím čase. Pravděpodobně by tento proces mohl nastat i v reálném případě, kdy by korozní produkty z materiálu vnějšího obalu zaplnily pórový prostor bentonitu a došlo by tak k výraznému zpomalení korozní rychlosti.


Obecným problémem použitých analytických technik je fakt, že v okamžiku vzorkování je obtížné odhadnout očekávané fáze v systému (zejména alterační produkty) a pro ně zvolit odpovídající analytické techniky.

Z důvodu krátké doby trvání experimentu (do 487 dnů) nebyl vyvinutý model ani jeho jednotlivé dílčí části použity přímo k modelování vývoje daných konkrétních experimentů v tomto krátkém časovém rozsahu, ale byly použity pro dlouhodobou predikci vývoje experimentálního systému v horizontu přibližně 30 let.

4.2.2.4 Návrh dalších prací

Experiment realizovaný v rámci této práce ukázal, že systém s velkým reakčním povrchem a intenzivní dotací ionty železa se může vyvíjet neočekávaným způsobem a pro dlouhodobé experimenty je obtížně predikovatelný a víceméně nevhodný. Navíc svým uspořádáním, zejména poměrem Fe/jíl a souvisejícím poměrem reakčních ploch, neodpovídá reálným systémům, v nichž je v kontaktu s jílem kov s omezenou reakční plochou a korozní reakce tak probíhá přímo v rámci interakčního rozhraní. Pro účely prvotní identifikace korozních a alteračních produktů je vhodné zaměřit se na archeologické analogy z jílového prostředí, ideálně z anoxických podmínek, které odrážejí dlouhodobé procesy za nižších teplot. Zároveň je však nutné brát v potaz nejistoty spojené s neznalostí „historie“ vývoje korozního prostředí v okolí archeologických analogů. Pro účely prvotní identifikace korozních a alteračních produktů je vhodné zaměřit se na archeologické analogy z jílového prostředí, ideálně z anoxických podmínek, které odrážejí dlouhodobé procesy za nižších teplot. V tomto případě lze za vhodné považovat artefakty libovolného stáří (alespoň nad 50 let), neboť experimentálně je možné dosáhnout rozumných časů v řádu jednotek až první desítky let. Z výsledků geochemických modelování se však ukazuje, že podstatné změny v systémech železo-jíl nastávají až v dlouhodobém časovém horizontu a v laboratorních či *in-situ* experimentech jsou tak zaznamenány např. pouze přechodné korozní/alterační produkty nebo počátky alterací, a jejich rozsah je malý a může být pod detekčními možnostmi analytických technik. Pro studium vlivu počátečního období vývoje HÚ se zvýšenou teplotou je účelné realizovat *in-situ* experimenty za zvýšené teploty, a to jak za přechodných, tak plně anaerobních podmínek. Opět by se ale měly podmínky (zejména poměr Fe/jíl, který je určující pro charakter vznikajících produktů) co nejvíce blížit skutečným podmínkám očekávaným v HÚ.

V rámci geochemického modelování je vhodné se zaměřit na zpřesnění kinetického modelu, zejména jeho klíčových parametrů (např. korozní rychlost, reakční povrchy) a snížení míry

 SÚRAO	Závěrečná zpráva projektu Výzkumná podpora pro bezpečnostní hodnocení HÚ	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 462/2020

nejistot jeho parametrů. U reakčně-transportního modelování je vhodné se zaměřit na vývoj v oblasti vícedimenzionálního modelu (2D a 3D) respektujícího reálné podmínky.

4.2.2.5 Výstupy ZL

GONDOLLI J., DOBREV D., KAŠPAR V., KLAJMON M., STOULIL J. (2016): Chování UOS pro VJP a RAO / Korozní produkty – Věcný a časový harmonogram prací řešitelů korozních a alteračních procesů na rozhraní železo-jíl. – MS SÚRAO TZ 61/2016, Praha.

MENDOZA MIRANDA A.N. (2017): Gas generation and migration in clay media as a result of anaerobic steel corrosion. – MS SÚRAO TZ 187/201878/ENG, Praha.

GONDOLLI J., DOBREV D., KLAJMON M., ČERNOUŠEK T., KOUŘIL M. (2018): Chování UOS pro VJP a RAO/Korozní produkty. 3. Průběžná zpráva. TZ 217/2018, Praha.

GONDOLLI J., KLAJMON M., KOUŘIL M. (2018): Chování UOS pro VJP a RAO/Korozní produkty. Závěrečná zpráva. – MS SÚRAO ZZ 329/2018, Praha.

GONDOLLI J., KLAJMON M., KOUŘIL M. (2018): Corrosion products. Final report. ZZ. 329/2018/ENG, SÚRAO, Praha.

4.2.3 Experimenty s materiály UOS pro bezpečnostní rozbor (PB-2015-ZL-S1392-021-ExperimentyUOS)

Hlavní autoři: Dobrev D., Mendoza Miranda A. N. (ÚJV), Kouřil M. (VŠCHT)

4.2.3.1 Cíl ZL

Hlavním cílem zadávacího listu bylo prvotní ověření korozního chování materiálu vnějšího obalu UOS v alternativních těsnících materiálech. Tyto materiály byly navrženy tak, aby pH jejich pórového roztoku bylo vyšší než 10, neboť předpokladem bylo, že při vyšších hodnotách pH dojde k samovolné pasivaci oceli vnějšího obalu a tím i ke snížení korozní rychlosti.

Proto byly jako alternativní těsnící materiály vybrány směsi bentonitu a cementu v různých poměrech a srovnávací prostředí čistého cementu.

4.2.3.2 Zhodnocení řešení projektu

Korozní zkoušky s materiály potenciálně vhodnými pro vnější obal UOS byly doposud v rámci této problematiky v ČR řešeny v prostředí kompaktovaného bentonitu, resp. simulujících prostředích modelových vod případně suspenzí. Pro překlenutí počáteční fáze vývoje systému v okolí UOS, kdy je koroze ovlivněna zbytkovým kyslíkem, zvýšenou teplotou, zbytkovým dávkovým příkonem a pravděpodobně i mikrobiální aktivitou byly navrženy alternativní směsi těsnících materiálů na bázi bentonit – cement, které by měly umožnit samovolnou pasivaci povrchu uhlíkové oceli a tím i snížení korozní rychlosti. Na druhou stranu se tak vytváří podmínky pro vznik lokálního korozního napadení, které může představovat problém z hlediska životnosti UOS.

Počátečním krokem řešení tohoto Zadávacího listu bylo navržení vhodných směsí bentonit – cement, jejichž pH pórového roztoku bude nad hodnotou 10. Byly tak zvoleny směsi obsahující 2, 10 a 50 hm. % cementu CEM I v bentonitu BCV.

Korozní zkoušky byly provedeny s uhlíkovou ocelí 12020, jejíž vzorky byly umístěny v kompakovaných směsích alternativních těsnících materiálů o suché objemové hmotnosti $1600 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Zároveň byly vzorky uhlíkové oceli umístěny i do čistého cementu o stejné kompaktační hustotě jako u alternativních těsnících směsí, abychom měli srovnání korozního chování vůči čistému cementu (srovnání vůči čistému bentonitu nebylo třeba provádět vzhledem k dostačujícímu souboru dat z dřívějších experimentálních prací). Korozní cely navíc obsahovaly kromě směsí a cementu i čistý kompakovaný bentonit, který byl použit ze dvou důvodů, a to primárně k vyrovnávání případných objemových kontrakcí směsí a cementu po nasycení a dále k simulaci předpokládaného uspořádání v okolí UOS. Na Obr. 16 je zobrazeno uspořádání směsi bentonit – cement a čistého bentonitu.

Korozní cely byly tlakově syceny syntetickou granitickou vodou SGW3 a korozní zkoušky byly provedeny při zvýšené teplotě $70 \text{ }^\circ\text{C}$ za anaerobních i aerobních podmínek.



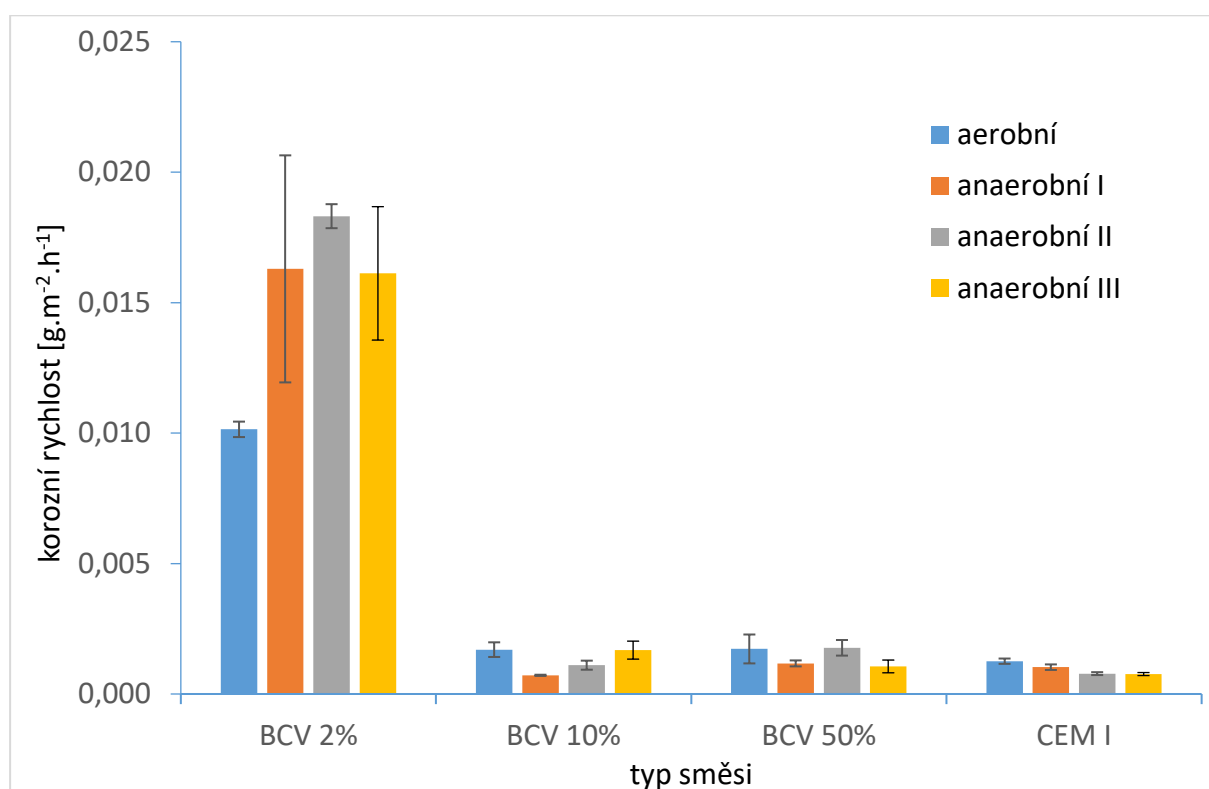
Obr. 16 Ilustrační obrázek směsi alternativního těsnícího materiálu s čistým bentonitem nahoře (nalevo) a korozní cely (napravo) obsahující tuto směs a čistý bentonit

Kromě korozních zkoušek v alternativních těsnících materiálech byly provedeny elektrochemické zkoušky, které poskytly dodatečné informace, které nelze získat v předchozím experimentálním uspořádání. Elektrolytem byla směs syntetické bentonitové vody SBPOW a nasyceného roztoku hydroxidu vápenatého. Koncentrace chloridových aniontů byla vždy stejná a odpovídala koncentraci v SBPOW (udržována přísadkou NaCl). Cely pro elektrochemické zkoušky byly naplněny roztokem, hermeticky uzavřeny a temperovány na požadovanou teplotu (stabilizace laboratorní teploty nebo ohřev na $70 \text{ }^\circ\text{C}$). Sycena byla dusíkem pro odkysličení elektrolytu nebo vzduchem pro dosažení rovnovážné koncentrace kyslíku s atmosférou.

Elektrochemická měření zahrnovala stanovení korozního potenciálu, polarizačního odporu a dále pak cyklickou polarizaci s cílem stanovit, zda je za daných podmínek ocel samovolně v aktivním, či pasivním stavu, případně hodnocení stability pasivního stavu pomocí průřezového a repasivačního potenciálu.

Po ukončení korozních zkoušek bylo provedeno stanovení korozní rychlosti uhlíkové oceli odmožením podle normy ČSN ISO 8047. Visuálně však bylo pozorovatelné na povrchu vzorků lokální korozní napadení, již před samotným odmožením, a proto je korozní rychlost udávána v jednotkách $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$. Tedy úbytek hmotnosti vzorku na jednotkovou plochu za čas. Pokud by korozní úbytek byl rovnoměrný, $1 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ by se přibližně rovnal $1 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$.

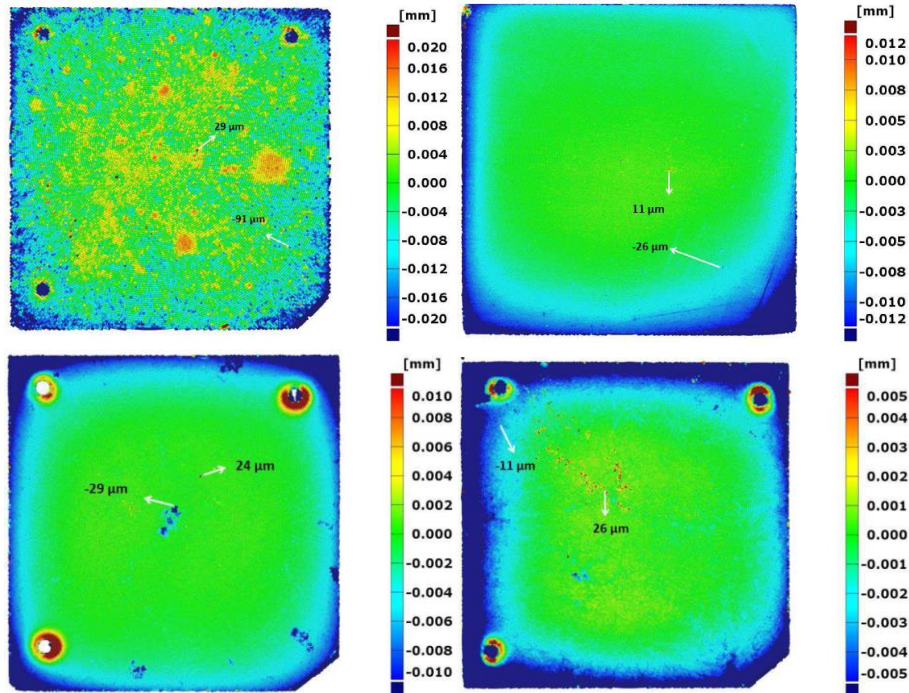
V celé časové řadě tedy u 3, 6 a 9měsíční korozní zkoušky je primárně patrný výrazný rozdíl v korozní rychlosti mezi 2% směsí cementu-bentonitu a ostatními směsmi, resp. cementem. Pokud bychom vzali rovnoměrnou korozní rychlost pro srovnání s korozními zkouškami v bentonitu (stanovené např. v projektu SÚRAO *Výzkum a vývoj ukládacího obalového souboru do stádia realizace vzorku*), tak jsou hodnoty ve 2% směsi obdobné jako v čistém bentonitu. Naproti tomu jsou hodnoty ve zbylých směsích a čistém cementu výrazně nižší, což představuje pozitivní výsledek (Obr. 17). Nicméně toto srovnání je pouze spekulativní, neboť korozní napadení není rovnoměrné. Dalším poznatkem, který je pozorovatelný z hodnot korozní rychlosti, je nevýznamný rozdíl mezi aerobní a anaerobní zkouškou. Pravděpodobně u aerobní zkoušky dochází ke spotřebování kyslíku v bentonitu a následně ve směsích s cementem. Množství kyslíku, které se pak dostane k povrchu ocelových vzorků je natolik nízké, že výrazně neovlivní korozi uhlíkové oceli oproti anaerobní zkoušce.



Obr. 17 Ilustrační obrázek porovnání korozních rychlostí uhlíkové oceli v alternativních těsnících materiálech a cementu po 9měsíční korozní zkoušce za anaerobních i aerobních podmínek

Vzorky exponované v 2% směsi za anaerobních podmínek nevykazují lokalizované napadení. Povrch je celoplošně naleptán. Stejný charakter napadení byl pozorován i za aerobních podmínek. Nepatrné důlky jsou pravděpodobně pozůstatky po přítomnosti vměstků. Lokalizace napadení je výraznější v 10% a 50% směsi, a to jak za anaerobních, tak aerobních podmínek. Objevují se lokálně napadené plochy o velikosti několika desetin milimetru. Vzorky exponované v čistém cementu lokálně napadené plochy nevykazují, nicméně i v tomto prostředí je ojediněle patrna místní koroze.

Hloubka lokálního korozního napadení byla stanovena optickou profilometrií (Obr. 18) a výrazně překračuje průměrné korozní úbytky. Nicméně u provedených korozních zkoušek není pozorovatelný rozdíl v hloubce napadení v čase a není tedy zřejmá propagace lokálního korozního napadení. Není ani pozorovatelný rozdíl mezi aerobní a anaerobní zkouškou.



Obr. 18 Ilustrační obrázek z optické profilometrie vzorků po expozici ve směsi cement/bentonit s 2, 10, 50% cementu a čistém cementu za anaerobních podmínek po 9měsíční korozní zkoušce. Nahoře zleva 2, 10% směsi a dole zleva 50% směs a cement

Na rozhraní mezi alternativními těsnícími materiály, cementem a čistým bentonitem bylo vizuálně pozorovatelné rozhraní, které bylo obohaceno o kalcit. Vývoj tohoto rozhraní z dlouhodobého hlediska není zřejmý a v budoucnu by mělo být řešeno v rámci obecných charakteristik alternativních těsnících materiálů (Obr. 19).



Obr. 19 Ilustrační obrázek rozhraní mezi bentonitem a cementem

Elektrochemické zkoušky v modelových roztocích s různými poměry mezi SBPOW a hydroxidem vápenatým prokázaly samovolný přechod do pasivního stavu při hodnotách pH okolo 11,5. Pasivní vrstva ale není příliš stabilní a při malé anodické polarizaci dochází k jejímu porušení na stíněném povrchu. Proto bude důležitá dlouhodobá stabilita alternativních materiálů, resp. stabilita podmínek při povrchu UOS.

Provedené korozní zkoušky s alternativními těsnícími materiály prokázaly jejich potenciál pro použití v HÚ, zároveň však byla zjištěna i jejich negativa, která mohou jejich použití vyloučit. Konečné hodnocení těchto materiálů nemůže být na základě doposud provedených korozních zkoušek provedeno a ani to nebylo cílem tohoto ZL. Získané informace by měly hlavně sloužit jako návrh pro budoucí práce s ohledem na vyplývající nejistoty z těchto prvotních prací.

4.2.3.3 Nejistoty řešení ZL

Z provedených korozních zkoušek vyplynulo několik nejistot, které se týkají jednak koroze samotného materiálů vnějšího obalu, ale zároveň i alternativních těsnících materiálů. Hlavní nejistotu představuje propagace lokálního korozního napadení v čase. Dle dosažených výsledků není možné jednoznačně určit, zda bude docházet k propagaci lokálního korozního napadení v čase anebo nikoliv. Rozdíl mezi hloubkou penetrace mezi tří a devítiměsíčním experimentem není pozorovatelný, ale vzhledem k relativní krátkodobosti experimentů nemůžeme predikovat chování do dlouhodobějšího časového horizontu. V případě dlouhodobé propagace lokálního korozního napadení by bylo využití alternativních těsnících materiálů nerealizovatelné. Pokud by však lokální korozní napadení bylo omezeno na počáteční vývoj systému a dále by byl povrch oceli pasivován, mohla by se výrazně zvýšit životnost UOS při stejných tloušťkách materiálů oproti prostředí s čistým bentonitem.

Další nejistoty souvisí už se samotnými alternativními těsnícími materiály, a to jednak jejich dlouhodobá stabilita, která nebyla v rámci tohoto zadávacího listu řešena a vznikající rozhraní obohacené o kalcit mezi bentonitem a alternativním těsnícím materiálem. Dlouhodobá stabilita má význam pro udržení vysokého pH a tedy pasivace povrchu oceli a zároveň ovlivnění okolního prostředí. Vznikající rozhraní by mohlo mít vliv na transport radionuklidů a i např. na hydraulickou vodivost prostředí.

4.2.3.4 Návrh dalších prací

Úvodní korozní zkoušky v alternativních těsnících materiálech nám poskytly data, která jsou z jednoho hlediska kladná, neboť dochází k poklesu korozní rychlosti oproti systémům s čistým bentonitem, ale zároveň nám poukazují na rizika spojená s lokálním korozním napadením. Na základě provedených experimentů není možné jednoznačně určit, zda by byly alternativní těsnící materiály přínosem nebo negativem pro bezpečnost hlubinného úložiště. Pro ověření pozitiv/negativ by bylo nutné provést dlouhodobé korozní zkoušky, které by mohly poskytnout informace k vývoji lokálního korozního napadení v dlouhodobém horizontu, což má klíčový význam pro hodnocení životnosti UOS. Zároveň by se získaly i další data o dlouhodobé stabilitě alternativních těsnících materiálů a vznikajícím rozhraní mezi alternativními těsnícími materiály a čistým bentonitem. Vznikající rozhraní nebude přímo ovlivňovat korozi UOS, nicméně může mít vliv na transport radionuklidů, resp. bezpečnostní hodnocení hlubinného úložiště.

4.2.3.5 Výstupy ZL

DOBREV D., KOUŘIL M., MENDOZA MIRANDA A. N. (2019): Korozní zkouška v alkalickém prostředí, – MS SÚRAO, TZ 406/2020, Praha.

4.2.4 Test omezení koroze UOS využitím drenážní vrstvy v úložných vrtech (PB-2016-ZL-S0578-026-TestDrenazi)

Hlavní autoři: Dobrev D., Kašpar V., Mendoza Miranda A. N., Zuna M., Trpkošová D. (ÚJV), Kouřil M. (VŠCHT), Hančilová I., Hokr M. (TUL), Hasal M., Michalec Z. (ÚGN)

4.2.4.1 Cíl ZL

Hlavním cílem tohoto zadávacího listu bylo stanovit vliv rovnoměrného/nerovnoměrného sycení kompaktovaného bentonitu za anaerobních podmínek na korozní napadení kovových materiálů navržených pro ukládací obalový soubor.

Předmět zadávacího listu bylo:

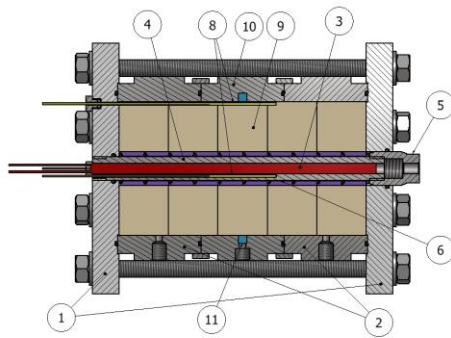
- Návrh a příprava laboratorního fyzikálního modelu/modelů pro ověření vlivu drenáže na korozi uhlíkové oceli a vlastnosti bentonitu.
- Návrh a příprava matematických modelů a nástrojů pro matematické modelování procesů probíhajících při experimentu.
- Příprava zařízení pro fyzikální model *in-situ* v PVP Bukov (v případě, že se navržená hypotéza ukáže jako správná).
- Příprava podrobného věcného a časové harmonogramu prací pro *in-situ* experiment v PVP Bukov.
- Vyhodnocení výsledků a zpracování zprávy.

4.2.4.2 Zhodnocení řešení projektu

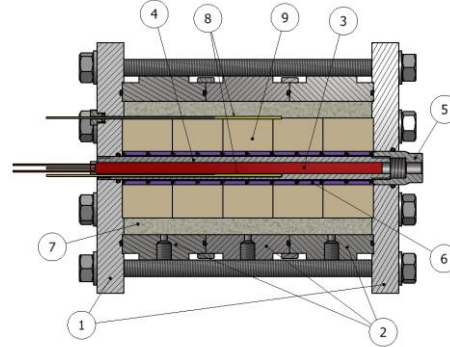
V první fázi řešení projektu byly navrženy experimentální cely, které simulovaly sycení bentonitu puklinou a rovnoměrné sycení bentonitu pomocí drenážní vrstvy (Obr. 20). Experimentální cely byly koncipované tak, že směrem od vzorků uhlíkové oceli klesala teplota k vnějšímu povrchu bentonitu.

Pro tyto experimentální uspořádání bylo provedeno numerické modelování postupné saturace bentonitu, které mělo poskytnout okrajové podmínky pro vedení experimentu. Výsledky numerického modelování specifikovaly podmínky, za kterých by mělo dojít k úplnému nasycení bentonitu v místě vstupu vody modelovou „puklinou“ a zároveň část bentonitu by zůstala v nenasyčeném stavu, a přitom systém s drenážní vrstvou za stejných podmínek bude nasycen v co „nejkratším“ čase. Cílem bylo také při těchto podmínkách dosáhnout co největšího rozdílu mezi maximálním a minimálním stupněm nasycení bentonitu v cele s modelovou „puklinou“. Zároveň byl kladen požadavek na plné nasycení bentonitu v oblasti vstupu sytící vody po dobu minimálně jednoho měsíce před ukončením experimentu z důvodu sledování vlivu nerovnoměrné saturace na korozi uhlíkové oceli.

SVISLÝ ŘEZ APARATUROU (VARIANTA BEZ DRENÁŽNÍ VRSTVY)

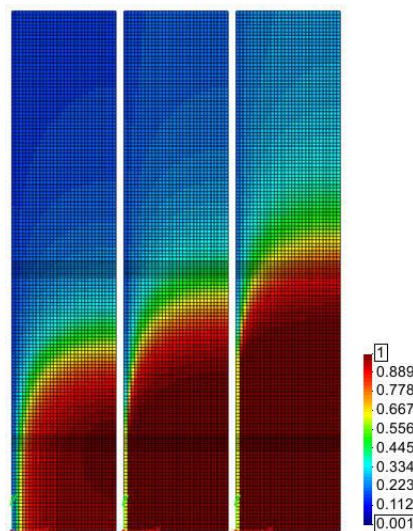


SVISLÝ ŘEZ APARATUROU (VARIANTA S DRENÁŽNÍ VRSTVOU)



Obr. 20 Ilustrační obrázek aparatury bez drenáže vlevo a s drenážní vrstvou vpravo. 1 – víka, 2 – okruží, 3 – topidlo, 4 – trubka, 5 – stahovací matice, 6 – vzorky, 7 – drenážní vrstva, 8 – teplotní čidla, 9 – bentonitová mezikruží, 10 – okruží s vnitřní drážkou, 11 – kroužek z porézního materiálu

Pro numerické modelování byly použity tři různé programy: CODE_BRIGHT, COMSOL Multiphysics v5.2 a Flow 123d, ve kterých řešení představovalo problém termo-hydro-mechanické (THM) odezvy kompakovaného bentonitu na tlakové namáhání vodou za současného ohřevu bentonitu. V rámci řešení zadávacího listu se však mechanické chování neuvažovalo a řešil se tedy transport tepla a proudění vody. Výsledkem numerického modelování před experimentem bylo doporučení sytit kompakovaný bentonit tlakem 2MPa. Ilustrační obrázek výsledku numerického modelování v programu CODE_BRIGHT pro tři různé tlaky sycení je uvedeno na Obr. 21.



Obr. 21 Ilustrační obrázek porovnání výsledného modelového stupně nasycení v čase 4380 hod v modelech při uvažování topidla. Obrázek vlevo zobrazuje výsledek modelu s tlakem sycení 0,01 MPa, obrázek uprostřed 2 MPa, obrázek vpravo 5 MPa. Legenda udává maximální, resp. minimální stupeň nasycení

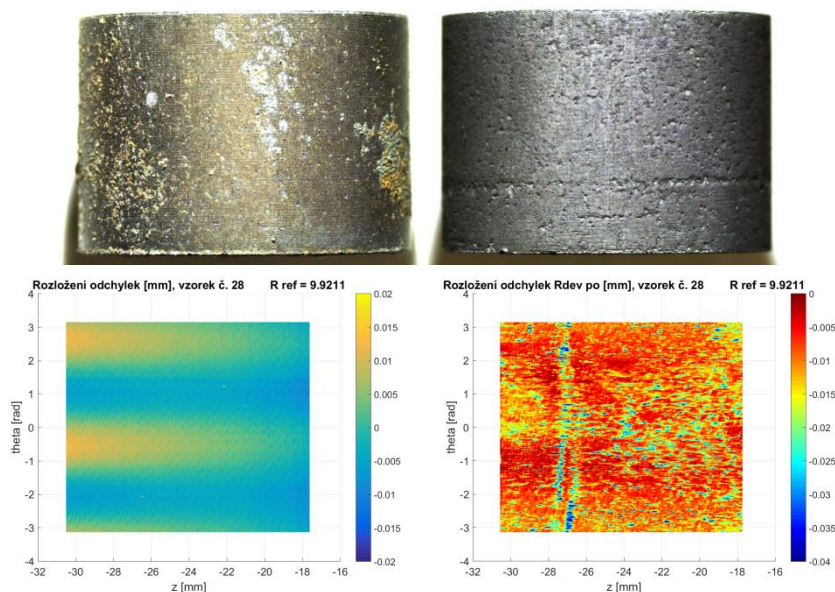
Jak již bylo uvedeno, byl experiment prováděn ve dvou typech korozních cel, které se lišily pouze způsobem sycení kompakovaného bentonitu. V případě systému s drenážní vrstvou byla tato vrstva tvořena křemičitým pískem a u systému se simulovanou „puklinou“ byla využita pro sycení drážka. Experiment byl připraven s kompakovaným bentonitem BaM o suché objemové hmotnosti 1600 kg m^{-3} , se vzorky uhlíkové oceli 12022, u nichž byla teplota na povrchu regulována během experimentu na $70 \text{ }^\circ\text{C}$. Experiment probíhal za anaerobních

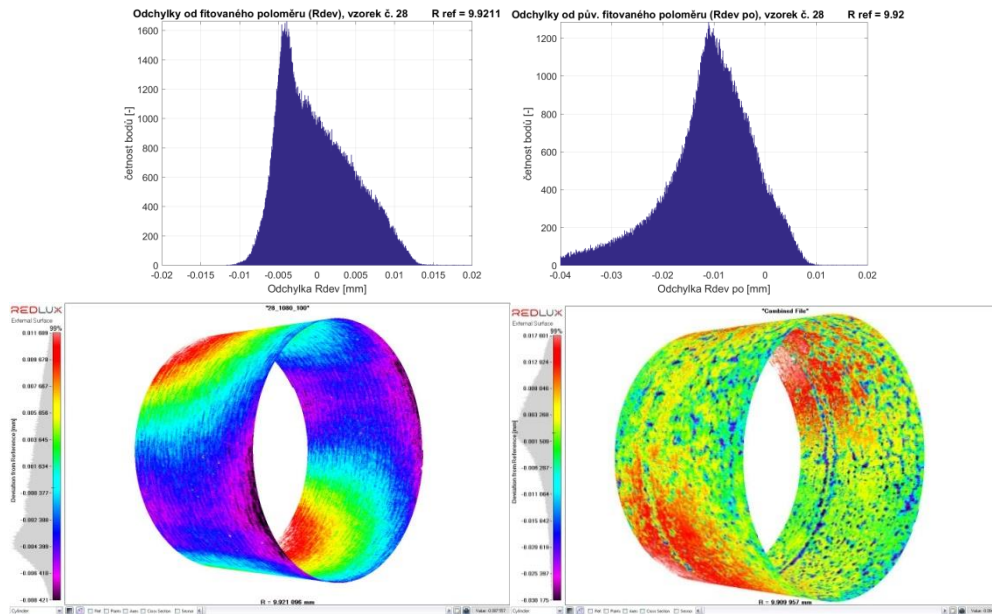
podmínek v rukavicovém boxu s inertní argonovou atmosférou ve dvou časových řadách (0,25 r a 0,5 r). Po jeho ukončení byly vzorky uhlíkové oceli podrobeny analýzám s cílem zjistit lokální korozní napadení uhlíkové oceli a definovat profil nasycení kompaktovaného bentonitu v jednotlivých experimentálních celách.

Analýza vzorků uhlíkové oceli byla primárně zaměřena na lokální korozní napadení povrchu v závislosti na poloze vzorku v experimentální cele a na nasycení bentonitu obklopující vzorek. Pro grafické zobrazení lokálního korozního napadení byla využita optická profilometrie, kdy byly vzorky pro lepší srovnání změřeny před a po experimentu. Hlavním pozorovaným jevem, který byl patrný hlavně u systému s drenážní vrstvou, byl průnik vody mezi jednotlivými bentonitovými segmenty, který způsobil výrazněji lokálně ohraničenou korozi ve tvaru prstenců (viz Obr. 22). Na zde uvedeném histogramu je patrný nárůst četností odchylek od ideálního válce, který odpovídá bodovému napadení povrchu uhlíkové oceli, jak je patrné na grafickém zobrazení.

Stanovené korozní rychlosti uhlíkové oceli po experimentu neměly jednoznačně pozorovatelný trend, který se očekával hlavně u cely bez drenážní vrstvy, kdy byl předpoklad poklesu korozní rychlosti směrem od sytící drážky. Nebyla patrná ani souvislost mezi nasycením bentonitu a stanovenými korozními rychlostmi. Je nutné ovšem zdůraznit, že stanovené korozní rychlosti jsou zatíženy relativně velkou nejistotou, která plyne z neznalosti rozložení vlhkosti v bentonitu v čase a malým statistickým souborem.

Z celkového hlediska nebyl pozorován jednoznačně prokazatelný efekt rovnoměrného vs. nerovnoměrného sycení bentonitu na korozní napadení uhlíkové oceli. Je však potřeba vzít v úvahu, že provedené experimenty byly úvodní v této problematice a v relativně malém měřítku co se týká rozměrů aparatury. Zároveň byly z hlediska času krátkodobé, takže nám poskytly hlavně úvodní vstupní informace, které by byly využitelné pro návrh dlouhodobého experimentu ve větším měřítku.

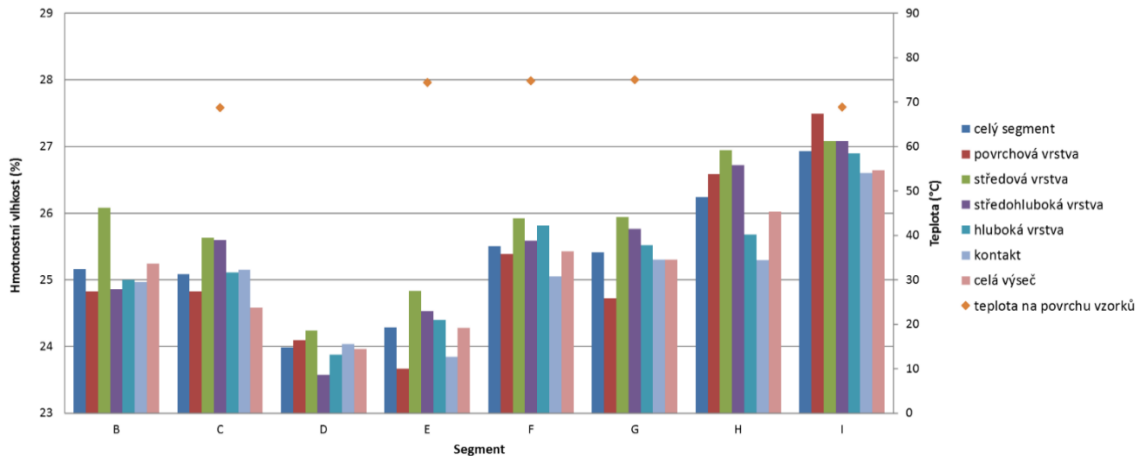




Obr. 22 Ilustrační obrázek výsledků měření vzorku uhlíkové oceli optickou profilometrií před (nalevo) a po experimentu (napravo). Nahoře vzorek s korozní a bez korozní vrstvy

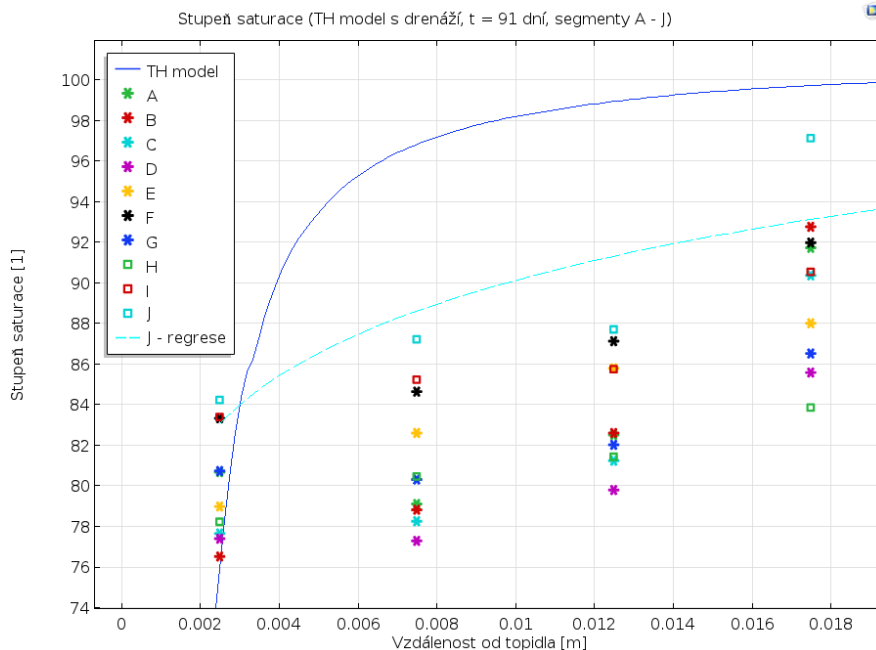
Stanovení vlhkosti v kompaktovaném bentonitu po ukončení experimentu bylo provedeno s cílem zjistit prostorové rozložení vlhkosti a tyto data dát do souvislosti s korozním napadením a dále jako vstup pro ověření numerických modelů. Jednotlivé bentonitové segmenty v experimentálních celách byly děleny po délce a výšce, aby bylo dosaženo co nejhustší „sítě“ bodů s hodnotami vlhkosti. Dle očekávání byly systémy s drenážní vrstvou více nasyceny oproti systémům bez drenážní vrstvy. Nasycení bentonitu v celách bez drenážní vrstvy bylo sice nepatrně vyšší v místech s modelovou „puklinou“, ale rozdíl oproti nejvzdálenějším segmentům bentonitu nebyl tak výrazný. Úvodní předpoklady o výrazném rozdílu v nasycení bentonitu při sycení modelovou „puklinou“ tlakem 2 MPa se nepotvrdily (Obr. 23).

Z celkového hlediska se ukázalo, že pro tento typ experimentů je nutné pracovat ve větším měřítku, abychom mohli odhadovat chování reálného systému a efekt rovnoměrného, resp. nerovnoměrného sycení byl výraznější.



Obr. 23 Ilustrační obrázek rozložení vlhkosti v cele bez drenážní vrstvy po 0,25 r

Numerické modelování po experimentu bylo schopné relativně dobře kvantitativně postihnout rozložení vlhkosti v závislosti na vzdálenosti od topidla v obou systémech, tedy s drenážní vrstvou (viz Obr. 24) a bez drenážní vrstvy. Nerovnoměrné rozložení vlhkosti ve směru osy nebylo možné modely postihnout jednak z důvodů neznalosti některých parametrů bentonitu a nejistotami danými experimentálním uspořádáním. Pro přesnější srovnání by bylo vhodné některé vstupní parametry monitorovat v průběhu experimentu, abychom znali vývoj v čase. Obecně byl charakter sycení bentonitů odlišný od počáteční predikce v obou systémech.



Obr. 24 Ilustrační obrázek porovnání průměrného stupně saturace v závislosti na vzdálenosti od topidla pro experiment s drenážní vrstvou. A–J je označení vzorků bentonitu ve směru osy cely, u nichž byla stanovována vlhkost po experimentu v závislosti na vzdálenosti od topidla

Na základě experimentálních výsledků byla v rámci projektu navržena dvě řešení *in-situ* experimentu, kde by byl řešen vliv nerovnoměrného sycení na korozní chování uhlíkové oceli. V rámci návrhu řešení byly specifikovány požadavky na ostatní práce spojené s *in-situ* experimentem a specifikovány nejistoty.

Práce v tomto zadávacím listu poskytly prvotní informace pro řešení problematiky vlivu nerovnoměrného sycení na korozní chování uhlíkové oceli a zároveň specifikovaly nejistoty a požadavky na řešení této problematiky. Aby byl v budoucnu dostatečně využit potenciál těchto experimentů, je potřeba experimentální práce sladit s numerickým modelováním, kdy by jednotlivé týmy měly spolupracovat již na přípravě a technickém řešení pro optimalizaci výstupů z hlediska požadavků na studium korozního chování a zároveň na numerické modelování THM procesů.

4.2.4.3 Nejistoty řešení ZL

Nejistoty spojené s vyhodnocením vlivu nerovnoměrného sycení na korozní chování uhlíkové oceli jsou spojené s malým měřítkem experimentu, kdy není možné dosáhnout stavu plného nasycení a „suchého“ bentonitu v rámci jedné cely. S malým počtem opakování experimentu nelze statisticky hodnotit obdržené výsledky. Dále nejistotu představuje čas experimentu, resp. jeho krátkodobost, kdy pro skutečný odhad dlouhodobého vlivu nerovnoměrného sycení bylo potřeba dlouhodobých korozních zkoušek.

U numerického modelování představují hlavní nejistotu vstupní parametry, které nebyly pro bentonit BaM o použité kompaktné hmotnosti vždy známy a musely se odhadovat případně byly v rámci ZL stanoveny.

4.2.4.4 Návrh dalších prací

Navázání na provedené úvodní experimenty v ZL by mělo být směřováno do experimentů v přírodním granitoidním prostředí v minimálně středním měřítku (co se týká velikosti bentonitových segmentů), aby sycení bentonitu bylo co nejvíce nehomogenní. Tyto experimenty by měly být dlouhodobé v řádu několika let z důvodu posouzení vlivu nerovnoměrného nasycení bentonitu na korozní napadení uhlíkové oceli.

Pro numerické modelování by měly být nezávisle stanoveny parametry bentonitů vstupujících do THM modelů a zároveň by experimenty, které budou sloužit k validaci těchto modelů, by měly být navrhovány v součinnosti s experimentálními týmy, aby byly optimalizovány požadavky na měření v průběhu experimentu mezi oblastí korozního napadení, saturace bentonitu a numerického modelování.

4.2.4.5 Výstupy ZL

DOBREV D., KAŠPAR V., MENDOZA MIRANDA A. N., ZUNA M. (2017): Test omezení koroze UOS využitím drenážní vrstvy v úložných vrtech. – MS SÚRAO TZ 199/2017, Praha.

DOBREV D., HANČILOVÁ I., HASAL M., HOKR M., KAŠPAR V., KOUŘIL M., MENDOZA MIRANDA A. N., M. ZUNA (2018): Test omezení koroze UOS využitím drenážní vrstvy v úložných vrtech. – MS SÚRAO TZ 291/2018, Praha.

ZUNA M., DOBREV D. (2018): Návrh in-situ modelu pro PVP Bukov a návrh věcného a časového harmonogramu prací pro PVP Bukov. – MS SÚRAO TZ 306/2018, Praha.

DOBREV D., BLAHETA R., HANČILOVÁ I., HASAL M., HOKR M., KAŠPAR V., KOUŘIL M., MICHALEC Z., TRPKOŠOVÁ D., ZUNA M. (2016) Vliv sycení bentonitu na korozi materiálů ukládacího obalového souboru. – MS SÚRAO ZZ 72/2016, Praha.

4.3 Chování tlumících, výplňových a dalších konstrukčních materiálů v prostředí hlubinného úložiště

4.3.1 Verifikace metodiky pro stanovení kationtové výměnné kapacity bentonitu (metoda Cu-trien) (PB-2015-ZL-S1307-019-CECBentonit)

Hlavní autoři: Červinka R., Kolomá K. (ÚJV)

4.3.1.1 Cíl ZL

Stanovení kationtové výměnné kapacity a obsazení kationtů na výměnných místech jílových minerálů ze skupiny smektitu je jedním z hlavních charakteristik bentonitové inženýrské bariéry. Rychlá a přesná metoda bude důležitá zejména při kontrole jakosti vstupního materiálu.

Cílem tohoto dílčího projektu bylo zejména srovnání metodik stanovení kationtové výměnné kapacity (CEC) na vzorcích bentonitu z projektu FEBEX II Dismantling the Plug – (Grimsel Test Site) a to konkrétně metody Cu(II)-trien s jinými metodami stanovení. Nicméně vlastní srovnání (verifikace metodiky) nebyla součástí tohoto projektu.

4.3.1.2 Zhodnocení řešení projektu

Na dodaném vzorku (10/2015) s označením B-S-36-3 (viz Obr. 25) z projektu FEBEX II Dismantling the Plug – (Grimsel Test Site) bylo dle instrukcí provedeno 13 odběrů (3 na orientační stanovení vlhkosti a 10 na stanovení CEC a vyměnitelných kationtů). CEC a vyměnitelné kationty byly stanoveny pomocí certifikované metody s Cu(II)-trienem (Červinka 2014). Analytika byla zajištěna pomocí techniky UV/VIS spektrofotometrie (CEC_{VIS}) a atomové absorpční spektrometrie (CEC_{Cu}).



a



b

Obr. 25 Dodaný vzorek bentonitu B-S-36-3. a) přední strana, b) odběr vrtnou korunkou

Výsledky potvrdily, že se jedná o Mg-Ca bentonit s průměrnou hodnotou *CEC* ($n = 10$) rovnou $97,6 \pm 1,8$ meq/100g pro *CEC*_{vis} a $102,3 \pm 1,6$ meq/100g pro *CEC*_{Cu}. Výsledky byly zahrnuty do celkového zhodnocení projektu FEBEX II Dismantling the Plug – (Grimsel Test Site).

Metoda stanovení *CEC* a vyměnitelných kationtů s Cu(II)-trienem je velmi rychlá a poměrně jednoduchá (robustní), což ji předurčuje jako vhodnou metodiku pro základní charakterizaci jílových materiálů (bentonitů) v rámci materiálového výzkumu pro hlubinné úložiště a kontrolu kvality.

4.3.1.3 Nejistoty řešení ZL

V původním plánu tohoto dílčího projektu bylo z každého dodaného vzorku odebrat 2 sub-vzorky. Nicméně koordinátor projektu FEBEX II Dismantling the Plug – (Grimsel Test Site) dodal pouze jediný vzorek B-S-36-3. Dle dohody ze strany SÚRAO byly nakonec všechny zbylé odběry provedeny na tomto dodaném vzorku (celkem 13 vzorků, 3 na stanovení vlhkosti a 10 na stanovení *CEC*). Výsledky popisují tedy pouze jeden vzorek komplexního *in-situ* experimentu a srovnání s ostatními institucemi, které se podílely na stejném měření, je tedy problematické.

4.3.1.4 Návrh dalších prací

Metodika stanovení kationtové výměnné kapacity a vyměnitelných kationtů je jedna z hlavních metod charakterizace jílových (bentonitových) materiálů. Metodika s využitím Cu(II)-trienu může být dále technicky optimalizována a vhodné je rovněž zavedení standardní amonium-acetátové metody pro jílové materiály.

4.3.1.5 Výstupy ZL

ČERVINKA R., KOLOMÁ K. (2016): Stanovení *CEC* a vyměnitelných kationtů na vzorku B-S-36-3. – MS SÚRAO TZ 39/2016, Praha.

ČERVINKA R., KOLOMÁ K. (2016): Determination of *CEC* and exchangeable cations on sample B-S-36-3. – MS SÚRAO TZ 39/2016/ENG, Praha.

4.3.2 Experimentální hodnocení plynopropustnosti inženýrských bariér hlubinného úložiště (PB-2017-ZL-U3831-036-Plynopropustnost)

Hlavní autoři: Svoboda J., Vašíček R., Štáštka J., Nádherná D., Pacovská J. (CEG ČVUT); Mendoza Miranda A. N. (ÚJV)

4.3.2.1 Cíl ZL

Jedním z kritických procesů, který může ovlivnit dlouhodobou bezpečnost navrženého konceptu hlubinného úložiště vyhořelého jaderného paliva s využitím ocelových obalových souborů, je vznik plynů z jejich anaerobní koroze. Je třeba prokázat, že vznikající plyny nemohou negativně ovlivnit bezpečnostní funkce inženýrských bariér ani bezpečnostní funkci horninového prostředí.

Problém vznikajících plynů není jenom problémem úložiště vyhořelého jaderného paliva, ale i úložiště ostatních odpadů nepřijatelných do povrchových úložišť. Zde navíc je nutno uvažovat i mikrobiologický rozklad organických složek odpadů a radiolýzu, které rovněž vedou ke vzniku plynů. Vznikající plyny by mohly představovat i nosič pro některé mobilní radionuklidy, jako je například uhlík ^{14}C .

Cílem zadávacího listu Experimentální hodnocení plynopropustnosti inženýrských bariér hlubinného úložiště bylo tedy, na základě podrobné literární rešerše, zahájit experimentální program hodnocení plynopropustnosti inženýrských bariér uvažovaných pro hlubinné úložiště.

4.3.2.2 Zhodnocení řešení projektu

V úvodní části projektu byla provedena rešerše zahraničních zkušeností v oblasti plynopropustnosti inženýrských bariér a rešerše postupů a aparatur, které se používají pro studium produkce plynu při korozi materiálů ukládacího obalového souboru včetně jejich případného využití pro studium jeho migrace. Rešerše se zaměřila jak na zkoušky se vzduchem, tak zkoušky s vodíkem.

Zahraniční výsledky ukazují, že pro plynopropustnost jsou důležité následující vlastnosti a jevy: plynopropustnost (nenasyčeného) bentonitu (permeabilita), mechanismus transportu v nasyceném bentonitu (tvorba dilatantních cest), velikost tlaku pro průlom (a potřebný čas), schopnost samohojení materiálu a systému po průrazu plynu, role diskontinuit.

Rešerše postupů a aparatur s vodíkem ukázala, že většina experimentálních postupů se soustředila pouze na jednu oblast. Buďto na vývin vodíku v důsledku koroze anebo transport vodíku skrz bentonit. Jediný dohledaný komplexní test, provedený v rámci projektu FORGE, byl zatížen značnou nejistotou vlivem nemožnosti přesné kvantifikace vyvíjeného vodíku (nebylo možné stanovit povrch železného prášku použitého k vývinu vodíku a množstvím dostupné vody pro jeho korozi). Z tohoto důvodu byl pro další experimentální program s vodíkem zvolen postup s externím zdrojem vodíku.

V experimentální části byla provedena prvotní analýza materiálu inženýrské bariéry ve vztahu k plynopropustnosti. Byly provedeny testy se vzduchem a vodíkem. Jako zkoumaný materiál byl zvolen Ca-Mg bentonit označen BaM (Bentonit a montmorillonit). Zkoušky byly prováděny při různých objemových hmotnostech (ρ_d cca 1200-1800 kg m⁻³), a to při přirozené vlhkosti a při plném nasycení. Jako přirozená vlhkost w byla brána hodnota cca 7-10 %, tedy taková, s jakou byl materiál dodán výrobcem Keramost, a. s. Plně nasycené vzorky byly zkoušeny jak v homogenním stavu, tak s předem vytvořenou diskontinuitou ve směru proudění vody/vzduchu.

Vzhledem k časové náročnosti prací a požadovanému termínu dokončení se experimentální analýza se vzduchem zaměřila na problematiku jevů spojených s mechanickým poškozením bentonitu tlakem plynu. Cílem bylo zahájit experimentální práce na prvotním zhodnocení mechanického ovlivnění materiálu inženýrské bariéry plynem. Práce se vzduchem byly rozděleny do dvou tematických částí:

- a. Plynopropustnost bentonitu s přirozenou vlhkostí
- b. Plynopropustnost nasyceného bentonitu – cyklické zkoušky průrazu a sycení

Výsledky z obou oblastí jasně ukázaly, že hlavním determinujícím faktorem pro chování materiálu BaM z hlediska plynopropustnosti je objemová hmotnost sušiny, neboť s nárůstem objemové hmotnosti sušiny se vlastnosti BaM zlepšují.

Výsledky z experimentů s nasyceným bentonitem neprokázaly, že by cyklickým zatěžováním plynovými zkouškami materiál postupně degradoval. V některých případech došlo ke zhoršení vlastností, avšak tato změna se ustálila a nebyla významná. Spíše naopak, hodnoty hydraulické vodivosti a bobtnacího tlaku byly ve většině případů systematicky lepší než referenční hodnoty.

Z výsledků je patrný podstatný vliv časového hlediska, protože dlouhodobé sycení vodou mělo významný dopad na vlastnosti BaM. Vliv časového měřítka se velmi zřetelně projevil u vzorků s diskontinuitou. Přestože hodnoty propustnosti a bobtnacího tlaku se výrazně s časem neměnily, proces ustálení hodnot průrazu trval podstatně déle než u homogenních vzorků a charakter chování při zkouškách byl odlišný.

Zjištění z testů se vzduchem indikují:

- Procesy v materiálu jsou dlouhodobé a je třeba je zkoumat v dlouhodobém časovém horizontu.
- Ustálení hodnot propustnosti a bobtnacího tlaku nelze brát jako indikátory ukončení mechanických změn uvnitř bentonitu (homogenizace, zahojení spár). Tyto hodnoty se ustálí podstatně dříve, než dojde k zahojení.
- Průraz plynu nezpůsobuje destrukci materiálu. Jeho těsnicí funkce v inženýrské bariéře není negována, i když může být trochu snížena. Materiál je schopen po resaturaci obnovit svou funkci.
- Pokud bude v návrhu inženýrských bariér počítáno s diskontinuitami, neznamenají ohrožení její funkce. Důležitá je průměrná objemová hmotnost sušiny po započtení volných prostor a dostatečná doba sycení pro dosažení homogenizace – zahojení diskontinuit. Z toho důvodu je třeba nahlížet na inženýrskou bariéru jako komplexní systém včetně diskontinuit, ať již technologických (spáry) nebo daných formou materiálu (mezery mezi peletami).

Dlouhodobé experimenty s vodíkem byly prováděny v homogenních nasycených vzorcích. Tlaková zkouška byla prováděna v systému, kdy byl nasycený vzorek bentonitu zatěžován konstantním tlakem plynu na vstupu do vzorku. Tlak na vstupu byl udržován manuálním regulátorem tlaku. Při tlakové zkoušce byl pomocí pumpy umístěné na výstupu ze vzorku měřen objem proteklé tekutiny skrz vzorek. Tlak byl vždy zvýšen po ustálení podmínek proudění, a to bylo provedeno krokově (po 2 bar). Prvním zatěžovacím stupněm byl tlak 2-3 bary. Poslední zatěžovací stupeň odpovídal tlaku, při kterém došlo k průrazu. Po provedení tlakové zkoušky s vodíkem byl vzorek rozebrán a určena jeho vlhkost. Další parametry, které byly stanoveny, byla hydraulická vodivost a obsah vody ve vzorcích.

Výsledky ukázaly blízký vztah mezi tlakem průrazu a bobtnacím tlakem českého bentonitu BaM, což je v dobré shodě s teoretickými předpoklady, nicméně vzhledem k omezené dostupnosti experimentálních údajů o bobtnacím tlaku tohoto typu bentonitu je doporučeno, aby byly provedeny další studie, které umožní přesnější vyhodnocení (Mendoza et al. 2019).

4.3.2.3 Nejistoty řešení ZL

Bentonit je přírodní materiál a jako takový se vyznačuje částečně nedeterministickým chováním, které vyžaduje rozsáhlý soubor měření. Rozsah ZL umožnil provést pouze omezený počet těchto měření. Z toho vyplývá vyšší rozptyl výsledků, který přináší nejistotu do řešení.

Další nejistota je dána časovým hlediskem. V průběhu řešení se ukázala dlouhodobost jevů probíhajících v bentonitu. Rozsah ZL umožnil pouze omezené zhodnocení této problematiky.

4.3.2.4 Návrh dalších prací

Testy plynopropustnosti provedené v rámci ZL je třeba chápat jako úvodní. Jako výrazné se zde ukázalo stochastické chování materiálu při zkouškách průrazem, kde je do budoucna třeba provést větší sadu testů. Výsledky také ukázaly výraznou potřebu dlouhodobých testů.

Testy nehomogenního materiálu se zabývaly pouze jednoduchou podélnou diskontinuitou. Při reálném použití bude v bariéře celá síť těchto diskontinuit. Je třeba proto provést postupný upscaling tohoto problému až po komplexní test. Experimentální analýza se také nezabývala materiály, které jsou díky své formě po uložení nehomogenní (pelety). Chování těchto materiálů je třeba do budoucna ověřit.

4.3.2.5 Výstupy ZL

SVOBODA J., HAVLOVÁ V. (2017): Podrobný věcný a časový plán řešení projektu Plynopropustnost, Technická zpráva 2017. – MS SÚRAO, Praha.

SVOBODA J., VAŠÍČEK R., ŠŤÁSTKA J., NÁDHERNÁ D., PACOVSKÁ D., PACOVSKÝ J. (2017): Průběžná technická zpráva č. 1 projektu Plynopropustnost shrnující podrobnou analýzu zahraničních výsledků, – MS SÚRAO, TZ 204/2017, Praha.

MENDOZA A. M. (2018): Experimental devices measuring gas generation and transport in bentonite. – MS SÚRAO, TZ 242/2018/EN. Prague.

SVOBODA J., VAŠÍČEK R., ŠŤÁSTKA J., NÁDHERNÁ D., PACOVSKÁ D., PACOVSKÝ J. (2018): Experimentální hodnocení plynopropustnosti inženýrských bariér hlubinného úložiště – Průběžná zpráva. – MS SÚRAO TZ 315/2018, Praha.

MENDOZA MIRANDA, A. N. (2019): Hydrogen transport experiments in bentonit, – MS SÚRAO, TZ 383/2019/EN. Prague.

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.

SVOBODA, J., VAŠÍČEK R., ŠŤÁSTKA J., NÁDHERNÁ D., PACOVSKÁ D., PACOVSKÝ J. (2019): Experimental assessment of the gas permeability of engineering barriers in a deep geological repository – Final Report. – MS SÚRAO ZZ 384/2019/ENG. Prague.

4.3.3 Provedení předběžného výpočtu tlaku na UOS (PB-2017-ZL-S1937-Tlak_kontejneru)

Hlavní autoři: Hasal M., Michalec Z., Blaheta R. (ÚGN)

4.3.3.1 Cíl ZL

Cílem tohoto projektu bylo určit maximální hodnotu tlaku na ukládací obalový soubor (UOS), který bude sloužit k uložení jaderného odpadu. Maximální hodnota tlaku na UOS představuje veličinu, jež je důležitá z dlouhodobého pohledu hodnocení bezpečnostních funkcí UOS. Časový horizont tohoto projektu se pohybuje v oblasti plné nebo téměř plné saturace inženýrské bariéry a maximální nebo klesající teploty v okolí UOS.

V rámci tohoto projektu byly posouzeny veškeré zdroje tlaku na UOS a byla postupně evaluována míra jejich vlivu.

4.3.3.2 Zhodnocení řešení projektu

Tento projekt byl řešen ve třech fázích:

1. Dosavadní publikovaný výzkum v dané problematice – byla provedena rešeršní práce sumarizující dosavadní výzkum v dané oblasti. Přitom byl brán v potaz jen výzkum, který rozšířil modelové situace o kritické situace, které mohou nastat v HÚ.
2. Zdroje tlaku a materiálové parametry – nejprve byly určeny veškeré zdroje tlaku na UOS a posouzena míra jejich vlivu s ohledem na předpokládané parametry materiálů vyskytujících se v budoucím HÚ (tzn. horninového masivu, bentonitu, vody).
3. Modelové situace – byly vytvořeny modelové situace, jež pokryly reálné scénáře uložení UOS v HÚ. Dále byla vypočítána maximální hodnota tlaku na UOS, jež může nastat za dané modelové situace.

Fáze 1 Dosavadní publikovaný výzkum v dané problematice

Cílem bylo poukázat na důležité momenty v zahraničním výzkumu v dané problematice, které mohou podpořit nebo rozšířit poznatky uvedené v této zprávě. Studována byla problematika při nerovnoměrném sycení bentonitu, při posunu na poruše jdoucí napříč úložným vrtem, při interakci pelet a bloků, porovnání s reálnou simulací dle švédského KBS-3 konceptu a vývoje celkového tlaku v bentonitu při změnách tlaku vody/plynu.

Fáze 2 Zdroje tlaku a materiálové parametry

Skladba HÚ zahrnuje přítomnost velkého množství materiálů o různých vlastnostech a prostorovém uspořádání. Většina z nich může mezi sebou interagovat. V této fázi jsme se pokusili najít příčiny zvýšení tlaku na UOS a vydefinovat ty signifikantní pro předběžný výpočet tlaku na UOS. V této fázi byl proveden rozbor materiálových parametrů bentonitu ve vztahu k řešené problematice, jež představuje jeden z hlavních zdrojů zvýšeného tlaku na UOS.

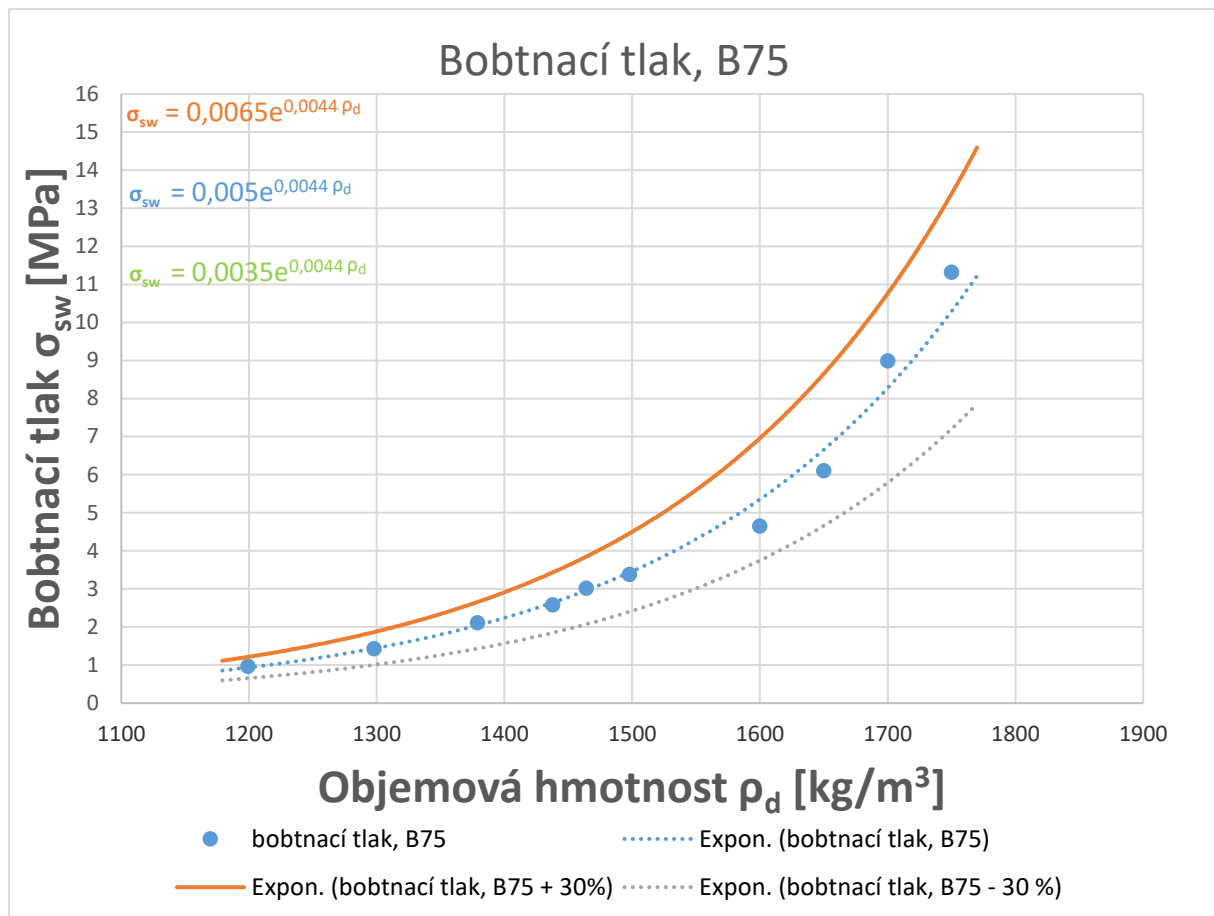
Podrobnou analýzou bylo zjištěno, že tlak na UOS bude způsoben přítomností následujících jevů:

- 1) hydrostatický tlak vody v hornině, jež je prostřednictvím téměř plně saturovaného bentonitu přenášen na UOS;
- 2) bobtnací tlak bentonitu;
- 3) zvýšená teplota bentonitu a okolní horniny;
- 4) degradace UOS, přičemž korozní produkty mají větší objem než korodovaný materiál;
- 5) zvýšení pórového tlaku vlivem uvolňování plynu během koroze;
- 6) chemické změny materiálů – bentonitu;
- 7) deformace technických vrtů a úložného vrtu.

Bylo ukázáno, že celkový tlak $p_{\text{total}} = p_w + p_{\text{sw}} + p_t$ (MPa) na UOS bude zejména součtem maximální hodnoty hydrostatického tlaku p_w , bobtnacího tlaku p_{sw} (dle Obr. 26) a součtu všech zvýšení tlaků p_t indukovaných termální expanzí materiálů. Ostatní zdroje tlaku tvoří minoritní zdroje a do celkového tlaku na UOS přispějí minimálně.

Podrobněji k jednotlivým zdrojům. Hydrostatický tlak p_w roste s hloubkou a jeho maximální hodnota je 5 MPa v hloubce 500 m. Jde o tlak odpovídající situaci, kdy pórovitost a puklinový systém masivu vytvářejí propojení k zemskému povrchu.

Hodnota bobtnacího tlaku při plné saturaci p_{sw} je určena objemovou hustotou bentonitu. Bentonit při kontaktu s vodou nebo vodní parou zaplní veškerý volný prostor a tím se sníží jeho objemová hmotnost na novou hladinu/hodnotu. Poté je možno odečíst maximální hodnotu bobtnacího tlaku z Obr. 26, což určuje maximální tlak na kontejner vlivem bobtnání. V realitě tato hodnota bude nižší, protože Obr. 26 je vytvořen pro destilovanou vodu a za konstantní teploty 20 °C. Minerální voda a vyšší teplota snižují bobtnací tlak bentonitu, ale odpovídající měření pro český bentonit nejsou k dispozici.



Obr. 26 Závislost bobtnacího tlaku na objemové hmotnosti bentonitu B75, Štáštka 2014 – II. Modré body reprezentují měření a modrá linie reprezentuje aproximační exponenciální křivku průběhu měření. Červená křivka představuje předpokládanou maximální hodnotu bobtnacího tlaku a zelená dolní odhad bobtnacího tlaku

Tlak p_t je součtem všech příspěvků termální expanze všech materiálů v HÚ. Jeho vliv na celkový tlak bude klesat s klesající teplotou HÚ. Poznamenejme, že byla odvozena hodnota 0,5 MPa představující horní mez. Její přesné určení ale vyžaduje přesný THM model se znalostí dat, které nyní nejsou dispozici.

Fáze 3 Modelové situace

V této fázi byla nejdříve vypočtena totální deformace UOS za pravděpodobného tlaku z Fáze 1. Ukázalo se, že konstrukční návrh je dostatečně odolný, aby nedošlo k velké deformaci UOS. Z toho vyplývá, že nedojde k redistribuci objemové hmotnosti bentonitu uvnitř vrtu a tím ke snížení bobtnacího tlaku.

Dále bylo ukázáno, jak vypočítat hodnotu maximálního tlaku na UOS u všech modelových situací, které mohou nastat v HÚ (horizontální a vertikální uložení, různé pozice UOS atd.). Byl diskutován vliv všech proměnných faktorů, jako počáteční objemová hustota, vliv tepla, přítomnost technologických mezer, hloubka uložení atd. Studován byl pouze ustálený stav, kdy teplota na povrchu UOS dále neroste a došlo k plné (nebo téměř plné) saturaci bentonitové bariéry.

4.3.3.3 Nejistoty řešení ZL

Je zřejmé, že v dané fázi výzkumu HÚ je nedostatek informací o geologické stavbě, hydrogeologické situaci či o vlastnostech hornin či vod z hloubky a tlaku vody, odpovídající hloubce uložení UOS. Proto výsledky platí pro modelové HÚ a výsledná hodnota maximálního tlaku může být nižší. Další nejistoty plynou z neznalosti chování použitých parametrů pro český bentonit za zvýšené teploty.

4.3.3.4 Návrh dalších prací

Provést přepočítání při znalosti přesné geologické struktury lokality HÚ v ČR a s vodou odebranou z této lokality. Pro zpřesnění výpočtu doporučujeme provedení série edometrických testů při dané objemové hustotě bentonitu (pravděpodobné v HÚ), pro získání rozptylu hodnot bobtnacího tlaku. Dále provést experiment na zjištění snížení bobtnacího tlaku za zvýšené teploty. Vhodné by bylo zkoumání interakce bentonit – korozní produkty a vlivu korozních produktů na bobtnací tlak. Dále vytvořit plně propojený THM model s přesnými rozměrovými parametry reálného HÚ. Tento THM model umožní získání informací, které by dále sloužily ke zpřesnění výpočtu tlaku na UOS, zejména jeho vývoj v čase.

4.3.3.5 Výstupy ZL

HASAL M., MICHALEC Z., BLAHEŤA R. (2019): Provedení předběžného výpočtu tlaku na UOS - Závěrečná zpráva. – MS SÚRAO, TZ 388/2019, Praha.

4.4 Řešení úložných vrtů a jejich vliv na vlastnosti obklopujícího horninového prostředí

4.4.1 Vznik a monitoring EDZ při výstavbě PVP Bukov (PB-2015-ZL-S1894-023-BukovEDZ)

Hlavní autoři: Vavro M., Staš L. (ÚGN), Bláha P. (Geotest)

4.4.1.1 Cíl ZL

Řešení tohoto dílčího projektu úzce souviselo s problematikou řešenou v dílčím projektu „Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov“ a to zejména v geomechanické a geotechnické oblasti.

Hlavním cílem tohoto zadávacího listu bylo získat nezbytná data o deformaci tvaru napěťového pole v blízkém okolí chodby. Na základě matematického modelování a následného srovnání vypočtených a změřených dat odhadnout diferenci mezi vypočteným profilem díla a dokumentovaným profilem čistého výrubu. Tento rozdíl měl dokumentovat existenci a dosah vyvíjející se EDZ v návaznosti na razících pracích. EDZ měla být paralelně ověřena geofyzikálními tomografickými metodami.

4.4.1.2 Zhodnocení řešení projektu

Řešení obsahovalo jako počáteční fázi rešeršní část týkající se hodnocení EDZ ze zkušeností renomovaných pracovišť, která byla zpracována do samostatné etapové zprávy (Vavro 2016)

Paralelně s touto fází byl navržen a realizován monitorovací systém pro účely průběžného sběru dat z čidel ovlivňovaných měnící se geomechanickou situací v průběhu ražby. Byl zkonstruován a reálně nasazen funkční „Distribuovaný monitorovací systém“ umožňující průběžné periodické spouštění měřicích experimentů a sběr a dvojitě zálohování získaných dat v podzemní geotechnické laboratoři PVP Bukov. Umožňoval vzdálenou správu prostřednictvím internetové konektivity. Primárně byl navržen pro periodická měření napěťového pole sondami Compact Conical Borehole ended Monitoring (CCBM) a měřicími svorníkovými tyčemi. Systém je jednoduše rozšiřitelný o další senzory, jako jsou teplotní a vlhkostní čidla, průtokoměry a další senzory využívané v jiných probíhajících experimentech. V závěru projektu bylo do DMS připojeno 12 tenzometrických měřicích svorníků SVA pro měření zatížení těchto svorníků, 7 kuželových tenzometrických sond CCBM 2,5G pro měření změn kompletního tenzoru napjatosti horninového masivu, 20 senzorů pro měření přítoků důlních vod a také 13 diagnostických kanálů monitorujících napětí, proudy, vlhkost a teplotu v jednotlivých rozvaděčích. Zkonstruovaný modulární distribuovaný monitorovací systém se během experimentu osvědčil, je stále plně funkční.

S cílem rozšíření rozsahu stanovení došlo k rozšíření monitorovací napěťové stanice v oblasti ovlivňované ražbami BZ1–XII, ZK-3J a ZK-3S, budované v rámci ZL *Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov*, o další čidla CCBM do celkového počtu 5 ks v uspořádání 2 vějířů – rovin horizontální a vertikální a následně probíhalo jejich dlouhodobé monitorování včetně sběru dat a jejich interpretace.

Plánovaná napěťová měření byla realizována metodou Compact Conical Borehole ended Overcoring (CCBO) ve vrtech S09, S11, S12, S13 a dále byly metodou CCBM monitorovány napěťové změny ve vějířích vrtů S09-S13 v návaznosti na postup důlních prací. Třetí vrt S14 vertikálního vějíře nebyl osazen v důsledku jeho havarijního stavu v předpokládaném místě nasazení. Výsledky měření CCBO dávají poměrně velký rozptyl hodnot, a to jak z hlediska magnitud hlavních komponent, tak i jejich orientace. Lze předpokládat, že zejména měření v S9 a S12 budou ovlivněna přítomností blízkého výrubu. Odlišují se však i poměrně vzdálené lokace S11 a S21. To napovídá, že měření jsou zřejmě lokálně ovlivňována také blízkými poruchami a zlomovými pásmy. Tomu nasvědčují i zvodnělé poruchové pásmo v nadloží BZ1_XII zasažené vrtem S14, které znemožnilo využití vrtu pro napěťová měření, tak i výsledky strukturního mapování a geofyzikálních měření, kde v těsné blízkosti rozrážek ZK-3x byly identifikovány výrazné poruchové struktury. Výsledky monitorování napětí sondami CCBM podle očekávání reagují na postup razících prací. Největší změny jsou registrovány v nejbližší umístěných vrtech. Změny napětí z hlediska celého tenzoru napětí (kombinace výsledků CCBO a CCBM) však nejsou ani v těchto případech nijak zásadní a nedávají předpoklad k nestabilitě. Výsledky monitorování v době po ukončení trhacích prací napovídají na existenci dalších doprovodných napěťových a deformačních jevů. Jedná se o postupné odlehčování v oblasti lokace sond CCBM, což může být spojeno s lokálním vysycháním měřicího vrtu (pokles pórového tlaku), ale i postupným odvodňováním bloku masivu přiléhajícímu k PVP. Dlouhodobý monitoring po ukončení ražeb také prokázal, že k postupné redistribuci napětí může docházet i dlouho po ukončení aktivního zásahu do masivu (i s ročním odstupem).

Zadání tohoto ZL požadovalo také vytvoření přesného tvarového modelu PVP Bukov. Pro tento účel bylo realizováno 3D laserové skenování vytvořených prostor. Skenování cca 450 m důlních chodeb důlního díla PVP Bukov bylo provedeno postupně z celkem 122 různých skenovacích pozic. Vzájemná vzdálenost skenovacích stanovišť byla cca 4 m. Skenování bylo prováděno s rozlišením 1 cm/10 m. Výsledkem je identifikace cca 14,5 mil. prostorových bodů na každé z jednotlivých skenovacích pozic (celkem více než 1,8 mld. bodů). Reálný model je tvořen triangulační metodou umožňující nezkrácenou reprezentaci celého prostoru virtuálním způsobem. Export byl proveden do výstupního datového formátu VRML a umožňuje využít běžně dostupných prohlížeček 3D datových formátů. Model je rektifikován v souřadné síti S-JSTK. Model také umožňuje realizovat, díky detailnímu popisu reálného tvaru skenovaného prostoru, pokročilé měřické a analytické úlohy – plošné a objemové výpočty, komparativní srovnání projektu s reálným stavem, analýzu geologických struktur, aj.

V rámci projektu byl sestaven jednoduchý matematický model napěťového pole v okolí křížení BZ1-XII a ZK-3 za zjednodušeného předpokladu elastického chování masivu. Jako vstupní data byly využity reálně naměřené a interpretované napěťové poměry z oblastí umístění sond CCBO i CCBM a také i data z konvergenčních měření probíhajících v rámci zadávacího listu PB-2017-ZL-U2304-004-BUKOV. V důsledku vysoké strukturní heterogenity masivu však aplikace silně ovlivněných výsledků měření do plánovaného jednoduchého matematického modelu PVP v elastickém módu byla značně problematická. Matematický model dané geometrie totiž ukazuje, že by tenzor napětí ve vzdálenosti větší, než je průměr chodby měl být velmi málo ovlivněn existencí samotné chodby. Toto však měření nepotvrdila. Pro řešení původního napětí byla použita optimalizace průměrováním výsledků z jednotlivých fází výpočtu. Hodnota stupně potenciálního porušení, odvozená z takto získaného napěťového pole, je poměrně nízká a nenasvědčuje porušení. Musí se uvážit, že analýza bere v potaz pouze vliv napětí vyvolaného vytěžením horniny a nemá informaci o lokálním dynamickém přetížení.

Veškerá výše zmíněná měření byla doplněna o i geofyzikální průzkumné práce za účelem ověření stavu masivu za účelem výrubu a nalezení případných geofyzikálních rozhraní včetně odhadu zóny ovlivnění důlním dílem. Geofyzikální měření byla realizována metodami seizmické tomografie ST a elektrické odporové (rezistivní) tomografie ERT. Předmětem zájmu byl prostor mezi pravým bokem překopu BZ-XIIJ a vrtem S-3, respektive chodbou BZ1-XII. Mimo tento projekt bylo ještě uskutečněno opakované měření ve zkušební komoře ZK-1 ražené pokusně šetrnou trhací prací. Seizmická tomografie potvrdila hluboké porušení horninového masivu trhacími pracemi při ražbě přístupového překopu. Hloubka porušení sahá do vzdálenosti řádově prvních metrů za stěnou díla. Podle seizmických měření ve východní stěně BZ-XIIJ, ražené standardní trhací prací lze odhadovat porušení ve staničeních 220–270 metrů cca 1,5 metru a zónu ovlivnění 3-5 m, ve vyšších metrážích menší. Metoda elektrické rezistivní tomografie potvrzuje rozdílné hloubky zóny ovlivnění. Zájmové hloubky porušení masivu za stěnou díla se dají odhadnout následovně:

- BZ1-XII – neexistuje rozhraní rovnoběžné se stěnou díla; pokud existuje ovlivnění báňskými pracemi, mělo by být podle změn měrných odporů menší než 1,5 metru.
- Zkušební komora ZK1 – odhadovaná mocnost zóny ovlivnění kolísá mezi 0,75 až 1,5 m.
- Překop BZ-XIIJ – výsledek měření na západní stěně ve výšce cca 120 cm v úseku staničení 165–250 m dokumentuje průběh rozhraní v hloubce od asi čtyř metrů ve 165 m a až přes šest metrů v 250 m.

Lze konstatovat, že původní záměr pokusit se vymežit a sledovat vývoj zóny EDZ na základě deformací vyvolaných původním a následně ražbou indukovaným napěťovým polem při budování PVP Bukov, s využitím vybraných bodových měření, se nepodařilo uspokojivě realizovat. Bylo to způsobeno vysokou přirozenou heterogenitou masivu s četnými poruchami, které zásadním způsobem ovlivnily lokální distribuci původního napětí, i ražbou indukovaných změn v okolí měřicích bodů. Vzhledem k přirozené absenci detailních charakteristik geologických struktur, nebylo možné na získaná data úspěšně aplikovat představu původního jednoduchého matematického modelu oblasti, který nepředpokládal tak vysoký vliv strukturní variability prostředí. Tato heterogenita zároveň neumožňuje s jistotou rozlišit původní strukturní nehomogenity a následné nehomogenity vyvolané porušením masivu trhacími pracemi, tj. identifikovat EDZ. Hovoříme spíše o oblastech ovlivnění komplexem původních a uměle vytvořených strukturních nehomogenit. Připomeňme, že v této části laboratoře byla navíc použita šetrná technologie ražby s požadavkem co možná nejmenšího vlivu do okolního masivu. Za pozitivní výsledky lze považovat aplikaci geofyzikálních metod, které i v těchto podmínkách v některých místech pravděpodobnou hranici EDZ identifikovaly.

4.4.1.3 Nejistoty řešení ZL

Hlavní nejistoty tohoto ZL jsou spojeny se schopností správného nastavení vstupních parametrů pro numerické modelování, resp. interpretaci naměřených dat. Používané parametry jsou často odvozované z dostupných bodových testů extrapolací na větší objem materiálu.

Nejistoty spojené s vyhodnocením lokálních napěťových měření typu CCBO a CCBM v takto heterogenním prostředí PVP Bukov spočívají ve významném vlivu lokálních strukturních nehomogenit na lokální deformační pole v místě měření. Správná interpretace zjištěných deformací pro následný výpočet napěťového pole obecně předpokládá izotropní, resp. anizotropní materiál, avšak homogenní, a s relativně neměnnou identifikovatelnou orientací

v zájmovém objemu materiálu. To však v tomto případě lokality Bukov není většinou splněno. Podobně je tomu i v případě konstrukce numerického modelu napěťového a deformačního pole lokality, jen v jiném měřítku. To se týká nejistoty vstupních parametrů jak z napěťových měření, tak variability vlastností materiálu, tak detailního 3D popisu strukturních prvků a geomechanické situace v rámci měřítka zájmového objemu masivu.

Jinou skupinou nejistot je existence marginálních běžně zanedbávaných procesů, které se však na pozadí dlouhodobě stabilní situace mohou zviditelnit. V tomto projektu se jedná např. o jev nerovnoměrného vysychání vrtu. To způsobuje redistribuci pórového tlaku, působící postupnou deformaci na tenzometrickém měřicím prvku.

4.4.1.4 Návrh dalších prací

Znalost napěťového stavu masivu a jeho změn v oblasti projektování, realizace a provozování podzemních staveb má zásadní význam pro zajištění bezpečnosti podzemní stavby a zajištění její dlouhodobé životnosti. Změny napěťového pole jsou vyvolávány nejen změnami geomechanické situace při změnách geometrie vznikajících podzemních prostor, ale i teplotním působením umístěných technologií.

Na provedené úvodní experimenty v ZL by měly navázat experimenty v pravděpodobném prostředí perspektivního úložiště zejména v případech dalšího rozšiřování podzemních prostor a experimenty v oblastech s uměle vyvolanými změnami tepelného zatížení horninového masivu. Použité metody měření by měly kombinovat měření napětí jak v makroměřítku (3D konvergence díla), středním měřítku tak i lokálním měřítku, tak aby poskytly relevantní vstupní informace pro konstrukci nezbytných numerických modelů distribuce napěťového pole lokality a jejího navázání na dlouhodobé antropogenní působení.

Dále by se měla zaměřit pozornost na výzkum a interpretaci pomalých dlouhodobých jevů. Konkrétně výzkum chování a eliminace deformací způsobených lokálními změnami vlastností materiálu masivu v důsledku realizace samotného experimentálního měření (změna distribuce pórového tlaku atd.)

Z hlediska stanovování EDZ by experimenty měly směřovat do srovnávání interpretovaných výsledků geofyzikálních tomografických metod a výsledky experimentálního zjišťování rozdílů stupně pórovitosti a hydraulických parametrů v oblasti předpokládaného výskytu EDZ ve srovnání s vlastnostmi rostlého masivu dané lokality.

4.4.1.5 Výstupy ZL

VAVRO M. (2016): Shrnutí zahraničních poznatků o vzniku a vývoji EDZ v krystalinických horninách – rešerše, – MS SÚRAO, TZ 50/2016, Praha.

STAŠ L., MALÍK J., KAJZAR V., KALÁB T. (2016) Vznik a monitoring EDZ při výstavbě PVP Bukov (ETAPY č. 2-4). – MS SÚRAO TZ 193/2017, Praha.

BLÁHA P., DURAS R., GEBAUER J., NOVOTNÁ J. (2017): Souhrn výsledků geofyzikálních měření. – MS SÚRAO, TZ 184/2017, Praha.

STAŠ L., BLÁHA P. (2018) Vznik a monitoring EDZ při výstavbě PVP Bukov, – MS SÚRAO, ZZ 351/2019, Praha.

4.5 Chování horninového prostředí

4.5.1 Studium napjatostních poměrů a anizotropie v prostředí granitických hornin (PB-2014-ZL-S2302-002-LASMO)

Hlavní autoři: Staš L., Malík J. (ÚGN), Franěk J. (ČGS)

4.5.1.1 Cíl ZL

Hlavním cílem tohoto zadávacího listu bylo získat obecné charakteristiky chování horninového masivu podzemní laboratoře při jeho napětovém zatěžování a odlehčování ve velkém měřítku. Řešení bylo součástí mezinárodního projektu LASMO (LArge Scale MOnitoring) vedeného společností NAGRA na lokalitě podzemní geotechnické laboratoře GTS (Grimsel Test Site) a jeho blízkém okolí.

Za tím účelem bylo požadováno vybudování monitorovacího systému, který by dlouhodobě zaznamenával napětové změny vyvolané změnami výšky vodní hladiny blízkého přehradního jezera. Získaná data měla být společně s daty z optických extenzometrů provozovaných Ústavem struktury a mechaniky hornin AV ČR použita pro konstrukci matematického modelu distribuce napětového pole v oblasti GTS. Druhým hlavním cílem tohoto sub-projektu bylo sledování vnitřní anizotropie hornin na bázi anizotropie magnetické susceptibility.

4.5.1.2 Zhodnocení řešení projektu

Projekt s názvem „Study of the stress conditions and internal anisotropy in an environment of granitic rocks“ byl řešen v letech 2014-2018 v podzemní geotechnické laboratoři „Grimsel Test Site“ ve Švýcarsku. Práce zahrnovaly jak výzkum a experimenty *in-situ*, tak interpretační a experimentální práce na mateřských pracovištích.

Řešení obsahovalo 2 oblasti:

Oblast 1: Měření a stanovení napětového pole v okolí GTS

Tato oblast projektu představovala:

- návrh a realizaci monitorovacího systému s možností vzdáleného přístupu pro účely řízení experimentu a průběžného sběru dat z čidel ovlivňovaných indukovanými změnami napětového stavu v důsledku kolísání vodní hladiny v okolních přehradních nádržích,
- realizaci počátečního měření napětí aplikací metody CCBO ve vybraných vrtech,
- dlouhodobé monitorování kuželových napětových sond „CCBM“ a sond umístěvaných přímo na stěnu tunelu (CWFM), včetně sběru dat a jejich interpretaci,
- vytvoření matematického modelu okolí GTS na základě tenzometrických měření.

V tomto smyslu byl navržen, zkonstruován a reálně nasazen funkční „Distribovaný monitorovací systém“ umožňující průběžné periodické spouštění měřicích experimentů a sběr a dvojité zálohování získaných dat v podzemní geotechnické laboratoři GTS. Umožňoval vzdálenou správu prostřednictvím internetové konektivity. Primárně byl navržen pro periodická měření napětového pole sondami CCBM a CWFM a byl rozšířen o senzory teplotní ve vrtech a v tunelu. Systém se zcela osvědčil a pracoval spolehlivě celé 4 roky až do ukončení

experimentu. Některé výpadky systému byly způsobeny vnějšími síťovými konflikty při neožádané změně konfigurace přidělených adres provozovatelem sítě.

Standardní měření CCBO byla realizována ve třech monitorovacích stanicích. Aplikace byla provedena vždy ve dvou vrtech v každé lokalizaci před zahájením monitorovacího experimentu. Kruhový tvar tunelu umožnil kvalitativně i kvantitativně specifikovat ovlivnění měření prováděná v blízké zóně tunelu. To výrazně zlevnilo nezbytné vrtné práce a zároveň umožnilo nasazení více čidel. Pro stanovení napěťového pole bylo využito výsledků standardních laboratorních testů na horninových vzorcích při jednoosém zatěžování a použito $E = 47\text{GPa}$ a $\mu = 0,25$.

Zjištěný optimalizovaný tenzor napětí každého měření vstupoval do tvorby modelu napěťového pole v okolí GTS.

Druhá série experimentálních měření CCBO proběhla během ukončování experimentu CCBM ve všech 9 vrtech. Na základě porovnání výsledků aplikace metody CCBO před a po ukončení experimentálního monitorování lze konstatovat, že 2. série měření napětí metodou CCBO je výrazně ovlivněna projevem vnitřních sil v těsném okolí senzorů při redistribuci pórového tlaku v důsledku vysychání vrtů. Bez vážných korekcí se jeví jako nepoužitelná pro další modelování a interpretaci.

Aplikace anizotropních vlastností horninového masivu prokázala při předpokladu příčné izotropie a zjištěných fyzikálně mechanických vlastností ($E_{12} = 48,7\text{ GPa}$, $E_3 = 46,8\text{ GPa}$, $\mu_{12} = 0,254$, $\mu_{23} = 0,295$) velmi malé ovlivnění výsledku – velikosti hlavních napětí do 13 %, směrová orientace hlavních napětí zaznamenala v tomto případě minimální změny. Orientace hlavních os materiálové anizotropie byla přijata dle vyhodnocení České geologické služby ve směru 318/20°.

Sondami CCBM bylo osazeno všech 9 vrtů (3 stanice x 3 vrty). Běžný očekávaný tvar záznamu deformací na tenzometrech bezprostředně po instalaci sondy (plouživá kompresní deformace v důsledku odvrtní vrtu) byl identifikován jen na několika sondách a jen na tangenciálních tenzometrech a jen v počáteční fázi experimentu. Měření na všech sondách zaznamenalo dlouhodobou extenzi zejména longitudiálních tenzometrů směřovaných po spádnici měřicí hlavy sondy. Reakce byla výraznější u vrtů s identifikovaným zavlhnutím ústí. Zjednodušený matematický model vysychání vrtu v okolí instalované sondy kvalitativně potvrdil trendy chování zaznamenaných dat

Ovlivnění záznamu fenoménem vysychání bylo tak výrazné, že zcela překrylo původně plánované sledování napěťových změn indukovaných změnami výšky vodní hladiny v blízké přehradní nádrži. Zároveň z charakteru změn na senzorech se však ukázalo, že zařízení bylo citlivé na vlivy vyvolané některými experimenty v okolí.

Použitím Fourierovy transformace na vybraném časovém úseku byla prokázána citlivost měřicího systému na působení slapových sil Měsíce.

Matematický napěťový model oblasti GTS byl sestaven na základě geometrického usprádnění zejména antropogenních strukturních prvků a optimalizace napěťových podmínek na hranicích modelu s ohledem na tvar a velikost napěťového pole v místech umístění sond. Z hlediska elastických vlastností geomechanický model předpokládal izotropní materiál. V důsledku absence relevantních dat z měření vzájemného posunutí horninových bloků na diskontinuitách masivu, realizovaných Ústavem struktury a mechaniky hornin, nebylo možné zahrnout tato

měření do geomechanického modelu. Měření z dodatkových sond CWFM nebyla využita pro vysokou úroveň rušení. Pro výpočet modelu byl využit speciální vlastní SW nástroj „GEM 3“. Zobrazení výsledků 3D napěťového modelu GTS umožňuje vizualizátor, který je součástí řešení projektu. Umožňuje vizualizaci napěťových polí v různých uživatelem konfigurovaných řezech.

Oblast 2: Měření a stanovování anizotropie magnetické susceptibility horninového masivu.

Část výzkumu probíhala *in-situ* a to jak na povrchu v okolí, tak GTS, tak i bezprostředně v prostorách podzemní laboratoře. Část byla realizována v laboratořích ČGS na odebraných horninových vzorcích.

Hlavními závěry řešení této části projektu byla následující zjištění:

- Mezoskopická analýza struktur ukázala na homogenní vývoj regionální foliace, která vykazuje významný shluk pólů foliace odpovídajících rovině foliace 163/70 pro mezoskopická povrchová data a 167/69 pro mezoskopická podzemní data. Lineace měřené na výchozích plochách definují široký shluk s maximem ve směru 169/73. Takový strukturální vzorec se homogenně vyvíjí nejen napříč GTS, ale ve větším měřítku v celé studované oblasti (jižní část Haslitalu s východní částí Bächlitalu, Unteraartalu a Oberaartalu).
- Orientace magnetických folií a lineací koreluje s orientací mezoskopických folií a lineací. Data AMS umožňují kvantitativně charakterizovat vnitřní duktilní struktury studovaných hornin. Dále je lze použít k definování orientace geotechnických vzorků připravených z těchto hornin. Obecně nízká magnetická anizotropie zkoumaných hornin kvantifikovaných ze studia AMS vykazuje převážně zakřivený tvar (T parametr > 0) s nízkým rozdílem mezi směry $K1$ a $K2$.
- Mezoskopické křehké-duktilní struktury ukazují na paleonapěťovou orientaci σ_1 napěťové osy v sub-horizontální poloze NNW-SSE, σ_2 v horizontální orientaci WSW-ENE a σ_3 v subvertikálním směru. Takový napěťový stav se pravděpodobně vyvíjel při 0,6 GPa / 475 °C v době ~ 21 Ma.

Výstupy z obou oblastí výzkumu vyústily do realizace 3D strukturního modelu oblasti GTS a okolí a numerického 3D napěťového modelu masivu laboratoře GTS.

4.5.1.3 Nejistoty řešení ZL

Hlavní nejistoty tohoto ZL jsou spojeny se schopností správného nastavení vstupních parametrů pro numerické modelování, resp. interpretaci naměřených dat. Používané parametry jsou často odvozované z dostupných relativně bodových testů extrapolací na větší objem materiálu. Nejistoty spojené s vyhodnocením lokálních napěťových měření typu CCBO a CCBM spočívají ve významném vlivu lokálních strukturních nehomogenit na lokální deformační pole v místě měření. Předpokládaná podmínka správné interpretace zjištěných deformací pro následný výpočet napěťového pole obecně předpokládá izotropní, resp. anizotropní materiál, avšak homogenní a s relativně neměnnou identifikovatelnou orientací v zájmovém objemu materiálu. Podobně je tomu i v případě konstrukce numerického modelu napěťového a deformačního pole lokality, jen v jiném měřítku. To se týká nejistoty vstupních parametrů jak z napěťových měření, tak variability vlastností materiálu, tak detailního 3D

popisu strukturních prvků a geomechanické situace v rámci měřítka zájmového objemu masivu.

Další významnou skupinou nejistot je existence marginálních běžně zanedbávaných procesů, které se však na pozadí dlouhodobě stabilní situace mohou výrazně zviditelnit a významně znehodnotit měření ve smyslu požadavku sledování některého extrémně slabého dlouhodobého procesu. V tomto projektu se jedná např. o jev nerovnoměrného vysychání vrtu – redistribuce pórového tlaku, působících postupnou deformaci na tenzometrickém měřicím prvku, která zcela potlačila čitelnost projevů napěťových změn indukovaných změnou výšky vodní hladiny jezera.

Technickou nejistotou, kterou jsme zaznamenali, je neautorizovaná – nekonzultovaná změna podmínek použití hostitelské datové sítě. Výpadky měření byly vesměs způsobeny rekonfigurací vnitřní sítě poskytovatele NAGRA, ústící do následného konfliktu síťových adres, což omezilo spolehlivost funkčnosti zařízení.

4.5.1.4 Návrh dalších prací

Znalost napěťového stavu masivu a jeho změn v oblasti projektování, realizace a provozování podzemních staveb má zásadní význam pro zajištění bezpečnosti podzemní stavby a zajištění její dlouhodobé životnosti. Změny napěťového pole jsou vyvolávány nejen změnami přírodního napěťového pole nebo i zejména změnou geomechanické situace při změnách geometrie podzemních prostor, ale i lokálním působením umístěných technologií a provozovaných experimentálních testů. Zejména vliv aktivit s produkcí tepla může působit změny napětí i ve vzdálenějších oblastech, kde ke změně teplotní bilance ještě nedošlo.

Navázání na provedené experimenty v ZL by mělo být směřováno do experimentů v pravděpodobném prostředí perspektivního úložiště zejména v případech dalšího rozšiřování podzemních prostor a v experimentech doprovázených změnami tepelného zatížení horninového masivu. Použité metody měření by měly kombinovat měření napětí jak v makroměřítku (3D konvergence díla), středním měřítku i lokálním měřítku, tak aby poskytly relevantní vstupní informace pro konstrukci nezbytných numerických modelů distribuce napěťového pole lokality a jejího navázání na dlouhodobé antropogenní působení.

Dále by se měly zaměřit na výzkum a interpretaci pomalých dlouhodobých jevů, konkrétně výzkum chování a eliminace deformací způsobených lokálními změnami vlastností materiálu masivu v důsledku realizace samotného experimentálního měření (změna distribuce pórového tlaku atd.) a následně problematikou zdokonalení přístrojového a metodického přístupu k selektivním požadavkům konkrétního typu měření.

Další výzkum vlastností horninových materiálů by měl pokračovat na další verifikaci korelace kvantifikované interní anizotropie hornin s geotechnickými parametry měřeními na vzorcích orientovaných s ohledem na interní anizotropii.

4.5.1.5 Výstupy ZL

STAŠ L., MALÍK J. A FRANĚK J. (2020): Study of the stress conditions and internal anisotropy in an environment of granitic rocks. – MS SÚRAO ZZ 499/2020, Praha.

FRANĚK J. (2017) 3D Strukturně geologický model oblasti GTS a okolí. – MS SÚRAO, Praha.

MALÍK J. (2019) 3D Napěťový model GTS. – MS SÚRAO, Praha.

4.5.2 Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov (PB-2014-ZL-S2304-004-Bukov)

Hlavní autoři: Verner K., Bukovská Z. (ČGS), Souček K., Vavro M., Staš L., Kaláb Z. (ÚGN), Havlová V., Zuna M. (ÚJV), Kučera P. (SG Geotechnika)

4.5.2.1 Cíl ZL

Hlavním cílem řešení ZL Komplexní geologická charakterizace prostorů podzemního výzkumného pracoviště Bukov (PB2017ZLU2304004BUKOV) bylo komplexní zhodnocení geologického prostředí připravované podzemní laboratoře. Nová geologická data a zpracované 3D modely pracoviště a jeho širšího okolí umožní efektivní využití laboratoře pro experimentální činnost. Provedený výzkum byl zaměřen na analýzu petrologického a geochemického složení hornin včetně charakteristiky minerálních výplní tektonických (alteračních) zón, odhadu teplotně-tlakových podmínek metamorfního vývoje, zhodnocení základních petrofyzikálních vlastností hornin, spektrální analýzu vybraných částí vrtných jader a radiometrické datování hlavních etap geologických procesů. Dále byla provedena komplexní strukturní analýza prvků duktilní a křehké tektoniky včetně aplikace metody anizotropie magnetické susceptibility (AMS). Na základě souboru archivních geologických dat a nového geologického mapování povrchové části zájmového území podzemního výzkumného pracoviště (PVP) Bukov byla dále vytvořena základní geologická mapa v měřítku 1 : 10 000. Další studium zahrnuje výsledky stanovení transportních charakteristik v horninovém prostředí, hydrogeologického a inženýrskogeologického mapování a stanovení základních geotechnických parametrů horninového masivu. Na základě integrace širšího souboru geologických dat byl vytvořen 3D strukturně-geologický a geomechanický model PVP Bukov včetně 3D vizualizace podzemních prostor. Numerické analýzy byly prováděny užitím metody konečných prvků pomocí softwarového vybavení Midas GTS NX.

Hlavním cílem detailní 3D vizualizace PVP Bukov bylo zjednodušené zobrazení horninového prostředí podzemní laboratoře pro potřeby plánování jednotlivých experimentů, žádoucí interakce experimentů s horninovým prostředím a jejich následného vyhodnocení. Cílem numerického modelování a tvorby geomechanického modelu bylo zhodnocení vlivu provedeného podzemního díla na stabilitu horninového masivu a stanovení pravděpodobného dosahu deformací od ražených prostor. Níže uvedené souborné informace vychází z elaborátu závěrečné zprávy tohoto ZL (Bukovská a Verner eds. 2017).

4.5.2.2 Zhodnocení řešení projektu

Prostředí PVP Bukov je tvořeno vysoce metamorfovanými horninami severovýchodního okraje strážeckého moldanubika. V prostředí PVP Bukov byly mapovány migmatitizované biotitamfibolické ruly s polohami amfibolitů, amfibolických a biotitických migmatitů. Intenzita migmatitizace je variabilní, mezi převažující horniny patří stromatitické migmatity, místy s přechody do nebulitických migmatitů. Z pohledu duktilní tektoniky lze v prostředí PVP Bukov pozorovat heterogenní superpozici (převrácení) dvou regionálních metamorfních foliací. Relativně starší foliace mají subvertikální orientaci v průběhu SSZ-JJV až SSV-JJZ s mírně převažujícím sklonem k ZJZ. Tyto foliace byly heterogenně transponovány do ploch mírného až středního úklonu k JZ až JV. V prostředí PVP Bukov byly dále identifikovány systémy dvou skupin křehkých struktur s pohybovými indikátory (zlomů a střížných puklin). Převažující zlomy

mají strmý až střední úklon k JJV až VJV s indikátory poklesové kinematiky. Druhou skupinu tvoří zlomové struktury s dominantním úklonem pod strmými úhly k JZ až JJZ, které často nesou indikátory poklesové kinematiky nebo pravostranného posunu. Systémy extenzních puklin vykazují ortogonální charakter v průběhu SZ-JV a SV-JZ.

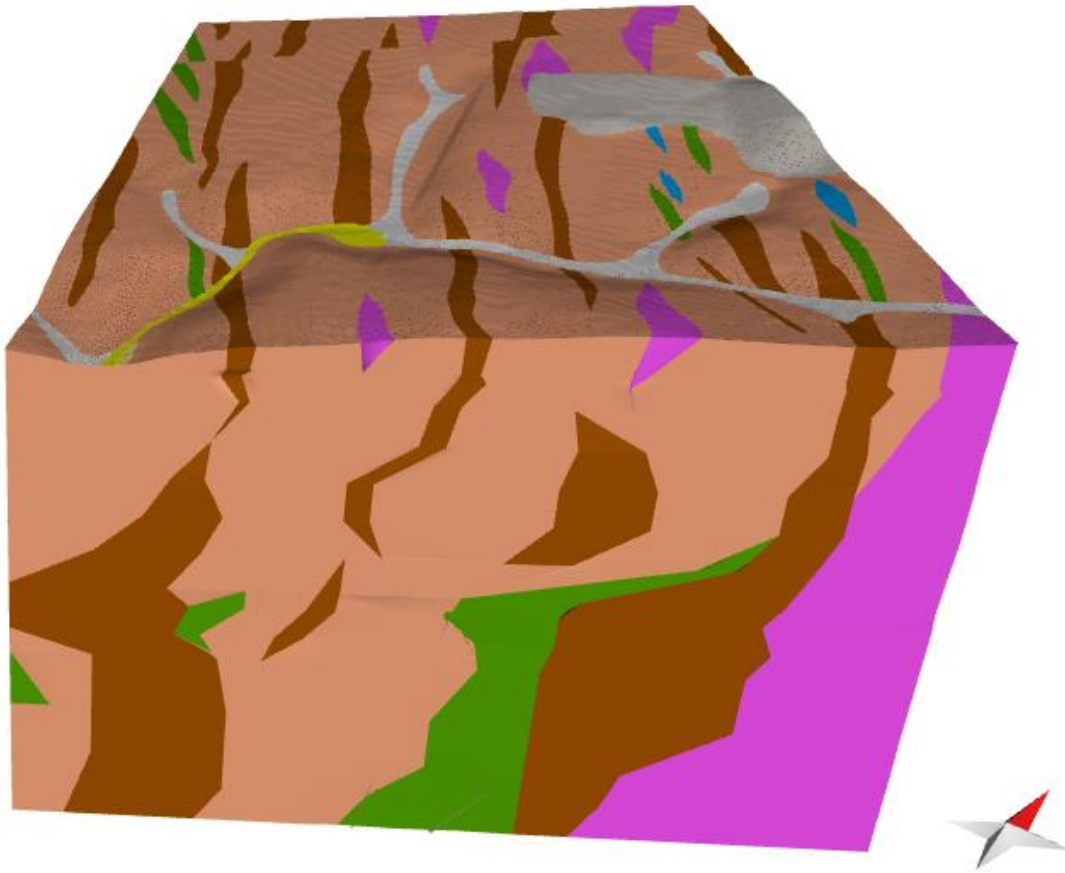
Zóny alterací jsou až několik metrů široké, tvořené především kalcitem, chloritem, hematitem, slídkami, palygorskitem, kaolinitem, tektitem, illitem a minerály zeolitové skupiny. K-Ar datování novotvořeného illitu ze dvou zlomových zón dosáhlo dvou konzistentních věků v rozmezí 287 až 307 Ma a 250 až 256 Ma.

Analýza chemického složení sekundárních mineralizací a výplní tektonických zón (pyrit, křemenné žíly a žilky pegmatitového složení nebo hydrotermální povahy, karbonátové a křemen-karbonátové žíly) ukázala, že se jedná o produkt alteračních procesů. Laboratorní analýzy mineralogického složení, zastoupení stabilních izotopů a složení fluidních inkluzí naznačují, že mineralizace vznikla za poměrně nízkých teplotních podmínek z vícezdrojových roztoků. Hlavním zdrojem fluid jsou dle geochemických dat smíšené solanky permských bazénů, meteorické vody a fluidní fáze pocházející z metamorfovaných hornin.

Proudění podzemní vody v širší oblasti PVP Bukov je vázáno na dva dominantní směry křehkých struktur, a to v převažujícím průběhu SV-JZ a SZ-JV. Tyto dva systémy vodivých struktur byly identifikovány při hydrogeologickém mapování v povrchové části lokality i při dokumentaci v důlním díle Rožná. U přítoků do PVP Bukov byl zaznamenán pouze systém propustných puklin a zlomů v průběhu SV-JZ a VSV-ZJZ. Později během výzkumných prací došlo ke vzniku nových přítoků nebo k částečnému přesunu některých stávajících na systém poruch v průběhu SSZ-JJV. K otevření puklin tohoto systému došlo pravděpodobně sekundárně vlivem odlehčení masivu v okolí výrubu.

Režim podzemní vody v okolí důlního díla není stacionární, v širším časovém měřítku dochází k výraznějším změnám. V průběhu ražby a úprav prostoru PVP tak docházelo k poklesu vydatnosti přítoků podzemní vody. U několika přítoků se vydatnost v průběhu měření zvýšila nebo výrazně kolísala. Dále také docházelo ke změnám v lokalizaci přítoků podzemní vody do PVP, pravděpodobně vlivem sekundárního otevírání puklin. V mělčích částech horninového masivu se přirozeně vyskytuje podzemní voda typu Ca-HCO_3 , v hlubších částech pak převažuje typ NaHCO_3 . V geologicky heterogenním prostředí důlního díla Rožná se pak nevyskytují podzemní vody typu Ca-HCO_3 (s výjimkou čerstvě vyraženého PVP Bukov), pouze vody o složení Ca-SO_4 . U stabilních přítoků se odchylky obsahů jednotlivých hlavních kationtů a aniontů od průměrných hodnot v převážné většině pohybují v rozsahu 10 až 20 %. Pouze v případě chloru je odchylka od hodnot průměrného zastoupení poměrně vysoká (až 50 %).

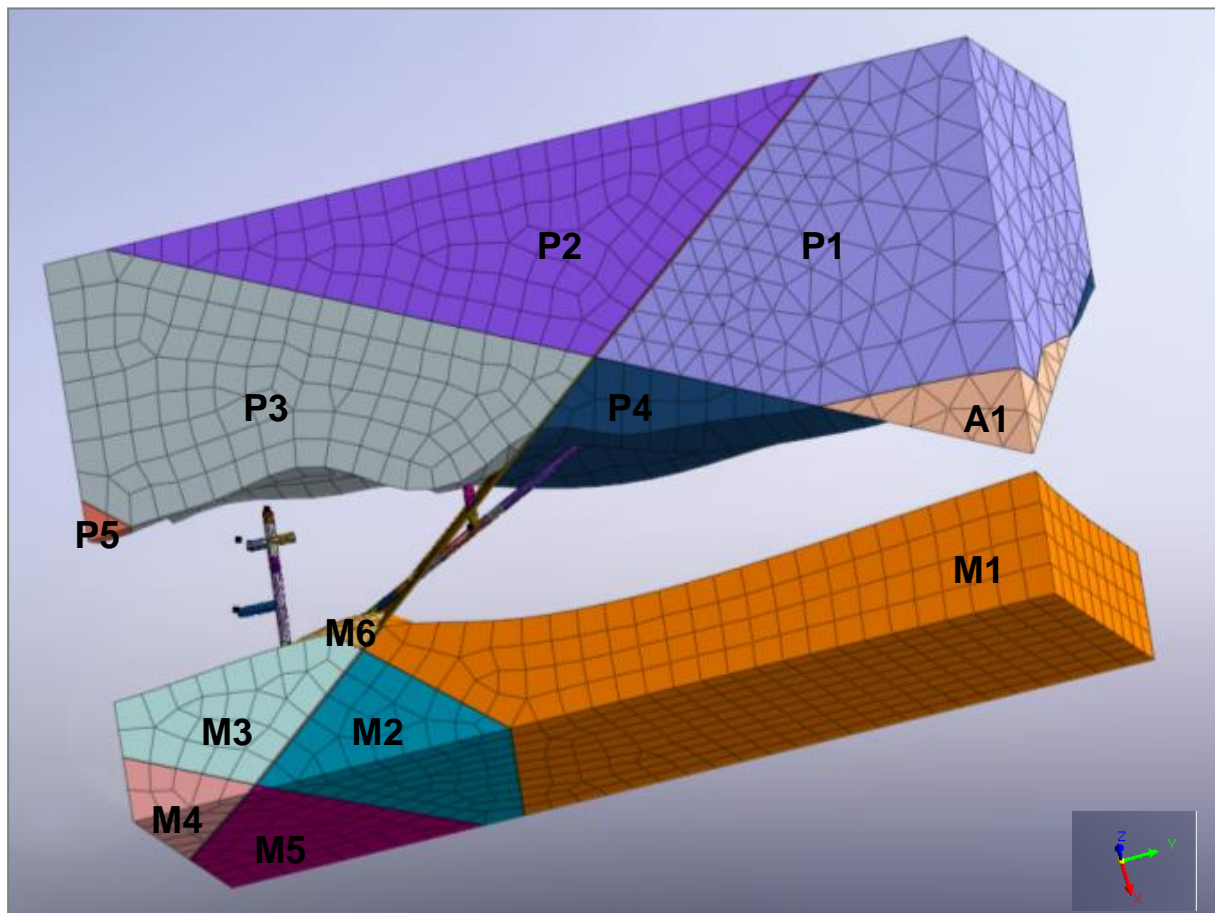
Z pohledu studia transportních parametrů hornin byly studovány vzorky kontrastních horninových litologií s variabilní vnitřní stavbou. Naměřené hodnoty efektivních difúzních koeficientů ^3H spadají do poměrně úzkého rozmezí $0,9 \cdot 10^{13}$ – $3,1 \cdot 10^{13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Vyšší hodnoty difúzních koeficientů byly zjištěny u vzorků s přítomností fraktur, kdy hodnoty D_e byly až 4krát vyšší oproti vzorkům homogenní a neporušené horniny. Hodnoty difúzních koeficientů ^3H u vzorků s přítomností fraktur se pak pohybovaly od $3,1 \cdot 10^{13}$ do $8,6 \cdot 10^{13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Výraznější rozdíly v difuzivitě hornin, než u tritia jsou patrné na difúzi aniontu (^{36}Cl a ^{125}I). Změny difúzních parametrů mezi horninovými vzorky jsou pravděpodobně více závislé na mineralogickém složení a stupni následné přeměny než na vnitřní struktuře horniny. Nebyl prokázán výrazný vliv planárního přednostního uspořádání magnetických minerálů (magnetické foliace) na hodnoty difúzních koeficientů. Difúze je tak pravděpodobně ovlivněna zejména sekundárními přeměnami horninových minerálů (např. chloritizace biotitu a sericitizace živců).



Obr. 27 Výsledný geologický model okolí podzemního pracoviště Bukov. Běžová – pararuly, hnědá – migmatity, zelená – amfibolity, růžová – granulity, modrá – erlany až mramory

V průběhu výstavby podzemního výzkumného pracoviště Bukov byla získána geologická, hydrogeologická a geotechnická data, která umožnila komplexní charakteristiku horninového prostředí a tvorbu 3D modelů geologické stavby (Obr. 27) a geomechanických vlastností (Obr. 28). Vytvořené 3D modely také zohledňují regionální úroveň s vizualizací širšího okolí pracoviště PVP Bukov, a to včetně zpracované archivní dokumentace DIAMO, s. p.

Za účelem zhodnocení vlivu možného výskytu zóny porušené horniny byla provedena parametrická studie s variantním modelem porušené zóny. V numerickém modelu bylo na dokončeném podzemním díle následně aplikováno seismické zatížení relevantní pro podmínky České republiky, a to za účelem posouzení účinků seismického zatížení na stabilitu horninového masivu.



Obr. 28 Pohled na geomechanický model horninového prostředí (pararula P1 až P5, amfibolit A1 až A7, migmatit M1 až M6)

4.5.2.3 Nejistoty řešení ZL

Množství studovaných horninových vzorků z prostoru PVP Bukov představuje relativně málo homogenní soubor v regionálním měřítku. Důvodem je zejména přítomnost velkého množství různých petrografických typů zastoupených hornin. Mezi jednotlivými horninovými vzorky je patrná výrazná látková i texturní variabilita, a to i v hloubkových profilech jednotlivých vrtných jader. Klasifikace a další zpracování vzorků pro navazující experimenty je tím pádem ztížena.

Je tedy zřejmé, že při odběru a přípravě vzorků je nutné dbát mimořádné pozornosti, tak aby analytické práce byly prováděny na reprezentativních a homogenních vzorcích. V opačném případě získané výsledky mohou být do jisté míry zavádějící.

V průběhu výstavby podzemního výzkumného pracoviště (PVP) Bukov byla získána geologická data, která umožnila komplexní charakteristiku horninového prostředí a navazující tvorbu 3D modelů. Nicméně pro zpracování 3D modelů regionálních měřítek byly k dispozici podrobné datové soubory jen z těžené části ložiska Rožná, v západní části zájmového území. Východní část modelu je tak zatížena výraznou mírou nejistoty, a to jak při povrchu, tak v hlubších partiích. Pro účely modelových studií byla dále zjednodušena legenda horninových litologií.

4.5.2.4 Návrh dalších prací

Pro účely navazujících experimentů v podzemní laboratoři Bukov je žádoucí doplnění datové sady petrochemických a mechanických vlastností hornin, a to v celé škále litologického, mineralogického a texturního složení. Dále se jeví jako vhodné provedení detailní studie prvků křehké tektoniky (např. analýza mikrofraktur včetně jejich prostorových vztahů) a permanentní monitoring tektonické aktivity. V širším okolí PVP Bukov jsou v současné době realizovány další výzkumné projekty, které tak mohou poskytnout chybějící informace.

4.5.2.5 Výstupy ZL

VERNER K., BUKOVSKÁ Z., SOUČEK K., VAVRO M., STAŠ L., KALÁB Z., HAVLOVÁ V., KUČERA P. (2015): Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov. Roční etapová zpráva – MS SÚRAO, TZ 1/2015, Praha.

BUKOVSKÁ Z., VERNER K., SOEJONO I., NAHODILOVÁ R., TOMEK F., RUKAVIČKOVÁ L. (2016): Pilotní charakterizace horninového masívu in-situ v podzemním výzkumném pracovišti Bukov: I. etapa vybudování podzemního výzkumného pracoviště Bukov. Strukturní mapování důlních děl a vrtů PVP Bukov. – MS SÚRAO, TZ 34/2015, Praha.

RUKAVIČKOVÁ L., HOLEČEK J., MYŠKA O., VENCL M., VONDROVIC L. (2016): Hydrogeologický výzkum v Podzemním výzkumném pracovišti Bukov v dole Rožná. Zprávy o geologických výzkumech 49. Česká geologická služba, 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.

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. (2018): Comprehensive geological characterization of URF Bukov. – MS SÚRAO, ZZ 191/2017/EN, Praha.

4.5.3 Expertní odhady dlouhodobé stability horninového prostředí / Erozní stabilita území (PB-2014-ZL-S2380-007-ErozniStabilita)

Hlavní autoři: Hroch T., Pačes T. (ČGS)

4.5.3.1 Cíl ZL

Dlouhodobé denudační procesy a změny reliéfu představují jedny z klíčových faktorů pro dlouhodobou bezpečnost potenciálních lokalit pro umístění HÚ. Cílem tohoto zadávacího listu bylo vyhodnocení možných scénářů vývoje reliéfu se zřetelem na dlouhodobé erozní a denudační procesy HÚ RAO v ČR po dobu budoucích minimálně 100 000 let.

4.5.3.2 Zhodnocení řešení projektu

Analýza byla založená na rešerši a interpretaci dostupné publikované literatury i nepublikovaných dat a základní geomorfologické analýze lokalit. Vyhodnocení zahrnuje definici hlavních faktorů erozních a denudačních procesů, rešerši dat a zhodnocení geomorfologické charakteristiky území na základě distančních dat. Byly provedeny predikce budoucího možného morfologického vývoje pro dva limitní klimatické scénáře. Zohledněn byl také vliv lidské činnosti, glacienních procesů a vznik permafrostu.

Řešení bylo provedeno dvěma nezávislými experty. Vyhodnocení jednotlivých expertů vycházelo z odlišného přístupu a předpokladů.

První přístup vychází z předpokladu, že eroze probíhá selektivně, intenzita erozních a denudačních procesů může být výrazně rozdílná v závislosti na lokálních podmínkách.

Druhý přístup předpokládá, že rozdíly v geomorfologii a v současných rychlostech eroze mezi jednotlivými oblastmi je sice možné spolehlivě zjistit, avšak rozdíly v rychlostech, ke kterým dojde v budoucnosti, lze pouze odhadnout, neboť budou mnohem větší, než budou rozdíly, které zjistíme ze současných dat.

V počáteční fázi řešení byla provedena rešerše literatury pojednávající o vlivu geomorfologie na vývoj, intenzitu a charakter denudačních procesů obecně a metodice stanovení rychlostí eroze zemského povrchu. Dále byla zhodnocena a porovnána publikovaná data odhadů rychlostí eroze z různých lokalit ve světě s rozdílnou geologickou, geomorfologickou a klimatickou charakteristikou s využitím rozdílných metodických postupů jako jsou interpretace na základě dat dálkového průzkumu Země, hmotová bilance povodí nebo datování povrchů pomocí analýz kosmogenních izotopů. Následně byla provedena rešerše dostupných dat z oblasti Českého masivu. Ta zahrnovala údaje o rychlosti eroze odvozené z monitoringu hmotové bilance prvků v malých, hydrologicky dobře definovaných povodích. Dále byly zohledněny výpočty Výzkumného ústavu meliorací a ochrany půd týkající odnosu půdního pokryvu. Součástí rešerše byly také studie zabývající se problematikou neotektonických procesů na území Českého masivu. Nedílnou součástí vstupních dat byly údaje indikující rychlosti zahlubování drenážního systému odvozené od stratigrafie a stanovení stáří terasových systémů a zarovnaných povrchů pomocí kosmogenních nuklidů. Ve studii byly také analyzovány údaje o pohybech povrchu z měření pomocí velmi citlivých GPS v rámci dlouhodobého projektu EUVN (European Vertical GPS Reference Network).

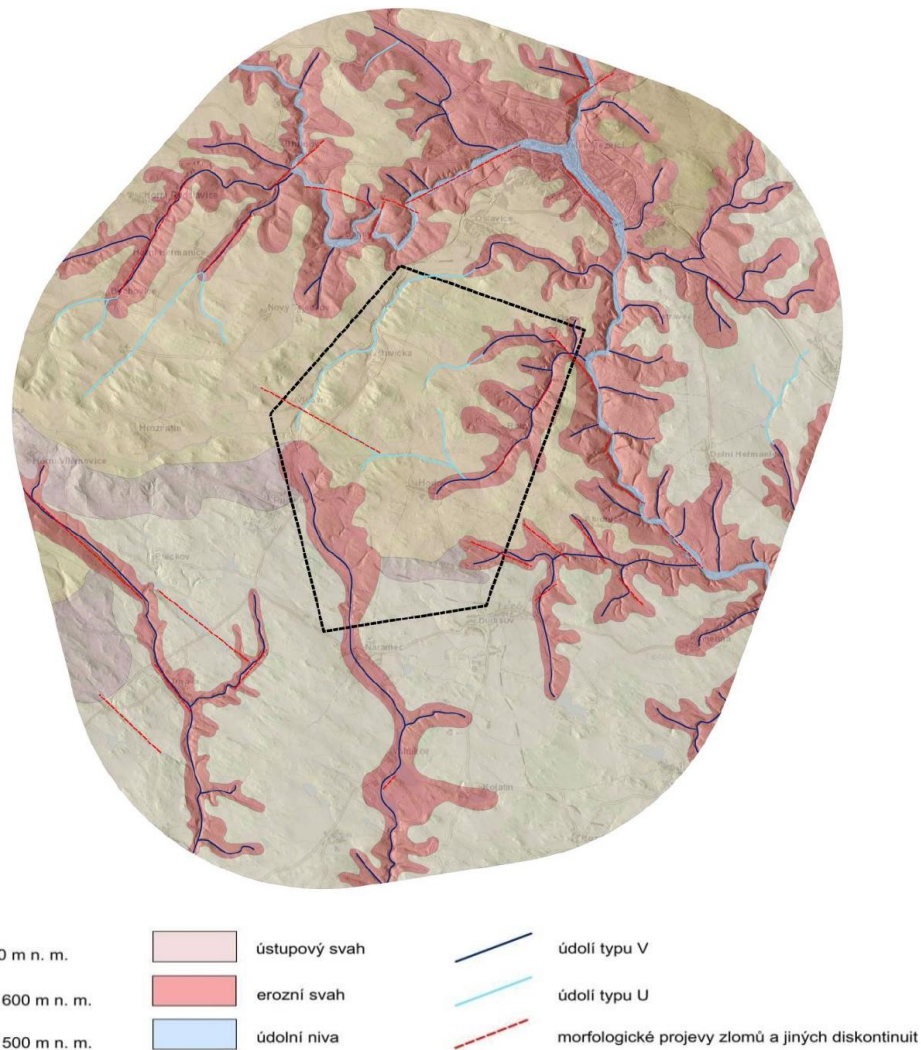
V dalším kroku byla provedena základní geomorfologická analýza zájmových území zaměřená na denudační a erozní procesy. Ta spočívala ve vizuální interpretaci povrchu a vymezení jednotlivých morfologických tvarů na základě jejich původu a následné klasifikaci z hlediska typu a intenzity denudačních procesů, které na nich zpravidla probíhají. Geomorfologická interpretace byla vypracována pomocí stínovaného reliéfu a analýzy sklonitosti povrchu odvozených z digitálního modelu reliéfu 4. generace (DMR 4G; Hroch et al. 2015a).

Na základě syntézy rešeršních dat a nově provedených geomorfologických analýz byl pro každou lokalitu nastíněn budoucí morfologický pro dva klimatické scénáře: vývoj pro scénář odpovídající humidnímu klimatu a pro scénář odpovídající aridnímu klimatu včetně vzniku permafrostu. Byl také stanoven hrubý odhad limitních hodnot eroze v období následujících 100 000 let. Příklad zpracování pro jednotlivé lokality je uveden na Obr. 29.

Ve scénáři pro aridní cyklus bylo třeba uvažovat, že v průběhu pleistocénu probíhala tato období v chladném módu. V důsledku toho lze předpokládat menší vliv aluviální eroze spojené se zahlubováním říčních údolí, avšak lze očekávat větší projevy periglaciálních jevů. V tomto období bude uplatňováno zejména mechanické zvětrávání horninového prostředí se vznikem mrazových srubů a ústupových svahů. Ve větší míře bude uplatněna plošná eolická eroze. Rychlosti eroze nebudou tak vysoké jako v humidním cyklu, ale je třeba počítat se vznikem permafrostu, který v geologické minulosti dosahoval u nás hloubky v řádech prvních stovek metrů (např. Zeman a Růžičková 1995). V aridním cyklu nelze počítat s výraznou erozní činností ledovce, jelikož žádná z lokalit nebyla v období kvartéru zaledněna.

Ve scénáři pro humidní cyklus se předpokládá, že změny na vliv morfologie bude mít zejména aluviální eroze doprovázená prohlubováním erozních údolí a jejich rozšiřováním proti proudu toků. Hodnoty prohloubení dnešních erozních struktur by měly odpovídat rozmezí hodnot, které je v literatuře uváděno pro předešlá geologická období. Je nutné počítat, že rozmezí těchto hodnot se může pohybovat v široké škále v závislosti na lokálních podmínkách a neotektonické aktivitě.

Z geomorfologických analýz vyplývá, že zpětnou hloubkovou erozí jsou nejméně ohroženy oblasti rozvodí, které odpovídají povrchu paleoreliéfů. Z tohoto pohledu jsme zde schopni identifikovat dvě lokality, které budou v budoucnu nejméně postižené erozí, a to Březový potok a Čihadlo. Poněkud komplikovanější je situace na lokalitě Čertovka, kde byly vymezeny výrazné zlomové svahy. Případné oživení těchto zlomových struktur přináší nejistoty do predikce morfologického vývoje oblasti. Dalším negativním faktorem na lokalitě Čertovka je přítomnost paleozoických sedimentů žihelské pánve, které vzhledem ke své litologické charakteristice vykazují vyšší náchylnosti k erozi. Nejproblematictější se z hlediska erozní stability jeví lokality umístěné na východním okraji Českomoravské vysočiny (Kraví hora, Horka a Hrádek), které společně vykazují vliv současné zpětné eroze. Zejména jv. část lokality Kraví hora je silně postižena hloubkovou erozí, kde lokální erozní báze je až o 300 m níže než nejvyšší úroveň zachovalého povrchu. Výrazné projevy hloubkové eroze na těchto lokalitách mohou být způsobeny neotektonickými pohyby na periferii Českého masivu, které mají za následek nevyrovnané spádové křivky říčních systémů v povodí Svatky a Jihlavy (Hroch et al. 2015b).



Obr. 29 Ukázka geomorfologického schématu pro lokalitu Horka

4.5.3.3 Nejistoty řešení ZL

Stanovené hodnoty předpokládané rychlosti erozních a denudačních procesů jsou zatíženy značnými nejistotami, které spočívají v heterogenitě a nedostatku relevantních dat. Základní geologické údaje pro jednotlivé lokality vykazují značné kvalitativní rozdíly. Pro jednotlivé lokality nejsou k dispozici geologické mapové podklady jednotného měřítka. Údaje pocházející z přímého měření pomocí velmi citlivých GPS (v rámci dlouhodobého projektu EUVN (European Vertical GPS Reference Network) detekující vertikální pohyby povrchu, poskytují značně heterogenní výstupy, jelikož použitá metodika je do značné míry závislá na citlivosti jednotlivých zařízení, jejich umístění a původních cílech konkrétní studie a studované oblasti a krátkém intervalu měření, který lze těžko aproximovat na stovky tisíc let.

Nejistoty se stanovením rychlostí eroze a predikce morfostrukturního vývoje vyplývá zejména v nízkém počtu údajů o stáří zachovaných povrchů a teras, a jejich absence v blízkosti lokalit. Údaje o rychlosti zahlabování drenážního systému na základě datování pomocí izotopů ^{10}Be a ^{26}Al jsou dostupné ve velmi omezeném počtu jen z širší oblasti Českého masivu. Chybí tak detailnější analýzy v příslušných povodí včetně nových dat o stáří povrchů. Další nejistoty

představuje problematika recentních pohybů na zlomech, které předurčují změny reliéfu a rychlosti erozních procesů.

Zhotovená geomorfologická studie je provedena pouze v omezeném rozsahu a přehledném měřítku. Nezastihuje tak problematiku vývoje reliéfu v celé šíři a neumožňuje provést kompletní interpretaci vývoje reliéfu do budoucna.

4.5.3.4 Návrh dalších prací

V návaznosti na studie provedené v rámci ZL je vhodné prohloubit znalosti o vývoji reliéfu v daných oblastech jednak podrobnou geomorfologickou studií včetně analýzy drenážního systému včetně spádových poměrů a pořízením nových údajů o stáří zachovaných povrchů. Tato studie by měla být doplněna o systematickou analýzu zvětralinového pláště a geotechnických vlastností hornin.

Pro upřesnění vlivu neotektonických procesů a recentních pohybů na zlomech je žádoucí zpracování detailní tektonické a strukturně geologické studie. Radarová interferometrie představuje další z nezávislých metod umožňující detekovat změny povrchu. Její aplikace v kombinaci s měřením s pozemními stanicemi GPS by měly být součástí dlouhodobého monitoringu vertikálních pohybů povrchu.

4.5.3.5 Výstupy ZL

HROCH T., PAČES T., HOŠEK, J., ŠEBESTA, J. (2015a): Erozní stabilita lokalit. Průběžná zpráva zpráva. – MS SÚRAO TZ 25/2015 Praha.

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

HROCH T., PAČES T., HOŠEK, J., NÝVLT, D., ŠEBESTA, J., HEJTMÁNKOVÁ, P. (2015): Erosion stability of DGR potential sites – Final report. – MS SÚRAO ZZ 25/2015/ENG, Praha.

4.5.4 Expertní odhady dlouhodobé stability horninového prostředí / Klimatická stabilita území (PB-2014-ZL-S2382-008- KlimatickaStabilita)

Hlavní autoři: Nývlt D. (ČGS)

4.5.4.1 Cíl ZL

Cílem tohoto dílčího projektu *Klimatická stabilita území* bylo vyhodnocení různých scénářů vývoje klimatu ve střední Evropě (ochlazení, oteplení) v příštích 100 000 letech a jejich vlivu na hydrogeologický režim perspektivních lokalit HÚ RAO v ČR a zhodnocení „klimatické stability“ území vytipovaných lokalit hlubinného úložiště jaderného odpadu.

K dosažení tohoto cíle byla především zpracována rešerše a interpretována dostupná publikovaná literatura i nepublikovaná data dvěma nezávislými experty ve smyslu zhodnocení klimatické stability území sedmi vytipovaných lokalit HÚ RAO po dobu budoucích 100 000 let.

4.5.4.2 Zhodnocení řešení projektu

Budoucí stav klimatického systému není v dlouhodobém časovém horizontu predikovatelný. Proto studie zahrnuje definici hlavních prvků klimatického systému a řídicích parametrů, které klima ovlivňují na různých časových škálách, včetně zhodnocení dřívějšího vývoje klimatu. Vyhodnocení klimatické stability střední Evropy v příštích 100 000 letech vycházelo při hodnocení oběma experty z odlišných předpokladů.

Jeden z expertů vycházel z paleoklimatologické premisy předpovědi budoucího vývoje klimatu na základě dřívějších změn hlavních prvků klimatického systému a řídicích parametrů, které klima ovlivňují na různých časových škálách. Výsledkem je predikce budoucího vývoje klimatu pro oblast střední Evropy ve třech limitních scénářích. Scénáře zahrnují 1) maximální oteplení a zvlhčení klimatu známé z hypsitermálních fází kvartérních interglaciálů, 2) maximální ochlazení a vysušení klimatu známé z kvartérních pleniglaciálních podmínek a z 3) modelového vývoje budoucího chodu klimatu v důsledku antropogenně změněných podmínek. Scénáře zároveň zhodnocují možnost ovlivnění jednotlivých lokalit HÚ RAO ledovcem, výskyt permafrostu a jeho vliv na hydrogeologický režim.

Druhý expert naopak přistupoval k expertnímu posouzení z pohledu výstupu klimatických modelů na různé časové škále, od klimatického vývoje během 1) následujících století, 2) nejbližších 10 tisíc let až 3) následujících 100 tisíc let včetně analogových scénářů chodu hlavních řídicích parametrů během dřívějších období kvartéru a variant budoucího vývoje klimatu vycházejících z různě antropogenně zvýšených koncentrací CO₂ v atmosféře. Pro všechny časové horizonty lze predikce a scénáře budoucího vývoje klimatu chápat pouze jako regionální, a proto jsou níže uvedené výsledky aplikovatelné na všechny hodnocené lokality HÚ RAO.

Limitní scénáře vývoje klimatu v budoucích 100 tisících letech

1) **scénář maximálního ochlazení a vysušení klimatu** odpovídající vrcholným pleniglaciálním podmínkám ukazuje na průměrné roční teploty vzduchu v mimohorských oblastech našeho území nejčastěji v rozpětí ~ -7 až -2 °C a odpovídaly tak dnešní Vysoké Arktidě nebo okrajové části Antarktidy. Zároveň jsou tato období také nejsuššími obdobími v rámci kvartérních klimatických cyklů, kdy byly průměrné roční srážky ve středoevropském prostoru v rozpětí ~250–350 mm. Pleniglaciální podmínky trvaly během posledního miliónu let v každém cyklu 6–20 tisíc let, což odpovídá 5–17 % délky trvání dlouhého kvartérního glaciálně-interglaciálního cyklu. Naproti tomu běžné glaciální podmínky, které panovaly na našem území po dobu 60–80 % dlouhých glaciálně-interglaciálního cyklu, vykazují značně proměnlivé průměrné roční teploty nejčastěji v rozmezí -2 až 5 °C a značně proměnlivé průměrné roční úhrny srážek v rozmezí ~300–600 mm.

V glaciálních podmínkách se v nezaledněných oblastech Střední Evropy tvořil permafrost, jehož mocnost na našem území během pleniglaciálních podmínek dosahovala až 200–250 m. Permafrost zásadně ovlivňoval oběh podzemních vod, především díky nulové infiltraci povrchové vody do hlubších částí zemské kůry a hluboký hydrogeologický oběh byl permafrostem efektivně oddělen od povrchového hydrologického oběhu. Z pohledu trvalého uložení radioaktivního materiálu v hloubkách vyšších než 300–400 m jsou podmínky odpovídající scénáři maximálního ochlazení a vysušení klimatu během vrcholných pleniglaciálních podmínek velmi vhodné, protože díky tvorbě permafrostu dojde k oddělení povrchového hydrologického a hlubinného hydrogeologického oběhu vod a permafrost

představuje přirozenou bariéru pro možnou kontaminaci povrchu uloženými radioaktivními látkami. Stejně tak sezónně rozmrazující činná vrstva permafrostu o mocnosti max. prvních metrů nemůže mít žádný vliv na hlubinné uložení radioaktivního materiálu.

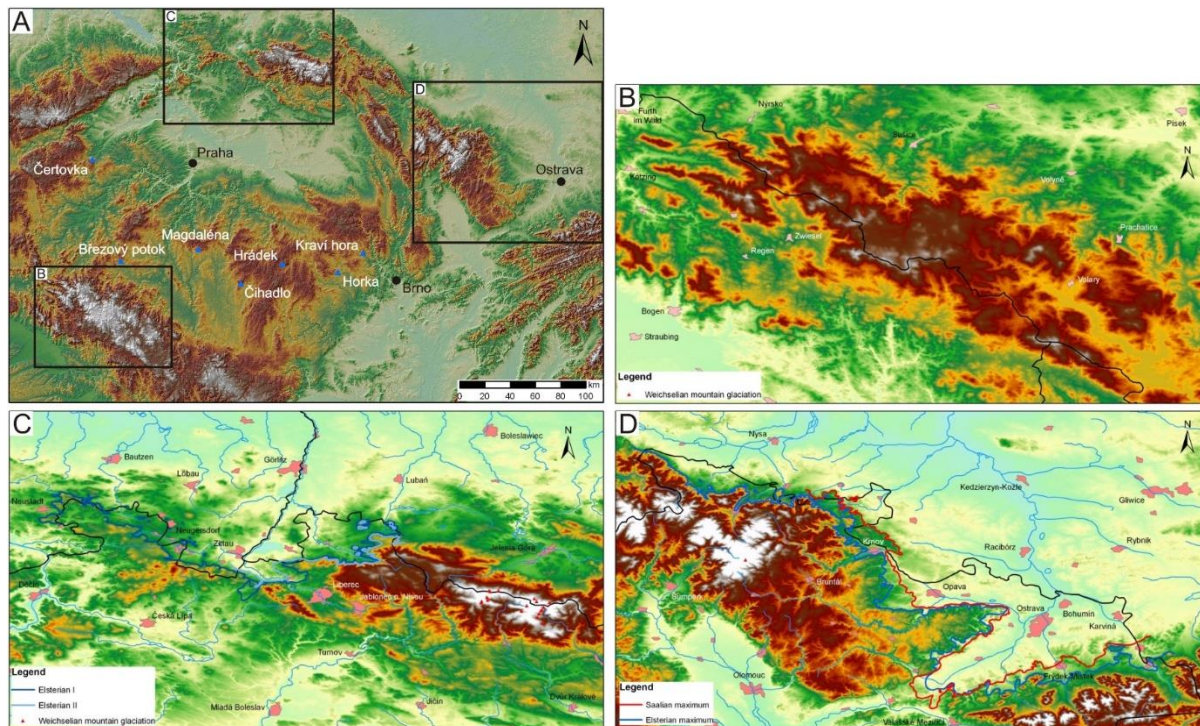
Podle modelů budoucího vývoje orbitálních parametrů planety Země by mohly glaciální podmínky na severní polokouli začít za 40–50 tisíc let a přetrvat dalších 50–60 tisíc let, avšak pokles insolace pro vysoké šířky severní polokoule ukazuje na fakt, že by nemusely být tak chladné a suché jako vrcholné středopleistocenní glaciály a výše zmíněných limitních podmínek v nejbližších 100 tisících letech zřejmě nedosáhneme.

II) **scénář maximálního oteplení a zvlhčení klimatu** odpovídající vrcholným interglaciálním (hypsitermálním) podmínkám ukazuje na průměrné roční teploty v mimohorských oblastech ~8–11 °C a průměrné roční úhrny srážek v intervalu ~800–900 mm. Hypsitermální interglaciální podmínky byly v rámci dlouhých kvartérních glaciálně-interglaciálních cyklů extrémně výjimečné a trvaly nejčastěji 1–3 tisíce let, tedy 1–3 % délky jejich trvání. Tvorba permafrostu na našem území je v tomto scénáři vyloučená. Naopak zvlhčení klimatu o 20–30 % oproti dnešku způsobí vyšší infiltraci teplejších povrchových vod do hlubších kolektorů. Současné klimatické podmínky s průměrnými ročními teplotami ve středních nadmořských výškách Střední Evropy nejčastěji 6–9 °C a s ročními úhrny srážek obvykle 550–700 mm odpovídají naproti tomu běžným interglaciálním podmínkám. Ty trvaly obvykle 8–12 tisíc let, tedy 7–10 % trvání dlouhého kvartérního klimatického cyklu.

Studium vývoje orbitálních parametrů v minulosti a jejich predikce do budoucna ukazuje, že vhodným ekvivalentem budoucího interglaciálního vývoje je holstein (MIS 11, kulminace před ~405 tisíci let). Ten 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 50 tisících letech. Během MIS 11 došlo k rozpadu Grónského a Západoantarktického ledovcového štítu, což znamenalo nárůst hladiny světového oceánu o 10–12 m. Z tohoto pohledu je možné scénář maximálního oteplení a zvlhčení klimatu odpovídající vrcholně interglaciálním podmínkám považovat za relevantní pro budoucí vývoj klimatu během nejbližších 50 tisíc let.

III) **scénář antropogenně podmíněného oteplení klimatu** odpovídající současným modelům s dominantním vlivem člověka na budoucí chod klimatu planety Země ukazuje na dominantně interglaciální podmínky v nejbližších 50 tisících letech a následný nástup plošného zalednění na severní polokouli. Zásadní neznámou je však působení člověka, a to emise skleníkových plynů, především CO₂. Současná koncentrace CO₂ v troposféře překročila 400 ppmv, což je nesrovnatelně více, než kdykoliv během posledního miliónu let (interglaciální maxima dosahují 300 ppmv). Budoucí výhled IPCC (2013) dokonce počítá v nejbližších stoletích s koncentrací CO₂ > 500 ppmv. Proto je podíl CO₂ v troposféře a jeho změny v čase zásadní pro stanovení klimatických podmínek v rámci scénáře antropogenně podmíněného oteplení budoucího klimatu pro následujících 100 tisíc let. Podle modelů scénáře RCP8.5 (IPCC 2013) dojde k brzkému úplnému roztátí Grónského ledovcového štítu a obecně budou na celé severní polokouli během následujících 100 tisíc let probíhat bezledovcové podmínky. Stejně tak pravděpodobnost vzniku permafrostu a jeho vlivu na hluboký oběh podzemních vod je nulová. Detailní průběh počasí a klimatu je na škále 100 tisíc let nepredikovatelný. Jediné, co lze s větší jistotou předpovědět, je značné zvýšení variability klimatu v prostoru Střední Evropy.

V žádném ze tří výše zmíněných scénářů budoucího vývoje nelze v nejbližších 100 tisících letech počítat s přímým vlivem ledovce na sedm vybraných lokalit hlubinného úložiště, protože nebyly v posledním miliónu let nikdy zaledněny a limitní scénáře tuto možnost také vylučují (Obr. 30).



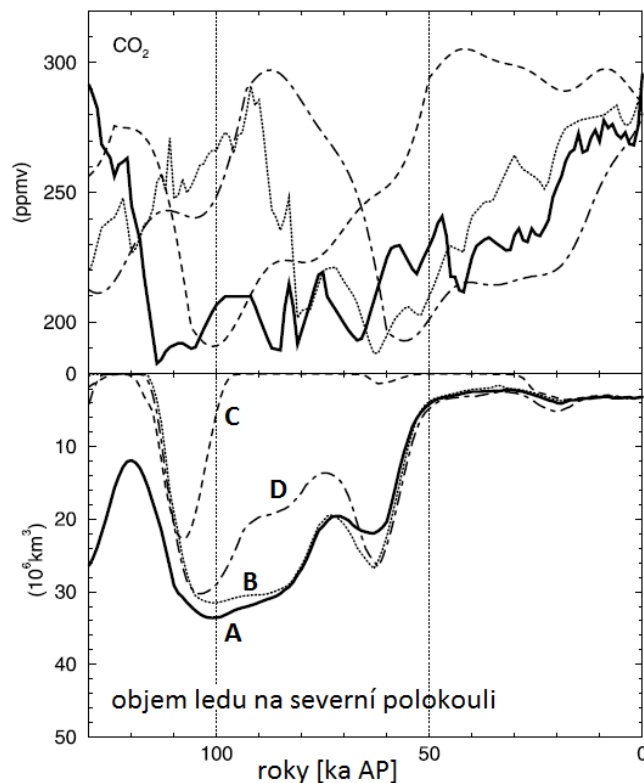
Obr. 30 Maximální rozsahy kontinentálních a horských ledovců na území Česka. A. Přehledná mapa s vyznačením dotčených lokalit a výřezů zobrazených v obrázcích B-D. B. Horské ledovce na české straně Šumavy. C. Maximální rozsahy kontinentálních ledovců v severních Čechách a horské ledovce v Krkonoších. D. Maximální rozsahy kontinentálních ledovců na Moravě a ve Slezsku a horský ledovec v Hrubém Jeseníku. Upraveno dle Nývlt et al. (2011)

Variantské scénáře vývoje klimatu v příštích 100 tisících letech

Přehled dosavadních poznatků umožňuje v základních rysech naznačit vývoj klimatu v „teplé“ a „chladné“ variantě. Při relativně přesné predikci orbitálních parametrů Země a množství insolace se jako zásadní pro další vývoj klimatu jeví otázka vývoje budoucích koncentrací CO_2 . Jestliže přirozenou variabilitu koncentrací CO_2 lze opět s jistou mírou spolehlivosti odvodit na základě analogie vývoje z minulosti, vývoj koncentrací CO_2 i dalších radiačně aktivních plynů v důsledku antropogenní činnosti je značně nejistý. Obr. 31 shrnuje čtyři varianty vývoje objemu kontinentálního zalednění během příštích 130 tis. let v závislosti na vývoji koncentrací CO_2 .

Varianta A předpokládá v příštích 130 tisících letech vývoj koncentrací CO_2 analogický vývoji během MIS 5, naopak varianta B předpokládá vývoj koncentrací analogický během MIS 11. Tyto varianty tedy předpokládají pouze přirozený vývoj koncentrací skleníkových plynů. Naopak varianta C předpokládá trvání relativně dlouhého období s koncentracemi přesahujícími hodnoty před-industriálního období. Simulace byly sestaveny na základě výpočtů modelu LLN 2D NH (Loutre 2003), který uvažoval pravděpodobný vývoj insolace podle

orbitálních parametrů Země (Berger 1978) a přirozený vývoj koncentrací CO_2 ze stanice Vostok pro interglaciály MIS 5 (Jouzel et al. 1993) resp. MIS 11 (Petit et al. 1999). Simulace A resp. B mohou tedy sloužit jako „chladné“ varianty a simulace C jako „teplá“ varianta budoucího vývoje klimatu.



Obr. 31 Varianty možného vývoje koncentrací CO_2 (nahore) a modelová odezva v podobě objemu kontinentálního zalednění na severní polokouli (dole) podle modelu LLN 2D NH. Varianty: A – CO_2 koncentrace rovna 260 ppm během příštích 19 tisíc roků (analog MIS 5); B – CO_2 koncentrace 260 ppm během příštích 11 tisíc roků (analog MIS 11); C – CO_2 koncentrace vyšší než 280 ppm během příštích 50 tisíc roků; D – CO_2 nižší než 220 ppm od doby před 20 tisíci roky (upraveno podle Loutre 2003)

Všechny uvažované varianty předpokládají dlouhotrvající interglaciál. V případě „teplé“ varianty (C) se předpokládá úplné roztátí pevninského ledovce na severní polokouli za 30 tisíc roků od současnosti a zformování zalednění většího rozsahu se nepředpokládá během příštích 100 tisíc roků. V případě „teplé“ varianty klimatu by budoucí vývoj odpovídal scénářům RCP4.6 resp. RCP8.5 podle IPCC (2013) s pomalým poklesem koncentrace CO_2 . Pouze pokud tyto klesnou pod před-industriální úroveň 280 ppm, mohou se vytvořit podmínky pro nástup růstu ledovců na severní polokouli nejdříve za 50 tisíc roků. Následující období 50 až 100 tisíc roků by bylo charakterizováno postupným ochlazováním, avšak také značnou variabilitou klimatu. Ta však není predikovatelná, její rozsah lze pouze odhadnout na základě variability během přechodu z posledního interglaciálu do podmínek glaciálu v období zhruba před 113–63 tisíci roky.

„Chladné“ varianty (A, B) předpokládají rozsah zalednění na zhruba současné úrovni po dobu příštích 50 tis. roků. Poté by mělo dojít k nárůstu kontinentálního zalednění, částečně přerušnému za cca 70 tis. roků, s následným pozvolným zvětšováním rozsahu zalednění a dosažením maxima příštího glaciálu krátce po 100 tis. roků od současnosti. Maximální rozsah

kontinentálního zalednění severní polokoule však nedosáhne rozsahů vrcholných glaciálních podmínek pleistocénu. Ani v tomto období postupného ochlazování tedy zřejmě nedojde k rozšíření pevninského ledovce do střední Evropy. Ve středoevropském prostoru však může vzniknout permafrost, který může oddělit oběh povrchových vod od hlubšího oběhu podzemních vod. Testy citlivosti provedené pro vývoj množství insolace a koncentraci CO₂ ukazují, že pro nástup dalšího glaciálu je nezbytné, aby hodnoty obou uvažovaných klimatotvorných faktorů klesaly. V opačném případě na severní polokouli přetrvávají podmínky interglaciálu (Loutre 2003).

Obě „chladné“ varianty pracují pouze s relativně nízkými přirozenými koncentracemi CO₂ na základě analogického vývoje v interglaciálech MIS 5 (varianta A) a MIS 11 (varianta B). Přitom současné koncentrace v důsledku antropogenních emisí jsou daleko vyšší (400 ppm). Navíc scénáře pracující s okamžitým zastavením emisí hlavních skleníkových plynů (RCP2.6) a jejich rychlým poklesem se jeví jako málo pravděpodobné. I při těchto „chladných“ variantách by vývoj orbitálních parametrů Země vytvořil příznivé podmínky pro dvě období minima sluneční insolace na severní polokouli, a to kolem 17 tisíc roků a 54 tisíc roků od současnosti. Výskyt prvních příznaků zalednění v těchto obdobích by však byl možný pouze při koncentracích CO₂ pod 280 ppm.

Hlavními faktory formujícími budoucí klima budou jednak množství insolace z podstatné části determinované orbitálními parametry Země a také koncentrace skleníkových plynů. Insolace a její průběh v budoucích 100 tisících letech je predikovatelný faktor. Budoucí vývoj klimatu je tak závislý na neznámých emisích skleníkových plynů, především CO₂. Současná koncentrace CO₂ v troposféře > 400 ppmv je nesrovnatelně vyšší, než kdykoliv během posledního miliónu let. Budoucí výhled IPCC (2013) dokonce počítá v nejbližších stoletích s koncentrací CO₂ > 500 ppmv. Pokud budou antropogenně zvýšené hodnoty koncentrace CO₂ (>300 ppmv) v troposféře přetrvávat, dojde k úplnému roztátí Grónského ledovcového štítu a obecně budou na celé severní polokouli během následujících 100 tisíc let probíhat bezledovcové podmínky. Stejně tak pravděpodobnost vzniku permafrostu a jeho vlivu na hluboký oběh podzemních vod je velmi malá. Detailní průběh počasí a klimatu je na škále 100 tisíc let nepredikovatelný. Jediné, co lze s větší jistotou předpovědět, je značné zvýšení variability klimatu v prostoru střední Evropy (Nývtl et al. 2015c).

4.5.4.3 Nejistoty řešení ZL

Nejistoty spojené s vyhodnocením vlivu vývoje klimatu v příštích 100 tisících letech jsou jen špatně kvantifikovatelné. Zásadním nepředpověditelným prvkem je budoucí chování lidské společnosti, která již nyní zásadní měrou klima planety Země ovlivňuje geologicky bezprecedentním vypouštěním radiačně aktivních plynů, a to nejen CO₂. Antropogenně podmíněné koncentrace skleníkových plynů v atmosféře budou zásadní měrou ovlivňovat chování celého klimatického systému a jejich predikovatelnost se blíží nule.

4.5.4.4 Návrh dalších prací

Budoucí regionálně zaměřené klimatické modely mohou přinášet opět pouze variantní scénáře budoucího vývoje klimatu a dále upřesňovat tyto předpovědi s dalším rozvojem klimatických modelů, přičemž jako zásadní neznámá budoucího vývoje ovlivňující výstupy modelů se ukazují antropogenně podmíněné koncentrace skleníkových plynů v atmosféře.

4.5.4.5 Výstupy ZL

NÝVLT D., DOBROVOLNÝ P. (2015A): Klimatická stabilita území. Technická zpráva. – MS SÚRAO, Praha.

NÝVLT D., DOBROVOLNÝ P. (2015b): Klimatická stabilita území. Závěrečná zpráva. – MS SÚRAO ZZ 22/2015, Praha.

NÝVLT D., DOBROVOLNÝ P. (2015c): Climate stability of DGR potential sites. Final report. – MS SÚRAO ZZ 22/2015/ENG, Praha.

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.

4.5.4.6 Expertní odhady dlouhodobé stability horninového prostředí / Seismická stabilita území (PB-2014-ZL-S2379-009-SeismickáStabilita)

Hlavní autoři: Kaláb Z. (ÚGN)

4.5.4.7 Cíl ZL

Cílem plnění tohoto ZL bylo získat vstupní parametry pro hodnocení seismicity a hodnocení vlivu seismických účinků v hloubkách hypotetického úložiště v příštích 100 000 letech. Seismická stabilita je důležitý požadavek dlouhodobé stability pro území s vybudovaným HÚ RAO. Český masiv jako geologická struktura je relativně stabilní, přičemž nevykazuje známky zvýšené seismicity (>6°MSK-64, EMS-98). Území ČR je monitorováno na seismické otřesy, přičemž naměřené hodnoty lokálního magnitudy jsou dlouhodobě pod limitní hodnotou pro kritérium vhodnosti ($ML \leq 6$).

4.5.4.8 Zhodnocení řešení projektu

Základním zdrojem dat historických zemětřesení do roku 1990 byl seismický portál <http://www.seismicportal.eu/>, zdrojem dat současných seismických jevů od roku 1991 byl datový portál CzechGeo (<http://czechgeo.cz>). Pro hodnocení seismicity a hodnocení vlivu seismických účinků v hloubkách hypotetického úložiště v příštích 100 000 letech byla zvolena neo-deterministická metoda. Programem AXITRA byly vyčísleny Greenovy funkce pro lokality potenciálních úložišť. Vlnové pole v místě stanice závisí kromě souřadnic ohniska a místa pozorování a vlastností prostředí také na mechanismu zdroje, který je neznámý, a proto byly spočteny hodnoty PGA pro různé mechanismy vzdálených zemětřesení. Žádaným odhadem PGA je pak maximum z takto určených veličin.

V nejstarším historickém období do roku 1899 byla rešerše zemětřesení provedena pro území ČR a příhraniční oblasti. 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 $l_0 = 8-9$ ($M_w = 6,06 \pm 0,47$). Podle mapy byly na území dnešní ČR pozorovány projevy odpovídající hodnotě až $l_0 = 7-8$ (Jihlavsko), hodnoty $l_0 = 6-7$ jsou uváděny východně od Prahy. Nejintenzivnější doložené historické zemětřesení („extra large“) v blízkosti vymezené oblasti

je jev z 25. ledna 1348, který je lokalizován do oblasti Carinzia (Itálie). Jeho intenzita je uvedena $Io = 9-10$, magnitudo $M_w = 6.99 \pm 0.30$. Jeho makroseismický projev na území ČR je nepravděpodobný.

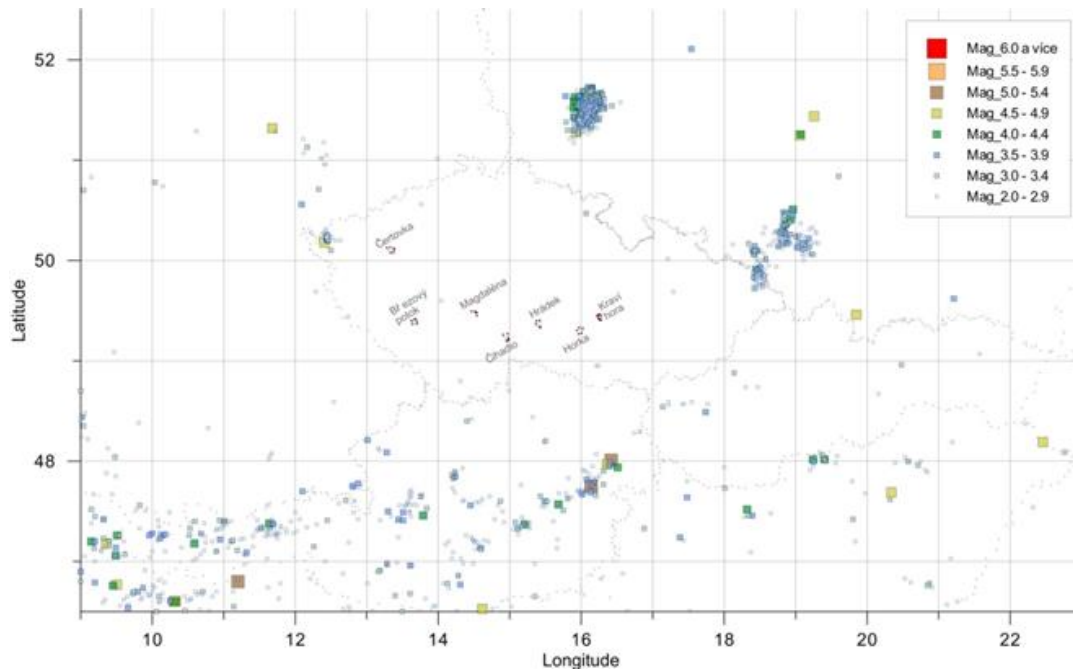
Také v letech 1900-1990 byl na území ČR zaznamenán pouze velmi malý počet zemětřesení, a to velmi slabých. Nejintenzivnější zemětřesení bylo zaznamenáno v oblasti Náchodska z 10. 1. 1901 (02:30) s magnitudem $M_w = 5,1$. Ve vymezené širší oblasti (ČR a okolí) bylo v uvedeném období zaznamenáno pouze 14 zemětřesení s magnitudem nad 5,0.

Na území ČR nebylo v období od roku 1991 zaregistrováno zemětřesení s magnitudem větším než 5,0. Nejintenzivnější tektonický otřes byl zaznamenán v oblasti Nového Kostela v Západních Čechách dne 31. 5. 2014 (10:37) s hodnotou lokální magnituda $ML = 4,4$ ($Mag = 4,5$). V okolí ČR byly ve zpracovaném období zaregistrovány pouze 3 seismické jevy s magnitudem Mag nad 5,0.

Detailní rešeršní analýza zemětřesení v letech 1991–2014 byla provedena pro jednotlivé potenciální lokality HÚ (Obr. 32). Souhrnně lze uvést, že v okolí žádné z potenciálních lokalit HÚ nepřesáhla hodnota magnituda ML nebo Mag velikost 2,3. S výjimkou tří otřesů nebyla v lokalitách HÚ přesáhnutá magnituda (ML nebo Mag) 2,0, u řady jevů nebylo magnitudo stanoveno vůbec.

Teoretické modelování vlnového pole pro potenciální lokality s přihlédnutím k historickým datům (zdrojová zemětřesení) prokázalo, že pro vzdálená zemětřesení byla maximální špičková amplituda akcelerace na lokalitě Hrádek (zemětřesení Niederösterreich 15. 9. 1590). PGA maximalizována přes všechny orientace střížného skluzu jako mechanismu zemětřesení má hodnotu $0,184 \text{ m s}^{-2}$ na povrchu pro uvažovanou hloubku ohniska 1 km. Také výpočty PGA pro lokální jevy mají velmi nízké hodnoty (Tab. 14). Výrazněji vybočuje maximální horizontální zrychlení na lokalitě Čihadlo vyvolané lokálním jevem z 2. 1. 1996, magnitudo $ML = 2,1$ (špičková akcelerace v hloubce 500 m byla dopočítána na hodnotu $0,22 \text{ m s}^{-2}$). Důvodem je skutečnost, že na lokální zemětřesení jde o jev relativně silný, a hlavně velmi blízký – jeho vzdálenost od lokality je jen něco málo přes 4 km.

Špičkové hodnoty vibrací zemětřesení (PGA, PGV nebo PGD) se snižují s hloubkou, tento pokles je rychlejší v mělkých vrstvách oproti hlubším partiím. Snížení amplitudy v závislosti na hloubce je ovlivněno velikostí magnituda zemětřesení a lokální geologickou stavbou. Obecně platí, že poškození v podzemích stavbách (dolech) je nevýznamné, pokud se tyto nacházejí v pevných (únosných) a neztvrdlých horninách. Největší škody vznikají v podzemích 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.



Obr. 32 Mapa seismických jevů z období 1991–2014 z databáze ČRSS. Vyneseny všechny seismické jevy s magnitudem Mag větším než 2 (určené světovými datovými centry – ISC, NEIC, SED apod.), v mapě jsou vyznačena průzkumná území HÚ

Tab. 14 Hodnoty maximálního horizontálního zrychlení (PGA) (v jednotkách $m s^{-2}$) vyvolané dvěma nejsilnějšími jevy vyskytnuvšími se uvnitř nebo v blízkém okolí ochranného pásma každé z uvažovaných lokalit. Výpočet je proveden pro povrch a pro hloubku 500 m

jev	Čertovka		Březový potok		Magdaléna		Čihadlo		Hrádek		Horka		Kraví hora	
	Lubeneč	Lub	Pačejev	Pac	Jistebnice	Jis	Pluhův Ždár	PIZ	Nový Rychnov	NoR	Budišov	Bud	Krh	Krh
	povrch	500m	povrch	500m	povrch	500m	povrch	500m	povrch	500m	povrch	500m	povrch	500m
1	1.7.1996 0,000054	4,06E-05	17.3.2012 0,000522	0,000294	13.1.2007 0,0378	0,0234	24.3.1999 0,000187	0,000128	18.11.1998 0,00369	0,00219	19.9.1995 0,000977	0,00058	26.3.2006 0,00114	0,000796
2	28.3.2005 0,000246	0,00017	6.4.2007 0,0212	0,0102	9.2.2011 0,0193	0,00196	2.1.1996 0,518	0,22	2.1.1996 0,00499	0,00346	4.12.1998 0,00132	0,00074	4.12.1998 0,000172	0,000125

4.5.4.9 Nejistoty řešení ZL

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 $0,518 m s^{-2}$ na povrchu, v hloubce 500 m je hodnota akcelerace $0,22 m s^{-2}$. Do odhadu nelze zahrnout další související informace, jako je degradace horninového masivu, výplně okolí kontejnerů a vlastních kontejnerů v důsledku probíhajících geochemických procesů a stárnutí. Nelze očekávat z daných studií, 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.

Metoda přímého vyčíslení hodnoty PGA syntézou kompletního vlnového pole v zájmové lokalitě od blízkých či regionálních zemětřesení s potenciálem stavbu ohrozit má výhodu v omezení množství parametrů, jejichž odhad je zatížen velkou chybou. Slabinou přístupu je velká závislost na volbě rychlostního (popř. i útlumového) modelu prostředí, druhým zdrojem nepřesnosti syntetizovaného vlnového pole je nejistota samotných hodnot modelových parametrů.

4.5.4.10 Návrh dalších prací

Na vybrané lokalitě/lokalitách je nutné vybudovat citlivou lokální seismickou síť, která umožní kontinuální sledování aktuálních vibračních projevů na lokalitě a v jejích blízkém okolí. Pro dobrou lokalizaci zaznamenaných seismických jevů je nutno vytvořit podrobný geologický model prostředí vycházející z geofyzikálních a petrologických studií.

4.5.4.11 Výstupy ZL

KALÁB Z., ŠÍLENÝ J., LEDNICKÁ M. (2017) Seismic stability of the survey areas of potential sites for the deep geological repository of the spent nuclear fuel. *Open Phys.*, 15, 486–493. DOI 10.1515/phys-2017-0055.

KALÁB Z., JECHUMTÁLOVÁ Z., LEDNICKÁ M., ŠÍLENÝ J. (2015): Seismicita na území ČR a v příhraničních oblastech. Závěrečná zpráva. – MS SÚRAO ZZ 26/2015, Praha.

KALÁB Z., ŠÍLENÝ J., LEDNICKÁ M., JECHUMTÁLOVÁ Z. (2015): Seismic stability of DGR potential sites. Final report. – MS SÚRAO ZZ 26/2015/ENG, Praha.

4.5.5 3D strukturně-geologické modely horninového prostředí pro HÚ (PB-2014-ZL-S2304-010-3DStrukturneGeoModely)


Hlavní autoři: Franěk J., Bukovská Z., Švagera O., Dudíková Schulmanová B., Buriánek D., (ČGS)

4.5.5.1 Cíl ZL

Pro lokalizaci hlubinného úložiště je nezbytná detailní znalost horninového prostředí. Jedná se zejména o definici geometrie základních litologických celků, tektonické situace a míry homogenity jednotlivých horninových bloků. Tato data jsou nutná pro zhodnocení bezpečnosti lokality a vlastní projektové řešení úložiště, jeho finální geometrii nebo dimenzování robustnosti inženýrských bariér.

Dílčí projekt „3D strukturně-geologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště“, který řešila Česká geologická služba ve spolupráci s firmou PROGEO s.r.o., měl za cíl vyhotovení sedmi 3D geologických modelů pro zvažované lokality pro umístění HÚ. Modely reflektují dvě úrovně:

- 1) Regionální, v měřítku 1 : 25 000, která vychází ze stávajících archivních dat a která zahrnuje všechny významné geologické fenomény v širším okolí lokalit. Polygon regionálního modelu navrhla ČGS.

 SÚRAO	Závěrečná zpráva projektu Výzkumná podpora pro bezpečnostní hodnocení HÚ	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 462/2020

- 2) Detailní, která zpřesňuje regionální model a zahrnuje data získaná novými výzkumnými pracemi. Rozsah zpřesnění detailního modelu je totožný s hranicemi průzkumných území.

Do modelů jsou účelně zahrnuta existující regionální strukturní, petrologická, geologická a geofyzikální data. Dále byla pro účely verifikace archivních dat nově sbírána terénní rekognoskační geologická, strukturní a hydrogeologická data.

4.5.5.2 Zhodnocení řešení projektu

Zpracování 3D geologických modelů bylo koordinováno se třemi projekty, které probíhaly paralelně s tímto dílčím projektem (zadávací list, dále jen ZL) - ZL Bezpečnostní rozbor HÚ v lokalitě Kraví hora (kap. 4.6.10), ZL Matematické modelování křehkého porušení horninového prostředí metodou DFN (statistické modely puklinové sítě porušující horninový masiv – viz kap. 4.7.2) a zakázka zaměřená na reinterpetaci leteckých geofyzikálních dat z projektu Geobariéra z roku 2003. Výsledné modely byly poskytovány třem navazujícím projektům SÚRAO: ZL HG modely horninového prostředí (kap. 4.5.6), ZL Vstupní parametry a modely pro hodnocení transportu radionuklidů v horninovém prostředí (modely transportních cest radionuklidů – viz kap. 4.6.3), ZL Předběžné hodnocení lokalit z hlediska dlouhodobé bezpečnosti (viz kap. 4.7.3) a dále pro účely projektování hlubinného úložiště (Výzkumná podpora pro projektové řešení hlubinného úložiště, SÚRAO). Konkrétně regionální i detailní 3D strukturně geologické modely představují geometrický rámec pro navazující hydraulické, transportní a případně jiné modely potenciálních lokalit HÚ. Součástí 7 regionálních i detailních modelů je předběžný návrh relativně homogenních bloků hornin v plánované hloubce úložiště (cca 500 m pod Zemským povrchem). Po skončení tohoto ZL jsou detailní 3D strukturně geologické modely dále využity pro navazující charakterizační práce potenciálních lokalit HÚ.

Jednotlivé 3D strukturně geologické modely regionálního měřítka zaujímají plochu průměrně 120 km², s hloubkovým dosahem 1,5 km. Vycházejí výhradně z archivních dat a zahrnují všechny významné geologické fenomény v širším okolí 7 potenciálních lokalit HÚ. Rozsah regionálních modelů byl navržen s ohledem na tvar a velikost zájmových horninových těles v průzkumných územích a na průběh významných tektonických linií v jejich okolí. Před tvorbou těchto modelů byla pro každou ze 7 lokalit sestavena jednotná zjednodušená litologická legenda a na jejím základě sjednocená účelová geologická mapa. Zlomby byly rozděleny do 3 kategorií na základě klasifikace švédské SKB (Anderson et al. 2000, Vokál et al. 2017). Regionální modely jsou podpořeny nově vytvořenými zjednodušenými 2D gravimetrickými modely.

Následně byly vytvořeny 3D strukturně geologické modely detailního měřítka, které v plošném rozsahu průzkumného území zohlednily všechny dostupné archivní materiály a v tomto rozsahu obsahují jen naprosté minimum zjednodušení. Dále jsou doplněny na základě nově pořízených terénních geologických a hydrogeologických dat, která byla sbírána za účelem ověření křehké tektoniky a nejvýznamnějších litologických hranic obsažených v regionálních 3D modelech. Příklad je uveden na Obr. 33.

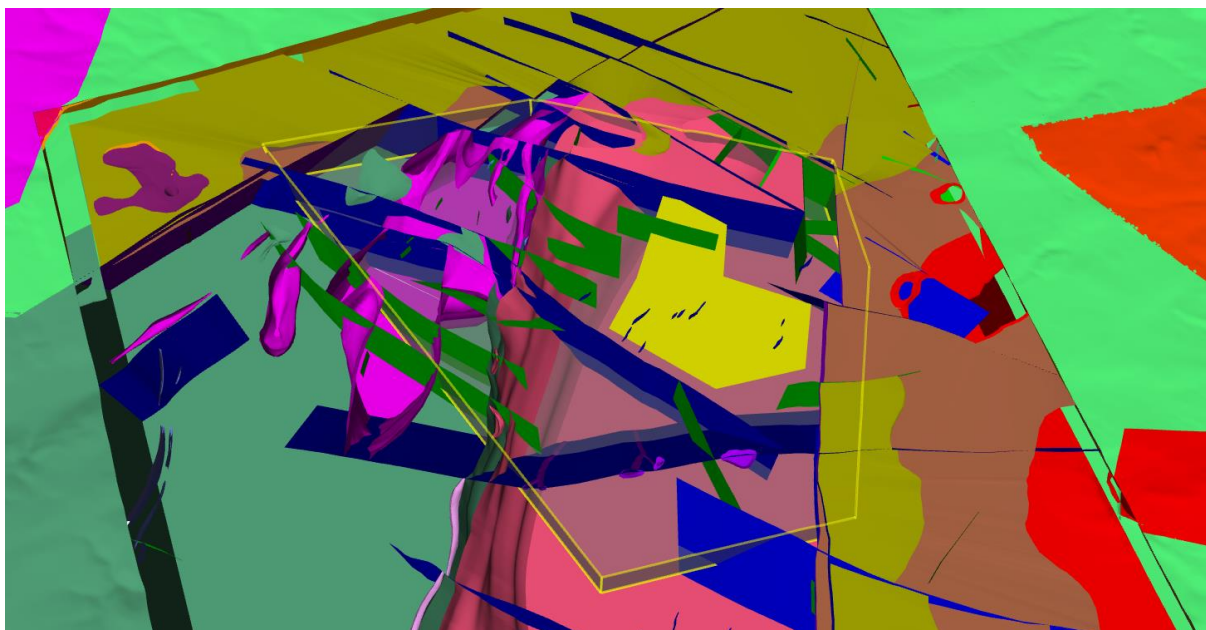
Modely všech 7 lokalit jsou zatíženy vyšší mírou nejistoty v hlubších partiích, vzhledem k tomu, že hloubková data pro většinu modelovaných oblastí neexistují, v případě lokality Kraví hora pak nepochází ze zájmového granulitového masívu. Pro naprostou většinu zlomů nebyl v archivních materiálech uveden jejich směr sklonu a sklon, proto byly takové zlomové

struktury modelovány konvenčně jako vertikální, tudíž věrohodnost jejich průběhu s hloubkou lineárně klesá.

Z hlediska celkové věrohodnosti 3D detailních strukturně-geologických modelů lze lokality kvalitativně popsat následovně (od A - modelu nejlépe podloženého archivními daty po G - model nejméně podložený archivními daty):

- A. Kraví hora – Archivní data na rozdíl od ostatních potenciálních lokalit HÚ zahrnují velké množství podrobných údajů jak z povrchového mapování (včetně technických prací), tak z vrtného průzkumu a báňských prací až do hloubek 1200 m pod povrchem. To je dáno faktem, že významná část území regionálního modelu je zdokumentována průzkumy na uranových ložiskách Rožná a Olší a detailně rozfárána v souvislosti s jejich těžbou. Naopak zde chybí regionální geofyzikální údaje (např. Linsserovy indikace hustotních rozhraní), které jsou pro zbývající lokality zpracovány z projektu Geobariéra. Specifikem lokality Kraví hora je přítomnost uvedených dvou ložisek hluboce rozfáráných v letech 1957–2017 podzemní těžbou. Vzhledem k jejich plánovanému zaplavení po ukončení těžby v roce 2017 bylo nutno tyto prostory do modelu zakomponovat jakožto objemy se zvýšenou hydraulickou propustností. Vstupní data využitá pro tyto účely dosahují díky nízkému stáří a vysoké míře podrobnosti vysoké kvality.
- B. Čihadlo – Podrobných povrchových archivních dat je k dispozici dostatek. Zvláště JV část modelu je na povrchu i do hloubky podrobně popsána díky průzkumu širšího okolí uranového ložiska Okrouhlá Radouň. Komplikovanější gravimetrický model těles granitoidů indikuje jejich dostatečný hloubkový dosah, avšak jejich přesný tvar je v hloubce velmi těžké modelově odhadnout. Méně četné xenolity pararul v zájmovém klenovském plutonu v hlubších částech 3D modelu kvůli nedostatku dat zcela chybí.
- C. Horka – Podrobných povrchových archivních dat je k dispozici dostatek pouze ve východní části 3D modelu. Zvláště JV část modelu je na povrchu i do hloubky podrobně popsána díky geologickému a geofyzikálnímu průzkumu širšího okolí uranového ložiska Jasenice – Pucov. Komplikovanější gravimetrický model granitoidů indikuje jejich malý, ale dostatečný hloubkový dosah. Méně četné žilné horniny v zájmovém třebíčském plutonu kvůli malým rozměrům v regionálním 3D modelu zcela chybí.
- D. Čertovka – Podrobných povrchových archivních dat je k dispozici dostatek kromě severní části 3D modelu. Problematický je hloubkový průběh S a J okraje tiského plutonu a geometrie hydraulicky vodivých sedimentů sousední Žihelské pánve. Gravimetrický model granitoidů indikuje jejich dostatečný hloubkový dosah. Málo četné žilné horniny a drobná tělesa v hlubších částech modelu kvůli nedostatku dat zcela chybí, avšak v hlubších partiích na této lokalitě není důvod očekávat jejich významnější zastoupení.
- E. Březový potok – Podrobných povrchových archivních dat je k dispozici dostatek zejména v severní, západní a východní části 3D modelu. Gravimetrický model granitoidů indikuje jejich zcela dostatečný hloubkový dosah. Méně četné žilné horniny a drobná tělesa v hlubších částech modelu však kvůli nedostatku dat zcela chybí. Z terénních prací vyplynula vysoká četnost výskytů hydrotermálních křemenných výplní na křehkých strukturách v rozsahu celého modelu, což indikuje celkově vysokou míru křehkého porušení v tomto území. Věrohodnost detailního modelu významně snižuje nevyvážené pokrytí území archivními mapovými podklady. Západní polovina území se proto jen zdánlivě jeví jako relativně vhodnější.

- F. Hrádek – Povrchová data jsou k dispozici jen menších měřítek, hloubková data prakticky zcela chybí. To je důvodem, proč je model lokality zatížen výraznou mírou nejistoty zejména v hlubších partiích. Gravimetrický model zájmových granitoidů nicméně indikuje jejich zcela dostatečný hloubkový dosah. Méně četné xenolity pararul v části zájmových granitů v hlubších částech modelu kvůli nedostatku dat zcela chybí. Z terénních prací vyplynul velký význam křemenných žil místy nesoucích polymetalické zrudnění, které tvoří výplně zlomů v jižní části průzkumného území. Věrohodnost detailního modelu snižuje nevyvážené pokrytí území archivními mapovými podklady.
- G. Magdaléna – Omezené množství povrchových geologických dat z důvodu absence výchozových partií, naprostá absence hlubších vrtných dat a nemožnost vytvoření věrohodného gravimetrického modelu do hloubky prvních kilometrů vylučují exaktní odhad hloubkového průběhu hlavních horninových těles dle dostupných dat. Nově provedené terénní a rešeršní práce přispěly převážně jen k ověření a zahuštění již tak početného roje V–Z orientovaných žil leukogranitů až aplitů v celé ploše granitoidů, s výrazně zvýšeným výskytem podél jižního okraje milevského plutonu. Z archivních zlomů se terénními pracemi podařilo ověřit jen menší část. Nelze tedy vyloučit, že lokalita je jen mírně porušena křehkou tektonikou. 3D model je od hloubky cca 100 m založen výhradně na expertních odhadech, přičemž již od hloubky 100 m začíná postrádat četná drobná podpovrchová žilná tělesa leukogranitů.



Obr. 33 Vizualizace detailního 3D strukturně geologického modelu lokality Čertovka s pozicí předpokládaného homogenního bloku. Žlutá plocha představuje předpokládaný homogenní blok, žlutý polygon průzkumné území SÚRAO. Červené strmé plochy reprezentují zlomy kategorie 1, modré plochy zlomy kategorie 2 a tmavě zelené plochy zlomy kategorie 3. Růžové plochy vymezují rozsah tiského plutonu. Fialovou, okrovou a hnědou barvou jsou znázorněny permokarbonské sedimentární pánve; sytě růžová pak představuje lubenecký granit a tmavě zelená metamorfnní jednotky, převážně fylity

V rámci homogenních bloků navržených pro jednotlivé lokality byly dle podrobnějších kritérií schematicky graficky vyznačeny bezpečnostní obálky okolo zlomových indikací kategorie 1

(100 m vzdálenost) a 2 (50 m vzdálenost od zlomu), tím byla naznačena oblast potenciálně vhodná pro umístění UOS.

4.5.5.3 Nejistoty řešení ZL

Se stávajícími detailními 3D strukturně-geologickými modely je nutné pracovat jako s expertními konceptuálními odhady hloubkové geologické stavby, ne jako s přesným, natož úplným popisem geologické stavby do hloubky 1000 m. Současná verze návrhu homogenních bloků tedy není definitivní a bude nadále zpřesňována / měněna v závislosti na nově získávaných datech a modelech. Po provedení detailních výzkumů a následných průzkumů mohou být nalezeny i jiné bloky v rámci průzkumného území nebo dle případného budoucího aktualizovaného zadání i v jeho okolí.

Přes jednotnou metodiku zpracování nejsou modely jednotlivých lokalit shodně věrohodné. Liší se jednak kvalitou a podrobností geologického mapování povrchových partií, dále pak počtem a hloubkou vrtných prací, které jsou jediným přímým zdrojem informací o podpovrchovém průběhu horninových těles a výjimečně i zlomů. Věrohodnost modelů ovlivňují také přírodní faktory, zejména komplexita geologické stavby a odkrytost (množství skalních výchozů a mocnost platformních uloženin, které komplikují povrchové mapování a výzkumy). Pokud byla dostupná data dostatečně přesná, pak řešitelský tým konstruoval modely poblíž Zemského povrchu s přesností cca 100 m pro regionální, a cca 25 m pro detailní modely. Přesnost do hloubky rychle klesá, na každé lokalitě jinak úměrně množství a kvalitě dostupných dat. Modely dále z důvodu technických omezení SW MOVE, ve kterém byly vytvářeny, obsahují topologické chyby v řádu jednotek, ojediněle až prvních desítek metrů.

Jednotlivé lokality jsou však již nyní popsány na dostatečné odborné úrovni a v dostatečném detailu, aby bylo možné je vzájemně porovnat a zúžit jejich počet.

4.5.5.4 Návrh dalších prací

Pro obhajitelné zpřesnění homogenních bloků je stejně jako pro navazující bezpečnostní hodnocení zúženého počtu lokalit nutné ke stávajícím datům vyhodnotit aktuálně prováděné geofyzikální výzkumy a také realizovat dosud neprovedené invazivní průzkumné práce (hluboké vrty, rýhy apod.) s navazujícím geologickým, strukturním a hydrogeologickým výzkumem a průzkumem doplněným o vhodné metody DPZ a další příbuzné obory, jak je doporučeno v dokončované aktualizované verzi návrhu výzkumných a průzkumných prací na hypotetické lokalitě.

4.5.5.5 Výstupy ZL

BUKOVSKÁ Z., ŠVAGERA O., JELÉNEK J., KOCIÁNOVÁ L. (2015): Rešerše dostupných programů pro 3D strukturně geologické modelování. – MS SÚRAO, Technická zpráva, Praha.

ŠVAGERA O., FRANĚK J. (EDS) (2015): Rešerše dostupných archivních dat pro 7 zájmových území SÚRAO relevantních pro 3D strukturně geologické modely. 3D strukturně geologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště. – MS SÚRAO, TZ 12/2015. Praha.

BUKOVSKÁ Z., FRANĚK J. EDS (2017): Etapová zpráva 3D modely. – MS SÚRAO, TZ 119/2017, 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, ZZ 229/2018, Praha, 595 s.

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

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

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

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

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

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. – MS SÚRAO, Technická zpráva, Praha.

Technické zprávy k jednotlivým 3D modelům:

BUKOVSKÁ Z., ŠVAGERA O. (2018): Detailní strukturně-geologický 3D model kandidátské lokality Hrádek – MS SÚRAO, Technická zpráva, Praha.

FRANĚK J., PACHEROVÁ P. (2018): Detailní strukturně-geologický 3D model kandidátské lokality Magdalena. – MS SÚRAO, Technická zpráva, Praha.

FRANĚK J., RUKAVIČKOVÁ L., VERNER K., JELÉNEK J. (2018): Detailní strukturně-geologický 3D model kandidátské lokality Kraví hora. – MS SÚRAO, Technická zpráva, Praha.

JELÉNEK J., FRANĚK J. (2018): Detailní strukturně-geologický 3D model kandidátské lokality Čihadlo. – MS SÚRAO, Technická zpráva, Praha.

JELÍNEK J., ŽÁČEK V., LOJKA R., KŮRKOVÁ I., FRANĚK J. (2018): Detailní strukturně-geologický 3D model kandidátské lokality Čertovka. – MS SÚRAO, Technická zpráva, Praha.

ŠVAGERA O., FRANĚK J. (2018): Detailní strukturně-geologický 3D model kandidátské lokality Březový potok. – MS SÚRAO, Technická zpráva, Praha.

ŠVAGERA O., FRANĚK J. (2018): Detailní strukturně-geologický 3D model kandidátské lokality Horka. – MS SÚRAO, Technická zpráva, Praha.

3D modely

BUKOVSKÁ Z., ŠVAGERA O. (2018): Detailní strukturněgeologický 3D model kandidátské lokality Hrádek. 7 s. SÚRAO, Praha.

BUKOVSKÁ Z., ŠVAGERA O., JELÉNEK J., FRANĚK J. (2016): Regionální strukturně-geologický 3D model kandidátské lokality Hrádek. 15 s. SÚRAO, Praha.

- FRANĚK J., PACHEROVÁ P. (2018): Detailní strukturně-geologický 3D model kandidátské lokality Magdaléna. 19 s. – objednatel: Česká republika. SÚRAO, Praha.
- FRANĚK J., RUKAVIČKOVÁ L., VERNER K., JELÉNEK J. (2018): Detailní strukturně-geologický 3D model kandidátské lokality Kraví hora. 25 s. – objednatel: Česká republika – Správa úložišť radioaktivních odpadů.
- FRANĚK J. (2016): Regionální strukturně-geologický 3D model kandidátské lokality Magdaléna. SÚRAO, Praha.
- JELÉNEK J., FRANĚK J. (2016): Regionální strukturně-geologický 3D model kandidátské lokality Čihadlo. SÚRAO, Praha.
- JELÉNEK J., FRANĚK J. (2018): Detailní strukturně-geologický 3D model kandidátské lokality Čihadlo. 7 s., objednatel: Česká republika. SÚRAO, Praha.
- JELÉNEK J., ŠVAGERA O., BUKOVSKÁ Z., FRANĚK J. (2016): Regionální strukturně-geologický 3D model kandidátské lokality Čertovka. SÚRAO, Praha.
- JELÍNEK, J., ŽÁČEK, V., LOJKA, R., KŮRKOVÁ, I. (2018): Detailní strukturně-geologický 3D model kandidátské lokality Čertovka. SÚRAO, Praha.
- ŠVAGERA O., FRANĚK J. (2016): Regionální strukturně-geologický 3D model kandidátské lokality Horka. SÚRAO, Praha.
- ŠVAGERA O., FRANĚK J. (2018): Detailní strukturně-geologický 3D model kandidátské lokality Horka. SÚRAO, Praha.
- Švagera O., Franěk J. (2018): Detailní strukturně-geologický 3D model kandidátské lokality Březový potok. SÚRAO, Praha.
- ŠVAGERA O., JELÉNEK J., BUKOVSKÁ Z., FRANĚK J. (2016): Regionální strukturně-geologický 3D model kandidátské lokality Kraví hora. SÚRAO, Praha.
- ŠVAGERA O. (2016): Regionální strukturně-geologický 3D model kandidátské lokality Březový potok. SÚRAO, Praha.

Účelové geol. mapy 1:50.000

- BUKOVSKÁ Z., FRANĚK J., SOEJONO I., ŠVAGERA O., RUKAVIČKOVÁ L., KUNCEOVÁ E. (2018): Účelová geologická mapa kandidátské lokality Hrádek 1 : 50 000.. 3 s. SÚRAO, Praha.
- BURIÁNEK D., HRDLIČKOVÁ K., GRUNDLOCH J., FRANĚK J., KUNCEOVÁ E. (2018): Účelová geologická mapa kandidátské lokality Horka 1 : 50 000.. 21 s. SÚRAO, Praha.
- DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ B., FRANĚK J., PERTOLDOVÁ J., RUKAVIČKOVÁ L., KUNCEOVÁ E. (2018): Účelová geologická mapa kandidátské lokality Čihadlo 1 : 50 000.. 19 s SÚRAO, Praha.
- FRANĚK J., ŽÁČKOVÁ E., PACHEROVÁ P., KUNCEOVÁ E. (2018): Účelová geologická mapa kandidátské lokality Magdaléna 1 : 50 000. SÚRAO, Praha.
- FRANĚK J., VERNER K., BURIÁNEK D., KRYŠTOFOVÁ E., KUNCEOVÁ E. (2018): Účelová geologická mapa kandidátské lokality Kraví hora 1 : 50 000. SÚRAO, Praha.
- FRANĚK J., ŠVAGERA O., PACHEROVÁ P., MIXA P., SKÁCELOVÁ Z. (2019): Účelová tektonická mapa 1 : 25 000 lokality Magdaléna se zobrazením zlomů I. a II. kategorie pro potřeby hodnocení potenciálního území hlubinného úložiště RAO.. 1 s. SÚRAO, Praha.
- ŠVAGERA O., FRANĚK J., SOEJONO I., NAHODILOVÁ R., HOLEČEK J., PEŘESTÝ V., BUKOVSKÁ Z., KUNCEOVÁ E. (2018): Účelová geologická mapa kandidátské lokality Březový potok 1 : 50 000.. 23 s. SÚRAO, Praha.

4.5.6 HG modely horninového prostředí pro HÚ (PB-2014-ZL-S2393-011-HGModely)

Hlavní autoři: Milický M., Bayer J., Černý M., Jankovec J., Uhlík J., Polák M., (PROGEO), Královcová J., Říha J., Maryška J. (TUL), Trpkošová D., Grecká M. (ÚJV)

4.5.6.1 Cíl ZL

Cílem ZL HG modely horninového prostředí (HG modely) bylo na základě dostupných informací popsat a zhodnotit poměry proudění podzemní vody v horninových masivech 9 lokalit posuzovaných za účelem situování HÚ a tyto poměry vzájemně porovnat (získané výsledky byly porovnány v rámci širšího souboru informací (Havlová et al. 2018)).

Hydrogeologické modely byly, vedle modelů geologických a transportních, začleněny do skupiny popisných modelů lokalit (SDM). Popisné modely byly zpracovány za účelem archivace a analýzy průběžně doplňovaných informací o posuzovaných lokalitách.

4.5.6.2 Zhodnocení řešení projektu

Modelování proudění podzemní vody bylo realizováno na třech pracovištích (PROGEO, s.r.o., TUL a ÚJV Řež, a. s.) s využitím tří rozdílných softwarů (MODFLOW, verze USG, Flow123d verze 2.1.2 a FEFLOW (verze 6.0)). V první fázi projektu byly zpracovány modely v regionálním měřítku (pro 7 lokalit, s výjimkou EDU a ETE). Ve druhé fázi byly modely zpřesněny a upraveny (zjemněna výpočetní síť v okolí projektovaného HÚ, zadány aktualizované informace o kategorii zlomů i velikosti modelové infiltrace, pozice HÚ zadána dle dokončených projektů) a vznikly „detailní“ hydrogeologické modely pro všech 9 posuzovaných lokalit.

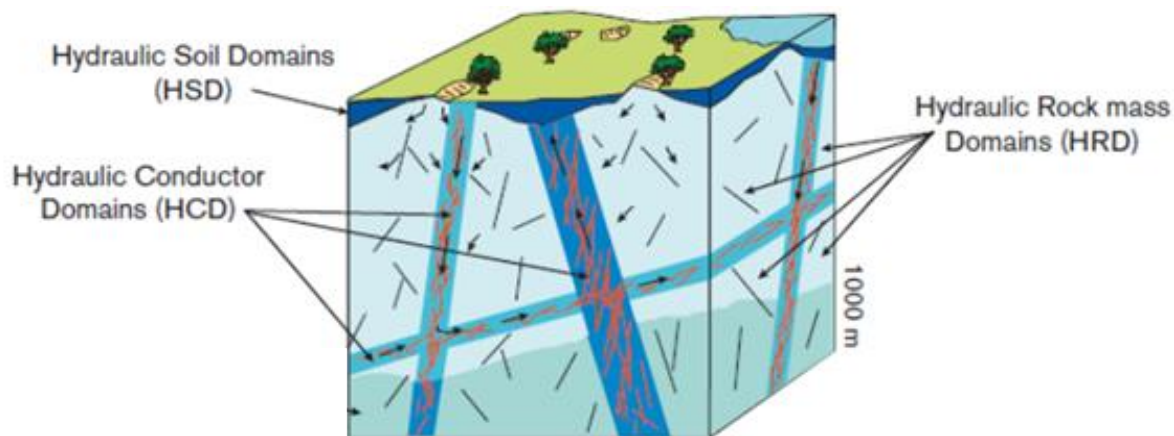
Vstupní data pro zpracování modelů zahrnovala geometrické údaje, okrajové podmínky, popis propustnosti horninového masivu a kalibrační data. Realizované hydrogeologické modely mají rozlohu 185-312 km², která je pro jednotlivé modely uvedena v Tab. 15. Modely jsou koncipovány jako bilančně uzavřené – přes okraj modelového území nedochází k proudění podzemní vody do/z okolního horninového prostředí. Průběh modelových hranic je proto veden především podél regionálních rozvodí (to snižuje nejistoty bilance modelů). Ve vertikálním směru odpovídají realizované hydrogeologické modely modelům geologickým a horninový masiv je v modelech jednotlivých lokalit zadán do úrovně 1,5 km pod střední úroveň terénu (v softwaru Flow123d do úrovně -700 m n.m.). Vertikálně je prostor modelu vždy rozdělen do vrstev (v jednotlivých softwarech 5-40 vrstev v závislosti na místě a zvoleném detailu řešení).

Zadané okrajové podmínky určují doplňování zásob podzemní vody (efektivní infiltraci) a drenáž podzemní vody do říční sítě (případně do důlních děl). Vceť povrchové vody do horninového prostředí z říční sítě není simulován. Báze modelové domény a rovněž boční stěny jsou, vzhledem ke zvolené koncepci modelů, zadány okrajovou podmínkou nulového přetoku kolmo k hranici modelu. Modelová infiltrace v jednotlivých lokalitách (Tab. 15) odpovídá specifikum vyhodnoceného podzemního odtoku (Krásný et al., 1982) a rozložením v ploše modelu odpovídá rozložení dlouhodobého srážkového normálu. Drenáž podzemní vody na všech lokalitách je simulována výhradně do říční sítě (výjimkou je lokalita Kraví hora,

kde je část podzemní vody drénována do zaplavených důlních děl). Úroveň říční sítě je zadána podle digitálního modelu terénu.

S ohledem na minimální znalost horninových masivů jednotlivých lokalit z hlediska propustnosti byl při zpracování hydrogeologických modelů použit koncept EPM, ve kterém je propustnost horninového masivu vyjádřena prostřednictvím koeficientů hydraulické vodivosti. Modelové domény všech posuzovaných lokalit jsou (shodně s přístupem SKB – Obr. 34) členěny na 3 podoblasti:

1. podoblast ovlivněná procesy přívodového zvětrání (mocnost přívodové zóny průměrně dosahuje vyšší desítky metrů);
2. podoblast přirozeně rozpukaného masivu (rozevření puklin v řádu μm ; střední vzdálenost puklinových systémů je předpokládána v metrech);
3. podoblast zlomových pásem (šířka intenzivního rozpukání podél zlomových linií dosahuje v modelových lokalitách až první stovky metrů).



Obr. 34 Schéma rozdělení modelové domény (SKB 2008)

V přívodové zóně (podoblast 1) je rozložení modelové hydraulické vodivosti podřízeno cíli simulovat volnou hladinu podzemí vody v souladu s hladinami archivovanými ve vrtné databázi ČGS-Geofond (mělce pod terénem). Tomu je přizpůsobeno zadání koeficientů hydraulické vodivosti, které je výsledkem procesu kalibrace.

Příslušnost modelových elementů k horninovým tělesům a poruchovým zónám (podoblast 2 a 3 viz výše) je v detailních hydrogeologických modelech zadána podle převzatých detailních 3D SG modelů lokalit (kap. 4.5.5). Modelová hydraulická vodivost je ve všech modelech zadána pomocí výrazu (4.5.6.-1), převzatého z práce Gustafson et Liedholm (1989):

$$K(z) = K_0 10^{\frac{-z}{c}} \quad (4.5.6.-1)$$

Modelová hydraulická vodivost $K(z)$ (m s^{-1}) klesá s hloubkou pod terénem z (m). K_0 je tzv. základní hydraulická vodivost horninového masivu (bez ovlivnění procesy přívodového zvětrání), která vstupuje do hydrogeologických modelů. Výchozí hodnoty parametrů K_0 byly pro jednotlivé horninové litotypy expertně odhadnuty pracovníky ČGS. Koeficient c reprezentuje vzdálenost, na níž koeficient hydraulické vodivosti poklesne o 1 řád. Ve všech detailních modelech byly uplatněny shodné parametry pro všechny lokality (podle výsledků kalibrace z lokality Kraví hora) $c = 675$ m. Shodně byla ve všech modelech zadána i základní hydraulická vodivost zlomů $K_0 = 1,0 \cdot 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$. V prostoru modelu byly definovány 3 kategorie poruchových zón (zlomy 1. – 3. kategorie dle klasifikace SKB; Andersson et al. 2000), které

se liší šířkou (100 m, 10 m a 1 m). Šířka poruchové zóny v modelech určuje příspěvek k celkové propustnosti masivu.

Ke kalibraci hydraulických modelů byla využita archivní data ČGS-Geofondu o měřených hladinách podzemních vod (především mělčí vrty, časově nesousledné, nerovnoměrně situované). Realizované detailní hydrogeologické modely dokumentují a poskytují informace o: 1) tlakovém poli proudění (úroveň hladiny podzemní vody), 2) směrech proudění podzemní vody (detailně ve vazbě na projektem určený prostor HÚ), 3) prostorové bilanci oběhu podzemní vody, 4) prostorové distribuci propustnosti horninového prostředí.

Podrobně jsou vstupní data, zadané okrajové podmínky, výsledky a výstupy detailních hydrogeologických modelů dokumentovány v pasportech pro jednotlivé lokality. Metodika zpracování detailních modelů včetně přijatých předpokladů je obsažena v závěrečné zprávě za ZL (Uhlík et al. 2018).

Hydrogeologické poměry na jednotlivých lokalitách byly posuzovány z hlediska dlouhodobé bezpečnosti HÚ podle následujících charakteristik (první 4 charakteristiky jsou definovány ve vyhl. SÚJB 378/2016 Sb. a v metodickém pokynu SÚRAO MP22v3; Vokál et al. 2017):

1. přítomnost zvodní v izolační části úložiště;
2. obtížnost vytvoření důvěryhodného hydrogeologického modelu;
3. rychlost proudění vody a propustnost horninového masivu:
 - i. v úrovni úložiště,
 - ii. podél trajektorií transportních cest.
4. identifikace a umístění drenážních bází v lokalitě;
5. vliv poruchových zón na proudění podzemní vody;
6. tlakové poměry proudění podzemní vody;
7. bilance průtoku podzemní vody oblastí HÚ.

Ad 1) V izolační části horninového prostředí (mimo přípovrchovou zónu) se souvislé zvodně vzhledem k záměru situovat HÚ do hornin krystalinika nevyskytují. Proudění podzemní vody v horninovém masivu probíhá pouze po vodivých puklinách (s intenzivnějším výskytem v oblasti poruchových zón). Podle tohoto kritéria nebylo možné jednotlivé lokality nijak rozlišit.

Ad 2) Obtížnost vytvoření důvěryhodného hydrogeologického modelu narůstá se složitější geologickou a strukturní stavbou a vyšší stupeň heterogenity (z hlediska počtu horninových typů i zlomové stavby) zvyšuje nároky průzkumných prací i nejistoty výsledků hydrogeologického modelu.

Ad 3) Pomalé proudění podzemní vody v horninovém masivu přímo v prostoru HÚ i v prostoru mezi HÚ a drenážními bázemi je jedním z předpokladů funkce horninového prostředí jako přirozené bariéry.

Ad 4) Primárním recipientem podzemní vody z prostoru HÚ budou sedimenty údolních niv a následně říční síť s regionálním drenážním účinkem. Počet úseků (délka) říční sítě, do nichž jsou podzemní vody z prostoru HÚ odvodněny, poskytuje informaci o rozptýlení potenciální kontaminace. Na základě předpokladů (SÚRAO) je vhodnější větší počet drenážních úseků říční sítě, který umožní větší míru rozptylu a větší snížení koncentrací radionuklidů.

- Ad 5) Poruchové zóny lokálního, a především regionálního rozsahu představují riziko vzhledem k možnosti preferenčního proudění v prostředí jinak velmi málo propustného horninového masivu. Preferenční proudění lze rovněž předpokládat v prostorech zaplavených důlních děl.
- Ad 6) Tlakové poměry proudění podzemní vody na lokalitách ovlivňují výrazné rozdíly v nadmořské výšce terénu s rozložením hladiny podzemní vody v přípovrchové vrstvě. Rizikovější jsou oblasti, kde k drenáži podzemní vody z úrovně HÚ může dojít přímo v nadloží HÚ (nulová odlehlost drenážního místa od okraje). HÚ je z hydrogeologického hlediska vhodné situovat mimo drenážní oblasti a v místech sestupného gradientu proudění podzemní vody z důvodu prodloužení délky transportních cest.
- Ad 7) Množství podzemní vody protékající prostorem projektovaného HÚ ovlivňuje mobilitu radionuklidů při advektivním transportu do biosféry.

Základní vybrané parametry modelu (plocha, infiltrace, počet litotypů) a všechny výše uvedené hydrogeologické charakteristiky vybrané pro hodnocení bezpečnosti HÚ jsou uvedeny v Tab. 15.

Nejvíce příznivé hydrogeologické podmínky pro bezpečnost HÚ byly nejčastěji vyhodnoceny pro lokalitu ETE. Příčinou je především absence zlomů první kategorie i malý výskyt zlomů kategorií nižších, homogenita propustnosti horninového masivu (dominuje pararula) a příznivější gradienty proudění (menší rychlosti proudění podzemní vody). Nepříznivá je možná přítomnost žil mramoru s předpokládanou vyšší hydraulickou vodivostí v izolační části horninového masivu a drenáž do jediného povodí – Vltavy a jejích levostranných přítoků (potenciálně v těsné blízkosti HÚ).

Převládající příznivé hydrogeologické podmínky byly vyhodnoceny i u lokalit Březový potok, Čihadlo a EDU. Lokalita Březový potok vykazuje nízkou propustnost masivu, malé rychlosti proudění a malý průtok v úrovni úložiště. Potenciálně méně příznivé jsou zejména drenážní charakteristiky (drenáž je soustředěnější, vyskytuje se i v blízkosti HÚ, v jehož ploše se může rozsáhleji vyskytovat vzestupná složka proudění podzemní vody). Na lokalitě Čihadlo příznivě vychází především charakteristika drenáže (značný rozptyl), nízká je i propustnost masivu. Zásadní nejistota je vázána na hydraulickou funkci lodhěřovského zlomu. Drenáž z prostorů HÚ vychází relativně blízko k HÚ, větší (v porovnání s ostatními lokalitami) vychází průtok podzemní vody prostorem úložiště. Lokalita EDU dobře splňuje požadavky na dominanci sestupné složky proudění v úložném prostoru HÚ, větší je vzdálenost drenážní báze od prostorů HÚ a malý je počet zlomů první a druhé kategorie. Parametry propustnosti horninového masivu a velikosti průtoku podzemní vody prostorem HÚ vychází spíše nepříznivě.

Téměř všechny posuzované hydrogeologické charakteristiky na lokalitě Horka vychází blízko středovému intervalu klasifikace (průměru). Mírně nadprůměrně (příznivější) lze hodnotit drenážní poměry (značný rozptyl), v porovnání s ostatními lokalitami vychází méně příznivě tlakové poměry, kdy horizontální vzdálenost drenáže od HÚ je nulová a pozice HÚ je v prostoru se značným podílem vzestupné vertikální složky proudění podzemní vody.

Na lokalitě Hrádek jsou méně příznivé parametry charakterizující drenážní báze, tlakové poměry proudění i velikost průtoku vody úložištěm. Příznivěji se jeví charakteristiky vlivu poruchových zón na proudění, propustnosti masivu a rychlosti proudění podzemní vody.

Komplikované poměry na lokalitě Kraví hora ovlivnily i hodnocení obtížnosti vytvoření modelu. Nejistoty a zvýšené nároky na posuzování lokality způsobuje přítomnost důlních děl. V hodnocení hydrogeologických poměrů jsou nejnepříznivější především množství a orientace poruchových zón, rychlosti proudění podzemní vody a propustnost horninového masivu. Příznivěji vychází posuzované charakteristiky průtoku úložištěm a tlakové poměry.

Hydrogeologické poměry na lokalitě Čertovka (při projektovém situování HÚ) nejvíce charakterizuje velmi soustředěná (nevhodná) drenáž v povodí Blšanky, větší je i velikost průtoku podzemní vody úložištěm. Ostatní hodnocené hydrogeologické charakteristiky jsou převážně průměrné.

Na lokalitě Magdaléna jsou méně příznivé drenážní poměry, bilance vody v prostoru úložiště a tlakové poměry. Ostatní charakteristiky vychází pouze jako průměrné.

Tab. 15 Přehled hydrogeologických charakteristik posuzovaných lokalit

	Březový potok	Čertovka	Čihadlo	Horka	Hrádek	Kraví hora	Magdaléna	EDU-Z	ETE-J
Plocha detailních modelů (km ²)	195	263	257	264	236	254	238	312	248
Průměrná modelová infiltrace (l s ⁻¹ km ⁻²)	3	2	3,2	2,5	4	2,5	2,5	1,9	1,5
Počet horninových litotypů v detailních mod.	15	15	7	13	7	23	14	10	9
Rychlost proudění podzemní vody:									
maximální z prostoru HÚ k drenáži (m rok ⁻¹)	0,2	0,8	0,5	0,6	0,5	0,7	0,9	0,6	0,2
maximální v úrovni úložiště (m rok ⁻¹)	0,2	0,6	0,4	0,6	0,3	1,2	0,3	0,5	0,2
Propustnost horninového masivu:									
maximální propustnost v prostoru HÚ (m s ⁻¹)	1,4 · 10 ⁻⁹	1,7E ⁻⁹	1,7 · 10 ⁻⁹	3,5 · 10 ⁻⁹	1,8 · 10 ⁻⁹	5,2 · 10 ⁻⁹	3,3 · 10 ⁻⁹	4,6 · 10 ⁻⁹	1,1 · 10 ⁻⁹
maximální propustnost v izolační část masivu do vzdálenosti 300 m od HÚ (m s ⁻¹)	5,3 · 10 ⁻⁹	5,3 · 10 ⁻⁹	4,9 · 10 ⁻⁹	9,6 · 10 ⁻⁹	4,9 · 10 ⁻⁹	1,3 · 10 ⁻⁹	9,3 · 10 ⁻⁹	1,3 · 10 ⁻⁹	2,1 · 10 ⁻⁹
Identifikace umístění drenážních bází v lokalitě:									
počet drenážních povodí	2	1	3	2	2	2	2	2	1
dominantní recipient (% plochy HÚ)	Březový p. (84%)	Ležecký p. (81%)	Řečice (45%)	Mlýnský p. (44%)	Hojkovský p. (74%)	Bobruvka (61%)	Smutná (83 %)	Roučovank a (32 %)	Strouha (62 %)
dominantní drenážní povodí (% plochy HÚ)	Březový p. (89%)	Blšanka (100%)	Řečice (60%)	Oslava (56%)	Jedlovský p. (90%)	Bobruvka (82%)	Smutná (89 %)	Rokytná (68 %)	Vltava (100 %)
Vliv poruchových zón na proudění podzemní vody									
maximální propustnost zón do 1 km od hranice HÚ (m s ⁻¹)	1,4 · 10 ⁻⁸	1,2 · 10 ⁻⁸	1,5 · 10 ⁻⁸	1,9 · 10 ⁻⁸	1,0 · 10 ⁻⁸	6,8 · 10 ⁻⁹	8,4 · 10 ⁻⁹	1,8 · 10 ⁻⁸	1,8 · 10 ⁻⁸
počet zón 1. řádu do vzdálenosti 1 km od hranice HÚ	3	0	1	4	0	12	0	0	0

	Březový potok	Čertovka	Čihadlo	Horka	Hrádek	Kraví hora	Magdaléna	EDU-Z	ETE-J
počet zón 2. řádu do vzdálenosti 1 km od hranice HÚ	6	4	10	10	8	40	6	10	2
počet zón ovlivňujících proudění mezi HÚ a drenáží	4	6	10	12	12	10	5	11	0
Tlakové poměry proudění									
drenážní báze- minimální horizontální vzdálenost od hranice HÚ (km)	0,14	0,1	0,1	0	0	0,3	0	0,5	0
sestupná vertikální složka proudění (% plochy HÚ)	53	87	75	63	53	80	47	74	82
Bilance množství podzemní vody:									
specifický průtok v prostoru HÚ ($l \cdot s^{-1} \cdot km^{-2}$)	$7,9 \cdot 10^{-3}$	$2,7 \cdot 10^{-2}$	$2,6 \cdot 10^{-2}$	$1,8 \cdot 10^{-2}$	$2,3 \cdot 10^{-2}$	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$2,2 \cdot 10^{-2}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$	$9,4 \cdot 10^{-2}$

4.5.6.3 Nejistoty řešení ZL

Nejistota zpracovaných modelů proudění podzemní vody je dána nedostatkem informací o geologických poměrech, a především o hydrogeologických charakteristikách horninového masivu v hloubce odpovídající projektům HÚ (rozpuštění, distribuce propustnosti horninového masivu a tlaku podzemní vody, informace o velikosti drenáže podzemní vody, jejím chemismu a stáří). Nedostatek vstupních dat byl v rámci dosavadních modelových prací (pro všechny lokality) překlenut zavedením shodných vstupních předpokladů, reprezentujících generalizovanou znalost podpořenou průzkumy analogických lokalit v ČR a v zahraničí.

4.5.6.4 Návrh dalších prací

Návrh pokračování modelových prací je zaměřen na metodickou část a vlastní realizaci modelů. Návrh hydrogeologického průzkumu nezbytného pro získání modelových vstupních a kalibračních dat je náplní samostatného projektu.

Modely proudění podzemní vody budou v dalších etapách výběru finální lokality využity především pro zpracování bezpečnostních analýz a porovnání vhodnosti lokalit situovat HÚ. V nadcházejících etapách budou modely zpracovávány:

- v různých měřítkách (regionální a detailním měřítko pro HÚ a pro prostor UOS);
- v rozdílných principech popisu horninového prostředí (EPM, DFN, kombinovaný přístup, stochastické modely);
- ve více řešitelských týmech za účelem výsledky validovat při uplatnění rozdílných softwarů.


Regionální modely proudění podzemní vody zůstanou základním podkladem pro posuzování izolačních schopností horninového masivu (geosféry), ale budou zásadně aktualizovány tak, aby obsáhly maximální množství nově zjištěných informací o hydrogeologických poměrech lokalit. Detailní modely pro prostor HÚ, nebo jen prostor UOS (a rovněž modely pro blízké pole interakcí směřující k prokazování účinnosti inženýrských bariér), budou z regionálních (a detailních) modelů přebírat okrajové podmínky.

Kromě průběžné aktualizace modelů založených na EPM budou simulace proudění podzemní vody realizovány v konceptu DFN, který více postihuje fyzikální podstatu proudění v rozpukaném skalním prostředí (propustnost určuje konektivita a parametry puklinové sítě, model poskytuje informaci o smáčeném povrchu). DFN modely budou realizovány především pro detailní popis proudění v blízkém okolí HÚ. V regionálním měřítku bude u DFN modelů puklinová síť v okrajových partiích modelu schematizována nebo budou oba principy (EPM a DFN) selektivně kombinovány. Nejistoty vzniklých modelů budou analyzovány především s využitím metodik stochastického přístupu zadání vstupních dat propustnosti horninového masivu.

V souvislosti s komplexním prokazováním bezpečnosti bude nutné postupně do simulací zařadit změny faktorů ovlivňujících poměry proudění podzemní vody (změny klimatických poměrů; denudace terénu, změny říční sítě, odvodnění při stavbě a provozu HÚ).

4.5.6.5 Výstupy ZL

- BAIER J., KRÁLOVCOVÁ J., UHLÍK J., MILICKÝ M., GVOŽDÍK L., CHUDOBA J., ŘÍHA J., RUKAVIČKOVÁ L. (2018): Hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště. Pasport detailního modelu – lokalita Hrádek. – MS SÚRAO, TZ 341/2018, Praha.
- BAIER J., KRÁLOVCOVÁ J., UHLÍK J., MILICKÝ M., GVOŽDÍK L., CHUDOBA J., ŘÍHA J., RUKAVIČKOVÁ L. (2018): Hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště. Pasport detailního modelu – lokalita Březový potok. – MS SÚRAO, TZ 340/2018, Praha.
- ČERNÝ M., KRÁLOVCOVÁ J., UHLÍK J., MILICKÝ M., GVOŽDÍK L., CHUDOBA J., ŘÍHA J., RUKAVIČKOVÁ L. (2018): Hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště. Pasport detailního modelu – lokalita Čertovka – MS SÚRAO TZ 343/2018, Praha.
- ČERNÝ M., KRÁLOVCOVÁ J., UHLÍK J., MILICKÝ M., GVOŽDÍK L., CHUDOBA J., ŘÍHA J., RUKAVIČKOVÁ L. (2018): Hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště. Pasport detailního modelu – lokalita Magdaléna – MS SÚRAO, TZ 335/2018 Praha.
- JANKOVEC J., KRÁLOVCOVÁ J., UHLÍK J., MILICKÝ M., GVOŽDÍK L., CHUDOBA J., ŘÍHA J., RUKAVIČKOVÁ L. (2018): Hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště. Pasport detailního modelu – lokalita Dukovany. – MS SÚRAO, TZ 338/2018, Praha.
- JANKOVEC J., KRÁLOVCOVÁ J., UHLÍK J., MILICKÝ M., GVOŽDÍK L., CHUDOBA J., ŘÍHA J., RUKAVIČKOVÁ L. (2018): Hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště. Pasport detailního modelu – lokalita Temelín. – MS SÚRAO, TZ 339/2018, Praha.
- POLÁK M., KRÁLOVCOVÁ J., GRECKÁ M., UHLÍK J., MILICKÝ M., GVOŽDÍK L., CHUDOBA J., ŘÍHA J., RUKAVIČKOVÁ L. (2018): Hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště. Pasport detailního modelu – lokalita Čihadlo. – MS SÚRAO, TZ 342/2018, Praha.
- UHLÍK J., KRÁLOVCOVÁ J., TRPKOŠOVÁ D., BAIER J., BALVÍN A., POLÁK M., ŘÍHA J., ŠKARYDOVÁ I., (2015): Hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště, Rešerše zahraničních přístupů, metodika a koncepce řešení, Průběžná zpráva. – MS SÚRAO, TZ 3/2015, Praha.
- UHLÍK J., ČERNÝ M., BAIER J., MILICKÝ M., POLÁK M., GVOŽDÍK L., KRÁLOVCOVÁ J., GRECKÁ M., RUKAVIČKOVÁ L. (2016): Regionální hydrogeologické modely lokalit. – MS SÚRAO, TZ 100/2017, Praha.
- UHLÍK J., KRÁLOVCOVÁ J., BAIER J., MILICKÝ M., GVOŽDÍK L., CHUDOBA J., ŘÍHA J., RUKAVIČKOVÁ L. (2018): Hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště. Pasport detailního modelu – lokalita Kraví hora. – MS SÚRAO, TZ 336/2018, Praha.
- UHLÍK J., KRÁLOVCOVÁ J., GRECKÁ M., MILICKÝ M., GVOŽDÍK L., CHUDOBA J., ŘÍHA J., TRPKOŠOVÁ D., RUKAVIČKOVÁ L. (2018): Hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště. Pasport detailního modelu – lokalita Horka. – MS SÚRAO, TZ 337/2018, Praha.
- UHLÍK J., MILICKÝ M., GVOŽDÍK L., POLÁK M., ČERNÝ M., KRÁLOVCOVÁ J., GRECKÁ M., RUKAVIČKOVÁ L. (2018): Detailní hydrogeologické modely lokalit. Závěrečná zpráva – MS SÚRAO, ZZ 323/2018, Praha.
- UHLÍK J., MILICKÝ M., GVOŽDÍK L., POLÁK M., ČERNÝ M., KRÁLOVCOVÁ J., GRECKÁ M., RUKAVIČKOVÁ L. (2018): Final Detailed 3D Groundwater Flow Models of Potential Deep Repository Sites. Final report. – MS SÚRAO, ZZ 323/2018/ENG, Praha.

 SÚRAO	Závěrečná zpráva projektu Výzkumná podpora pro bezpečnostní hodnocení HÚ	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 462/2020

4.5.7 Příprava experimentů v PVP Bukov (PB-2015-ZL-S0655-016-BukovExperimenty)

4.5.8 Plán experimentů PVP Bukov pro podporu bezpečnostního rozboru lokality Kraví hora (PB-2016-ZL-U2686-033-PřípravaBukov)

Oba zadávací listy byly řešeny v úzké a vzájemné posloupnosti a jsou tedy hodnoceny společně.

Hlavní autoři: Havlová V., Dobrev D., Večerník P., Zuna M. (ÚJV), Rukavičková L., Franěk J., Verner K. (ČGS), Staš L. (ÚGN), Pacovský J. (CEG), Sosna K. (SG Geotechnika), Hokr M., Černík M. (TUL), Milický M., Uhlík J. (Progeo), Špaček P., Mikeš J. (Chemcomex)

4.5.8.1 Cíl ZL

Podzemní výzkumné pracoviště Bukov lokalizované v hloubce 600 m pod povrchem (PVP Bukov) slouží jako testovací lokalita pro hodnocení chování hornin kandidátních lokalit v hloubce odpovídající předpokládané hloubce hlubinnému úložišti do doby, než bude vybrána finální lokalita a vybudována konfirmační podzemní laboratoř v této lokalitě. Cílem tohoto projektu bylo navrhnout a na koncepční úrovni připravit experimenty, které umožní

- upřesnění geologické charakteristiky podzemního díla;
- vyzkoušet metody dlouhodobého monitoringu procesů probíhajících v hloubce úložiště;
- testovat modely transportu radionuklidů v puklinovém prostředí hlubinného úložiště;
- testovat vliv horninového prostředí v hloubce úložiště na změny vlastností uvažovaných inženýrských bariér;
- testovat vznik a vývoj EDZ a EdZ v metamorfovaných horninách v hloubce úložiště.

Navazující ZL (ZL Plán experimentů PVP Bukov pro podporu bezpečnostního rozboru lokality Kraví hora) měl za cíl vytipovat experimenty, které jsou pro prokázání bezpečnosti klíčové, ty měly být geometricky umístěny v PVP a rámcově odhadnuta jejich finanční náročnost. Současně mělo být vypracováno zdůvodnění těchto experimentů z hlediska bezpečnostního rozboru pro lokalitu Kraví hora a pro aktuální fázi výběru lokality.

4.5.8.2 Zhodnocení řešení projektu

Vybudování výzkumného pracoviště Bukov a implementace zvolených monitorovacích, výzkumných a experimentálních prací představuje významný počín směrem k přesunu ke sledování jevů a procesů v předpokládaných podmínkách HÚ VJP a RAO. Pro tyto účely budou vybrány pouze ty aktivity, které budou přinášet odpovídající data a argumenty pro hodnocení bezpečnosti HÚ či výrazným způsobem podpoří vývoj postupů a metodik, využitelných následně ve vlastním HÚ, a to až do doby, než bude vybrána finální lokalita a vybudována konfirmační podzemní laboratoř v této lokalitě.

Ve výstupu Havlová et al. (2015a) byl předložen návrh monitorovacích, výzkumných a experimentálních prací, rozdělených na tyto oblasti:

1. Upřesnění geologické a hydrogeologické charakteristiky podzemního díla (prostory podzemní laboratoře a přístupového překopu)

Navrhované práce naváží na geologickou charakteristiku lokality, provedených v již ukončených projektech. Práce budou zahrnovat podrobný popis litologické variability, strukturních dat a popis duktilních, křehce-duktilních a zejména křehkých struktur zastižených podzemním dílem. Dále budou obsahovat hydrogeologickou a hydrochemickou charakteristiku zvodnělých křehkých struktur a podzemních vod.

2. Testování metod dlouhodobého monitoringu procesů probíhajících v hloubce úložiště.

V této oblasti bude výzkum a plánované experimenty zaměřeny na dlouhodobý monitoring procesů v podzemní laboratoři. Půjde zejména o:

- dlouhodobý monitoring hydrogeologických poměrů;
- monitoring změn napětí a změn chování a charakteru podzemního díla v čase;
- monitoring makro- a mikro-seismicity;
- monitoring případných posunů na vrtech;
- geofyzikální monitoring se zaměřením na testování metodik na ověření homogenity horninového masivu;
- monitoring mikrobiologické kontaminace a postupného osidlování prostředí mikroorganismy.

3. Testování modelů proudění podzemní vody a transportu radionuklidů v puklinovém prostředí hlubinného úložiště

Cílem těchto prací je pomocí různých technik a přístupů testovat modely transportu prvků v puklinovém prostředí se zohledněním možné difúze do horninové matrice.

Testování bude využívat:

- hydrodynamické testy na zlomech;
- hodnocení pomocí hydraulického modelu;
- migračních experimentů s více vrty (advektivní transport) a jedním vrtem (difúze do matrice, konektivita puklinové sítě);
- určení stáří a původu podzemních vod;
- Různých transportních modelů pro posouzení jejich použitelnosti a k vyhodnocení samotných experimentů

4. Testování vlivu horninového prostředí v hloubce úložiště na změny vlastností uvažovaných inženýrských bariér.

Cílem těchto prací bude sledování vlivu reálných podmínek horninového masivu, jež přibližně odpovídají podmínkám HÚ, na materiály inženýrských bariér. Provedeny budou zejména komplexní experimenty, které umožní sledování několika jevů najednou (koroze materiálů úložného obalového souboru – změny bentonitu v reálných podmínkách – vliv mikrobiální činnosti). Půjde o experimenty:

- zaměřené na korozi (korozní sondy);

- experiment typu Mock-Up;
- interakční experiment cement – bentonit.

Kromě těchto experimentů bude sledován vliv mikrobiálních kolonií na vlastnosti bentonitu a cementu a na míru koroze materiálů ukládacího obalového souboru v podmínkách *in-situ*.

5. Testování vzniku a vývoje EDZ a EdZ v metamorfovaných horninách v hloubce HÚ

Cílem je sledování vzniku EDZ v čase tak, aby byl podchycen její další vývoj ve vztahu k různým parametrům (reologie masivu, změny způsobené teplotním zatížením, odvodnění masivu atd. V této oblasti byla představena nejširší škála prací, od geofyzikálních metod po hydraulické testování či umístění tenzometrických svorníků až po využití geotechnické klasifikace horninového masivu.

Kromě návrhu vlastních výzkumných prací jsou u každé aktivity uvedeny podmínky a požadavky pro implementaci daného programu. Obdobně jsou v poslední kapitole textu specifikovány obecné podmínky pro zavedení experimentálního programu. Tato zpráva byla revidovaná NAGRA a opravená dle jejich připomínek.

Na základě zprávy Havlová et al. (2015a) pak byly identifikovány potenciální experimentální, technické a výzkumné práce, významné z hlediska poskytnutí informací pro hodnocení bezpečnosti lokality Kraví hora, případně pro doplnění informací o geologickém prostředí PVP Bukov, testování metodik a postupů a získání dat (Havlová et al. 2015b).

Práce byly rozděleny na práce, doplňující základní charakteristiku a popis PVP Bukov, monitoring a vybrané experimenty. Ke každé aktivitě bylo zpracováno odůvodnění příspěvku k hodnocení bezpečnosti HÚ obecně či hodnocení bezpečnosti pro potenciální umístění HÚ v lokalitě Kraví hora. Kromě návrhu vlastních výzkumných prací jsou u každé aktivity uvedeny podmínky a požadavky pro implementaci daného programu. Obdobně jsou v poslední kapitole textu specifikovány obecné podmínky pro zavedení experimentálního programu. Je třeba si uvědomit, že práce v důlním díle je náročná, a to jak z hlediska technického, tak z hlediska nároků na pracovníky. Současně je nutno přihlídnout k fungování vlastního důlního díla a přizpůsobit tomu i plánování a přípravu prací.

V oblasti Charakterizace podzemního díla byly zpracovány podklady pro práce, doplňující charakteristiky PVP Bukov, včetně mikrobiálního osídlení, pro hydrodynamické testy ve vrtech, popisující hydraulické charakteristiky hornin a hydraulické pole PVP a doplňující geofyzikální práce. V oblasti, věnované dlouhodobému monitoringu byly navrženy postupy dlouhodobého hydrogeologického monitoringu, monitoringu změn napětí, seismicity, a mikrobiální kontaminace. Z experimentů v Technické zprávě SÚRAO 06/2015 (Havlová et al, 2015a) byly zvoleny práce a experimenty, kterou jsou proveditelné v následujících 2 letech a mohou přinést první data do 2 let od zahájení prací. Z těchto prací to jsou migrační stopovací zkoušky s více vrty, dlouhodobý difúzní experiment, stopovací zkouška pro zjištění konektivity puklinové sítě, určení stáří podzemních vod, experiment sledující korozi materiálů, experiment sledující vliv vzájemné interakce materiálů inženýrských bariér a experiment či spíše sekvence prací, sledující EDZ v podzemním díle.

Pro každý experiment bylo navrženo umístění do prostoru PVP Bukov na základě expertních znalostí a zkušeností řešitelského týmu, znalosti geologických a hydrogeologických poměrů v PVP Bukov a technických parametrů experimentů (Havlová et al. 2015b).

4.5.8.3 Nejistoty řešení ZL

Implementace experimentálního programu je však podmíněna celou řadou faktorů, které je nutno brát v potaz ještě před výběrem experimentálních prací. Zde jsou vyjmenovány ty, které kolektiv autorů shledává za významné:

- Vybudování podpůrného povrchového pracoviště, které by zajišťovalo prostor pro přípravu, sestavení či úpravy sestav pro experimentální aparatury v podzemí či provádění podpůrných laboratorních experimentů či měření. Celou řadu činností nelze provádět ve ztížených podmínkách důlního díla.

Pracoviště by mělo sestávat z:

- o mechanické dílny;
- o přípravný vzorků, zařízení a sestav;
- o geotechnické laboratoře;
- o chemické laboratoře s vybavením a přístrojovou technikou odpovídající prováděným aktivitám.
- Radiochemické laboratoře alespoň na úrovni sledovaného pásma v případě použití radiostopovačů při experimentálních pracích; s odpovídajícím vybavením a přístrojovou technikou.
- Vybudování podpůrného místního odborného týmu, který bude zajišťovat práci v důlním díle, přípravu a chod (některých) experimentálních prací a monitorovacích aktivit.
- Zajištění fungujícího systému práce v důlním díle (plánování, systém farání, zajištění možnosti fárat šachtou Bukov bez nutnosti transportu z další části důlního díla apod.)
- Plánování prací.
- Zajištění neovlivnění jednotlivých experimentů (plánování, umístění, průběh prací apod.).
- Vytvoření erudovaného týmu dodavatelů pro zvolené práce.
- Aktivní součinnost podniku DIAMO.
- Podpůrný laboratorní program a program modelování (zmíněno mnohokrát výše).

4.5.8.4 Návrh dalších prací

Dalšími kroky pro implementaci navržených prací je jejich zapracování do experimentálního plánu PVP Bukov a zpracování podrobného plánu provedení u každého jednotlivého experimentu. Práce musí být v souladu se Střednědobým plánem výzkumu a vývoje 2015–2025 (Pospíšková, Vokál, Vondrovic a kol. 2015)

4.5.8.5 Výstupy ZL

HAVLOVÁ V., RUKAVIČKOVÁ L., STAŠ L., PACOVSKÝ J., SOSNA K., HOKR M., ČERNÍK M., ŠPAČEK P., MIKEŠ J., MILICKÝ M. (2015a): Příprava experimentů v PVP Bukov. – MS SÚRAO, TZ 06/2015, Praha.

HAVLOVÁ V., DOBREV D., VEČERNÍK P., ZUNA M., RUKAVIČKOVÁ L., FRANĚK J., VERNER K., ČERNÍK M., STAŠ L., MILICKÝ M. (2015b): Plán experimentů PVP Bukov pro podporu bezpečnostního rozboru lokality Kraví Hora. – MS SÚRAO, TZ 09/2015, Praha.

4.5.9 Příprava geochemického modelu úložiště (PB-2016-ZL-S0626-027-Geochemie)

Hlavní autoři: Červinka, R., Gondolli, J., Klajmon, M. (ÚJV), Rukavičková, L. (ČGS), Vencelides, Z. (OPV), Zeman, J. (MUNI)

4.5.9.1 Cíl ZL

Jedním ze zásadních kritérií pro výběr lokality hlubinného úložiště jsou vhodné geochemické a retenční vlastnosti horninového masivu potřebné pro splnění bezpečnostních funkcí horninového prostředí. Cílem prací je v první fázi shrnutí dostupných dat o geochemii kandidátních lokalit a jejich předpokládaném vývoji a vytvoření komplexních geochemických modelů pro všechny fáze vývoje úložiště v horizontu statisíců let, zohledňující všechny důležité jevy, procesy a události včetně vlivu inženýrských bariér a dalších konstrukčních prvků. Požadavek na geochemický model lokality je rovněž zahrnut v legislativě. Vyhlášky SÚJB č. 378/2016 Sb. o umístění jaderného zařízení, zejména §18 odst. 4, kde charakteristikou vlastností území k umístění jaderného zařízení, při jejímž dosažení je umístění hlubinného úložiště zakázáno, je písm. b) nemožnost vytvoření:

- Geomechanických a geochemických modelů území k umístění jaderného zařízení

Cílem dílčího projektu byla prvotní studie geochemického vývoje HÚ na vybrané lokalitě Kraví hora (Bukov) a to zejména z důvodu dostatečné dostupnosti vstupních dat. Studie zahrnuje:

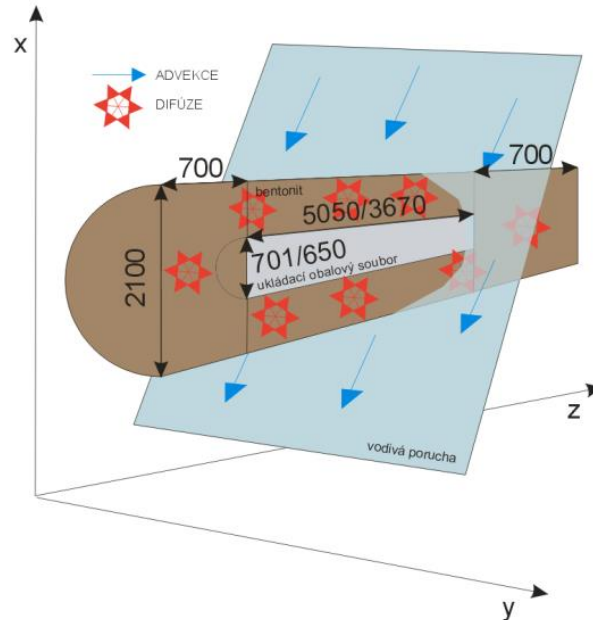
- Celkový koncept řešení, definici hlavních procesů a jevů v průběhu vývoje HÚ vedoucích k disturbanci geochemických podmínek
- Definici vstupních dat a sledovaných parametrů na základě rešerše, archivních dat a expertního posouzení
- Definici modelových parametrů, výpočet dílčích geochemických úloh
- Sestavení a otestování modelu reakčního transportu na definované části úložného prostoru

4.5.9.2 Zhodnocení řešení projektu

Studie geochemického vývoje HÚ se zaměřila na vybranou lokalitu Kraví hora (Bukov) a skládala se z několika kroků:

- Nejdříve byl definován celkový koncept řešení, definovaly se hlavní procesy a jevy v průběhu vývoje HÚ vedoucí k disturbanci geochemických podmínek, které zahrnuje:
 - saturaci bentonitové inženýrské bariéry;
 - spotřebu kyslíku;
 - tepelnou fázi;
 - Vliv korozních produktů;
 - dopad permafrostu.
- Byly definovány vstupní data a sledované parametry na základě rešerše, archivních dat a expertního posouzení. Autoři se snažili maximálně reflektovat data z lokality Kraví hora (Bukov) a použít dostupná data pro české kandidátní materiály (těsnící bentonitový materiál)

- Na základě identifikace hlavních procesů a jevů vedoucích nejen k disturbanci geochemických podmínek byly sestaveny dílčí geochemické modely, které následně sloužily jako vstup do modelu reakčního transportu
- Byl sestaven 1D a 2D model reakčního transportu na definované části úložného prostoru (viz Obr. 35).



Obr. 35 Schematický obrázek části úložného prostoru se superkontejnerem a vodivou poruchou, která protíná ukládací vrt. Na vodivé poruše (puklina) se předpokládá jako dominantní transportní proces advekce, v případě bentonitu je hlavním transportním procesem difúze. Koncept a rozměry dle ARP (2011) pro dva odlišné UOS s VJP (VVER 440 a VVER 1000)

Pro geochemické (reakční) modelování byly použity dva geochemické programy, The Geochemist's Workbench (databáze thermo.com.V8.R6+.tdat) a geochemický program PhreeqC, verze 3 (databáze llnl.dat). Modelování reakčního transportu v 1D a 2D bylo prováděno za pomoci softwaru PHAST verze 3.3.

Dílčí geochemické modely řešily zejména:

- **Ověření rovnováhy mezi podzemní vodou a minerály horniny/pukliny** – většina minerálů, a hlavně ty důležité (kalcit, křemen, albit, K-živce), jsou ve vodách SGW2 a SGW3 přesyceny. Tento výsledek je poměrně častým jevem. Složení podzemních vod bývá vůči primárním minerálům vyvřelých a metamorfovaných hornin přesycené. Příčinou je, že u většiny silikátových a aluminosilikátových minerálů je rozpouštění mnohastupňovým procesem s celou řadou meziproduktů s odlišnou konstantou stability.
- **Chemické složení bentonitové pórové vody** – byly spočítáno složení modelových pórových bentonitové vod v kombinaci bentonit BaM a podzemní voda SGW2 nebo SGW3 za oxických i anoxických podmínek.
- **Změnu chemického složení podzemní vody při přechodu z oxidačních do redukčních podmínek** – na základě reálných analýz ovlivněných (oxidací) a neovlivněných podzemních vod z lokality Kraví hora / PVP Bukov a základních oxidačně-redukčních reakcí v krystalickém prostředí bylo provedeno jejich modelování. Bylo

dosaženo dobrého souladu mezi modely a reálnými podzemními vodami zájmové lokality pro vzájemné poměry hlavních kationů a anionů a potvrzen i stejný trend vývoje hodnot pH v průběhu přechodu horninového prostředí do redukčních podmínek. Ukázalo se, že výsledky jsou rovněž v dobrém souladu s vyhodnocením vývoje složení podzemních vod na uzavřených a zatopených ložiscích. Závěry je možné shrnout takto:

- Po uzavření a zatopení hlubinného úložiště dojde v oblasti interakce horninového prostředí a podzemních vod s atmosférou v průběhu zhruba jednoho roku k dvoj až trojnásobnému zvýšení koncentrace rozpuštěných látek a některých složek podzemních vod (sířany, železo, mangan), hodnoty pH se změny jen nevýznamně.
- V průběhu prvních desítek let koncentrace výrazně poklesnou a v průběhu prvních stovek let se obnoví původní prostředí, které v oblasti hlubinného úložiště panovalo před jeho otevřením.
- **Model chemického složení podzemní vody v období po permafrostu** – bylo připraveno simulované složení podzemních vod SGW2 a SGW3 naředěné odtávající čistou vodou z permafrostu s $\log p_{\text{CO}_2} = -3,2$ v poměru 1:1.
- **Model šíření korozních produktů** – zvýšené hodnoty pH a koncentrace Fe lze v modelových buňkách bentonitu blíže korodujícímu železu zaznamenat již po prvních 100 letech od započetí koroze. Po 1 000 letech je změnami těchto parametrů ovlivněn bentonit již v celé délce. V čase 100 tisíc let jsou již hodnoty parametrů napříč bariérou srovnané (pH = 8,9). E_h pórové vody velmi rychle klesá a již po 100 letech je oproti počáteční hodnotě výrazně sníženo ve všech modelových buňkách bentonitu (ustálení na -600 mV). Pro model je velmi důležité zahrnutí povrchových komplexačních reakcí.
- **Úpravu vstupních dat pro model reakčního transportu** – modelové vody vycházející z dílčích geochemických modelů musely být pro potřeby reakčně-transportního modelování částečně zjednodušeny, aby nedocházelo k výpočetním oscilacím a nestabilitě výpočetního programu. Modely byly připraveny jako rovnovážné a nasycené vůči zvoleným minerálním fázím. V rámci přípravy modelů bylo prověřeno chování vod při jejich vzájemném mísení v oxických a anoxických podmínkách a provedena jejich úprava do tvaru vhodného pro zhotovení modelů reakčního transportu.

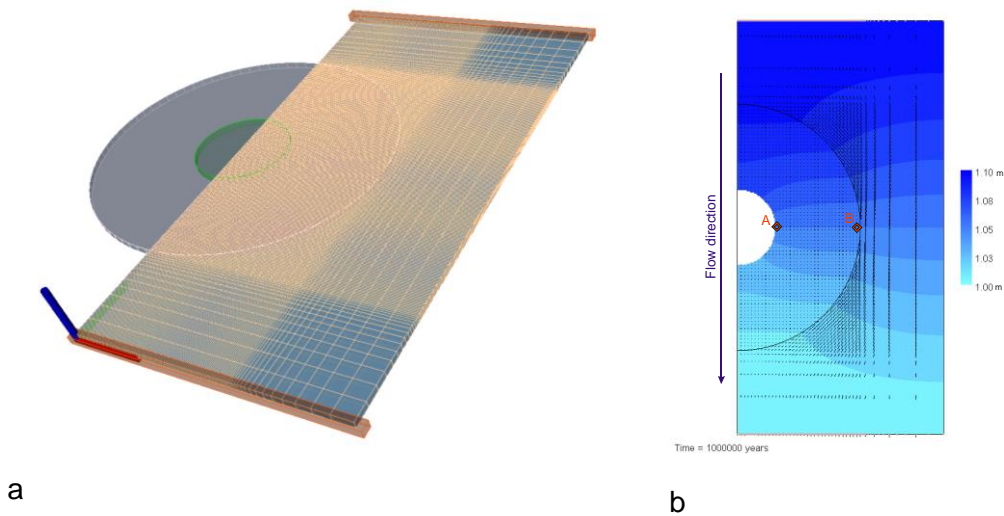
Model reaktivního transportu se zaměřil na:

Zjednodušený model reaktivního transportu zájmových složek v definované části úložiště, představující puklinu s proudící podzemní vodou, protínající ukládací vrt s uloženým superkontejnerem. Modely reaktivního transportu byly sestaveny ve zjednodušené (1D a 2D) geometrii (Obr. 36) pro šest různých variant:

- 1) podzemní voda SGW2 + bentonitová pórová voda za oxických podmínek;
- 2) podzemní voda SGW2 + bentonitová pórová voda za anoxických podmínek;
- 3) podzemní voda SGW2 / naředěná voda SGW2 tajícím permafrostem + bentonitová pórová voda za anoxických podmínek;
- 4) podzemní voda SGW3 + bentonitová pórová voda za oxických podmínek;
- 5) podzemní voda SGW3 + bentonitová pórová voda za anoxických podmínek;
- 6) podzemní voda SGW3 / naředěná voda SGW3 tajícím permafrostem + bentonitová pórová voda za anoxických podmínek.

Použitý přístup umožnil zvýraznit, identifikovat a po kvalitativní stránce popsat procesy, které budou probíhat na rozhraní bentonitového tlumicího materiálu superkontejneru a pukliny s proudící podzemní vodou. V modelech byly zahrnuty transportní procesy (difúze a advekce)

a hydrogeochemické interakce, zahrnující rozpouštění a srážení vytipované sady minerálních fází a iontovýmenné reakce na povrchu smektitu.

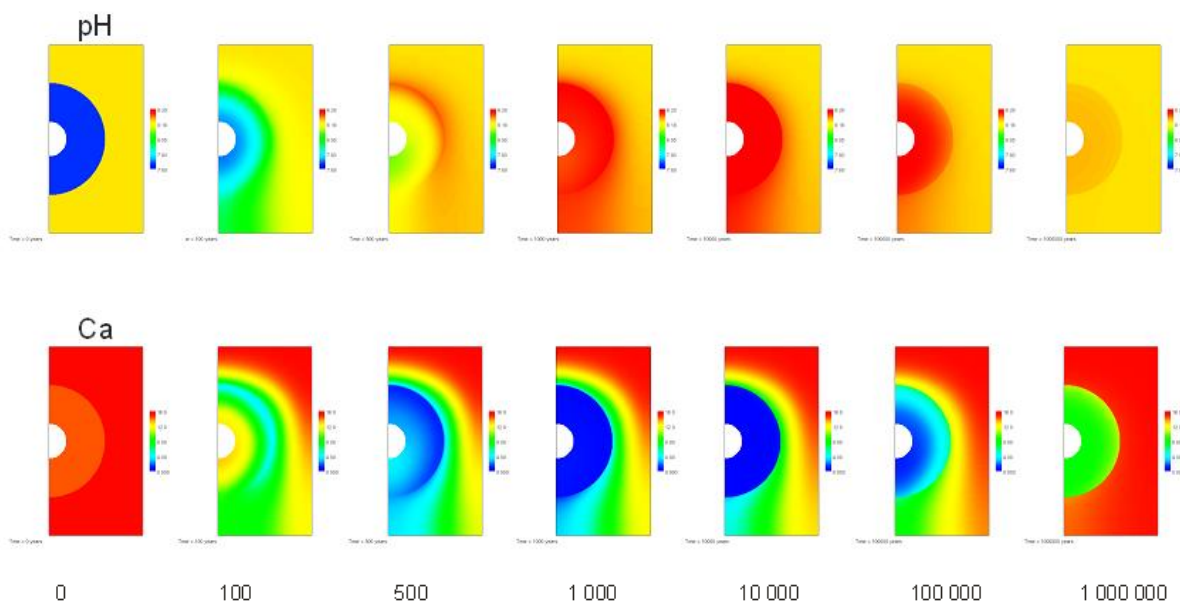


Obr. 36 Model reaktivního transportu ve 2D geometrii, a) modelová 2D doména, b) tlakové výšky v modelové doméně s naznačeným směrem toku a pozicemi pozorovacích bodů A a B

Z výsledků modelových simulací vyplývá, že všechny varianty modelového řešení je možné charakterizovat pomocí stejné skupiny procesů. V puklině bude dominantním procesem proudění podzemní vody a advektivní transport rozpuštěných složek, v prostoru bentonitového tlumicího materiálu bude docházet k difúzi, výměně kationtů na povrchu smektitu a srážení a rozpouštění sekundárních minerálních fází. V krátkých časech (řádově desetitisíce let) budou převládat transportní procesy (difúze), jako důsledek vysokého koncentračního gradientu mezi podzemní vodou v puklině a pórovou vodu bentonitového tlumicího materiálu. V delších časech (statisíce let) budou převládat změny obsazení iontoměniče na povrchu smektitu a v omezené míře rozpouštění a srážení minerálních fází. Množství rozpuštěného kaolinitu je i po 1 miliónu let menší, než 1 % výchozího obsahu. I v případě, kdy jsou výchozí roztoky v rovnováze, nebo nenasycené vzhledem k modelovým minerálním fázím, v průběhu simulovaného období dochází ve všech případech v prostoru bentonitového tlumicího materiálu k přesycení roztoku vůči goethitu, ojediněle i vůči kalcitu. Přesycení pórového roztoku vůči kalcitu je důsledkem lokálního zvýšení koncentrace vápníku, ke kterému dochází při vytěšňování tohoto kationtu z povrchu smektitu. Rozdíly mezi jednotlivými variantami modelového řešení vycházejí primárně z různého počátečního složení pórového roztoku bentonitového tlumicího materiálu a tomu odpovídajícímu počátečnímu obsazení iontoměniče na povrchu smektitu. V reálném systému bude oproti prezentovaným výsledkům modelů dosah změn ovlivnění bentonitového tlumicího materiálu významně menší a bude soustředěn do toroidu, lemujícího kontakt pukliny s bentonitovým tlumicím materiálem. Příklad výsledků je uveden na Obr. 37.

Je nutné upozornit, že zjednodušené geometrie použité pro jednotlivé varianty 1D a 2D modelů vedou k výsledkům s nejstrmějším koncentračním gradientem mezi bentonitovou inženýrskou bariérou a okolím (puklinou), při kterých lze snáze identifikovat a popsat probíhající procesy. I přes toto zjednodušení lze konstatovat, že zpracované modely představují z kvalitativního hlediska reprezentativní popis systému na rozhraní mezi bentonitovým tlumicím materiálem a

okolním prostředím s protékající podzemní vodou. Prezentované modely představují podložený a validovaný základ, který je možné využít k sestavení simulací pro složitější geometrie (3D), případně jej modifikovat doplněním dalších složek, nebo upravit pro hydrogeochemické podmínky na ostatních lokalitách, vytipovaných pro hlubinné úložiště. Provedené práce rovněž prokázaly vhodnost využití modelů, sestavených pomocí softwarového produktu PHAST pro prostředí plně saturované podzemní vodou a za běžných teplot úložiště.




Obr. 37 Příklad výsledku modelu reaktivního transportu ve 2D geometrii pro SGW2/B-SGW2-ANOX (pH a Ca) v čase do 1 mil. let

4.5.9.3 Nejistoty řešení ZL

Hlavním zdrojem nejistot byla vstupní data (kvantita a kvalita dat), která popisují geochemický systém na lokalitě Kraví hora (Bukov). Další nejistoty mohou být spojeny s nezahrnutím všech jevů do dílčích geochemických úloh či do modelu reakčního transportu. Jednalo se zejména o termálně indukovaný transport, nerovnoměrné sycení bentonitu, vliv teploty na rozpouštění a srážení fází, nejistoty v nasycení podzemních vod vůči minerálům a potenciální vlivy dalších procesů.

4.5.9.4 Návrh dalších prací

V rámci tohoto dílčího projektu byla zpracována metodika vyhodnocení a přípravy dat do dílčích geochemických úloh a do zjednodušeného modelu reakčního transportu. Tyto modely byly sestaveny, otestovány a validovány. Dalším logickým krokem je příprava a odzkoušení trojrozměrného modelu reaktivního transportu pro stejnou část úložného prostoru budoucího HÚ. V případě dostupnosti dat z ostatních kandidátních lokalit v rozsahu podobném lokalitě Kraví hora je pak možné zpracovat geochemické modely vývoje HÚ i pro ostatní lokality ve stejném měřítku. Samostatnou kapitolou je pak ověření přenositelnosti výsledků na větší měřítko blížící se celé úložné sekci HÚ.

 SÚRAO	Závěrečná zpráva projektu Výzkumná podpora pro bezpečnostní hodnocení HÚ	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 462/2020

Bylo by rovněž vhodné zvážit významnost nezahrnutých procesů (viz nejistoty řešení) vzhledem k současným výsledkům dílčích geochemických modelů a modelu reakčního transportu a případně se pokusit o jejich implementaci.

4.5.9.5 Výstupy ZL

- ČERVINKA R., RUKAVIČKOVÁ L., VENCELIDES Z., ZEMAN J. (2016): Chování horninového prostředí / Příprava geochemického modelu úložiště – Podrobný věcný a časový plán řešení projektu. Technická zpráva. – MS SÚRAO, 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.
- ČERVINKA R., GONDOLLI J., KLAJMON M., RUKAVIČKOVÁ L., VENCELIDES Z., ZEMAN J. (2018): The geochemical evolution of DGR / preparation of geochemical model – Geochemical calculations and reactive transport modelling. MS SÚRAO, Technical report no. 271/2018/ENG, Praha.

4.6 Transport radionuklidů z úložiště

4.6.1 Vstupní parametry a procesní modely pro hodnocení transportu RN v horninovém prostředí (PB-2014-ZL-S2300-003-Transport1)

ZL Vstupní parametry a procesní modely pro hodnocení transportu RN v horninovém prostředí byl rozdělen na 2 části. První se věnovala experimentálnímu a modelovému stanovení horninových charakteristik (zejména transportních), které tvoří vstupní parametry do bezpečnostního hodnocení – viz část 1 (kap. 4.6.2). Druhá část se věnovala transportním modelům, které popisují migraci radionuklidů na daných lokalitách – viz část 2 (kap. 4.6.3).

4.6.2 Vstupní parametry a procesní modely pro hodnocení transportu RN v horninovém prostředí (PB-2014-ZL-S2300-003-Transport1) Část 1: Transportní parametry

Hlavní autoři: Havlová V., Zuna M., Brázda L., Kolomá K., Klajmon M., Galeková E., Rosendorf T., Jankovský F. (ÚJV)

4.6.2.1 Cíl ZL

Cílem plnění této části ZL bylo získat vstupní parametry a procesní modely pro hodnocení transportu radionuklidů přes horninové prostředí. V této části projektu to bylo především shrnutí a aktualizace odhadu transportních parametrů horninových prostředí pro vybrané lokality ve formě databáze parametrů včetně odhadu jejich nejistot na základě analýzy dosavadních poznatků dosažených při přípravě HÚ v ČR a aktualizace analýz zahraničních poznatků a ověření a srovnání transportních charakteristik dostupných vzorků z různých horninových prostředí uvažovaných pro HÚ v ČR.

4.6.2.2 Zhodnocení řešení projektu

Výběr hodnot vybraných transportních parametrů vychází ze zprávy Havlová et al. (2015a), kde byly shrnuty obecné předpoklady pro hodnocení transportních parametrů jako vstupních dat pro hodnocení bezpečnosti. V rámci tohoto ZL byly na vybraných vzorcích hornin stanoveny transportní parametry, které popisují vlastnosti ovlivňující migraci radionuklidů v horninovém prostředí.

S ohledem na zvolené transportní parametry byl preferován odběr vzorků z hmotné dokumentace vrtných jader odebraných z hlubších vrtů, které blíže odrážejí chování hornin v plánovaném úložišti a nejsou významněji ovlivněné zvětrávacími procesy. Vzorky vrtných jader byly odebrány z vrtného jádra PZV-1 (Pozďátky u Třebíče – Horka), TIV- 1 (Tis u Blatna – Čertovka) a PDV-1 (Panské Dubenky), která byla odvrtna v rámci projektu (FR-TI1/367) v roce 2010–2011 (Havlová et al. 2019). Vybrané vzorky metamorfovaných hornin z lokality Kraví hora byly odebrány z hmotné dokumentace jader S3 a S4 realizovaných na pracovišti PVP Bukov (Bukovská a Verner eds. 2017). Tyto horniny reprezentovaly různé typy magmatických a metamorfovaných hornin Českého masivu. Část horninového materiálu reprezentovaly i puklinové výplně, jejichž charakteristiky měly doplnit vstupní soubor pro budoucí hodnocení bezpečnosti s přihlédnutím k tomu, že bezpečnostní výpočet v rámci

 SÚRAO	Závěrečná zpráva projektu Výzkumná podpora pro bezpečnostní hodnocení HÚ	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 462/2020

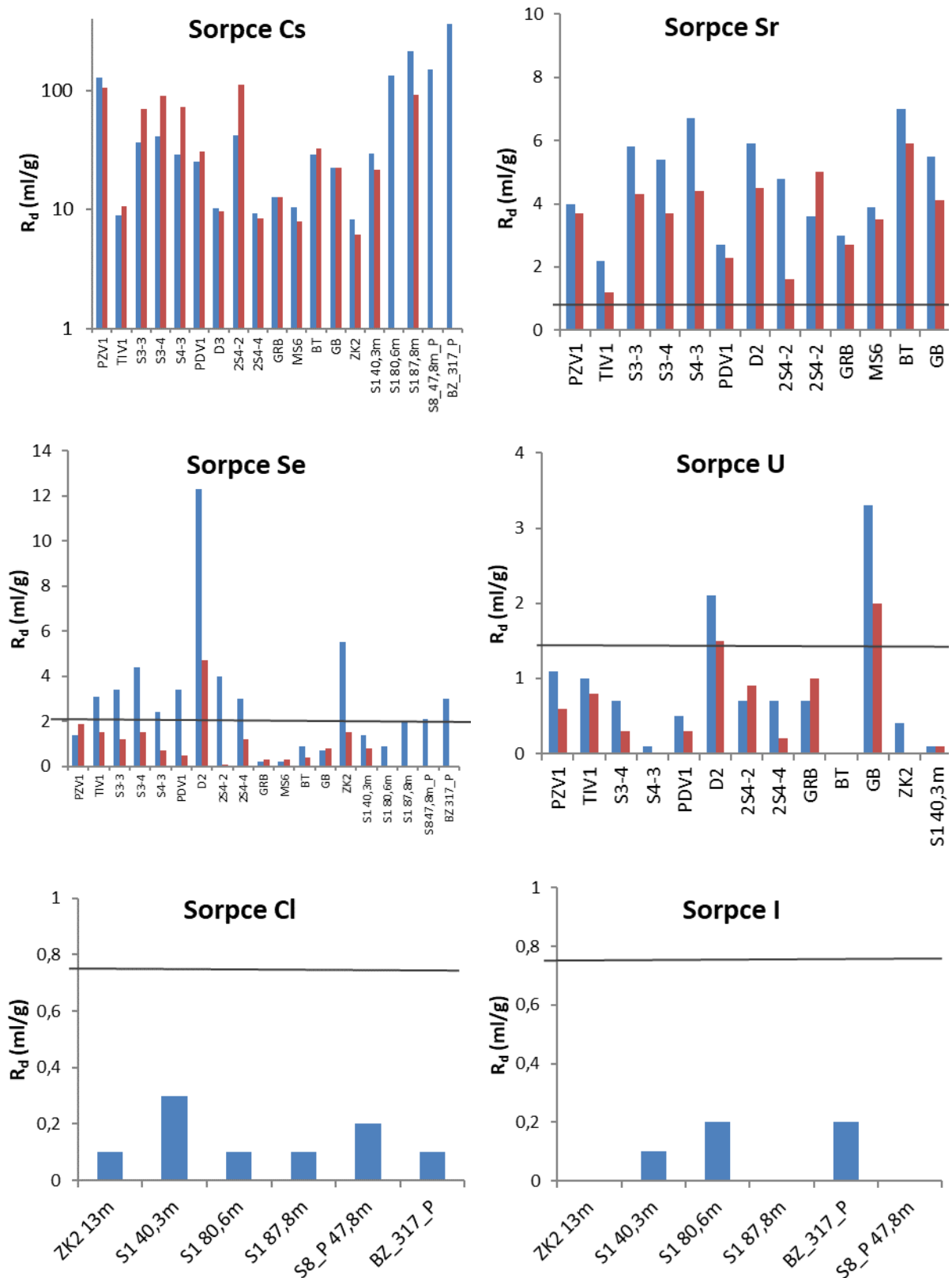
pilotního bezpečnostního hodnocení lokality Kraví hora (kap. 4.6.10) byl velmi konzervativní a neuvažoval puklinovou výplň jako potenciální příspěvek k bezpečnostní funkci horninového prostředí (zadržení radionuklidů). Pro všechny horninové vzorky byla provedena mineralogická charakterizace (RTG analýza) a petrologická charakterizace vzorků (Havlová et al. 2019).

Hodnoty porozity naměřené metodou gravimetrickou (Melnik a Skeet 1996) na vzorcích z lokalit (granity, granodiority, durbachity) se pohybovaly v intervalu 0,24-0,91 %. Porozita u vzorků z PVP Bukov (metamorfované horniny) dosahuje hodnot mezi 0,14-0,58 %.

Měření porozity je u hornin, kde se porozita pohybuje pod 1 %, velmi problematické. Žádná z metod není 100% a má své výhody a nevýhody. Metoda gravimetrická (Melnik a Skeet 1996) je výrazně závislá na vybavení a provedení daného postupu. Metoda Hg porozimetrie by vyžadovala úpravy přístrojů a postupů měření, které by zajistily reprezentativní výsledky. Metoda C-14 PMMA (stanovení Helsinské univerzity; Helmut et al. 1993) se potýká s potenciálním nadhodnocením hodnot porozity v důsledku malého rozlišení jednotlivých pixelů. A ani μ DFN model, vytvořený v rámci tohoto ZL, nedokáže spolehlivě a plně odpovědět na to, zda za aniontovou exkluzí stojí velikost (aperture) pórů, či jejich propojení (konektivita) – Havlová et al. (2019). V tomto případě je vždy vhodné doplnit měření porozity i o studium velikosti a propojení pórů vizualizačními metodami (např. SEM), které by pórovou sítí dostatečně kvantifikovaly.

Všechny experimentální práce probíhaly v prostředí podzemní vody SGW2, jejíž složení bylo definováno v Červinka et al. (2016), a které odpovídá složení podzemní vody v hloubce 500 m v podzemním díle Rožinka, ze kterého byly dostupné informace o jejím složení. Pro potřeby vyhodnocení chování radionuklidů v podzemí vodě (Odhad migračních parametrů – Havlová et al. 2017) na jednotlivých lokalitách byly ve zprávě Klajmon et al. (2017) vyhodnoceny rozpustnosti a speciace jednotlivých radionuklidů v podzemní vodě.

Z hlediska sorpčního chování radionuklidů lze konstatovat, že na materiály hornin se silně sorbuje cesium, stroncium vykazuje mírný sorpční charakter, seleničitan a uran U(VI) lze zařadit mezi nesorbující se radionuklidy – viz Obr. 37. Významným faktorem, který ovlivňuje chování radionuklidů, je mineralogické složení horninových vzorků. V případě kationtových radionuklidů Cs^+ a Sr^{2+} jsou významnými sorbenty vrstevnaté minerály (zde slídy a sekundární minerály typu kaolinit), jako je tomu i u puklinových výplní z PVP Bukov – Havlová et al. (2019). Hodnoty R_d a specifikace vzorků jsou uvedeny v Havlová et al. (2019)



Obr. 38 Sorpce vybraných radionuklidů na horninové vzorky (Cs, Sr, Se, U) a vzorky puklinových výplní (Cs, Sr, Se, U, Cl, I) ■ frakce C: 0,63–0,125 mm, ■ frakce D: 0,8–0,63 mm

Kromě prací s materiálem horninové matrice se sorpční experimenty zaměřily i na studium sorpce výše zmíněných radionuklidů na vybrané puklinové výplně (s obsahem karbonátů, chloritu, kaolinitu), které bylo doplněno o nuklidy ^{125}I , ^{36}Cl , Eu. I zde se potvrdilo, že se Cs sorbuje nejintenzivněji a že Se, U, Cl a U za daných podmínek chovají jako nesorbující se radionuklidy, a to z důvodu výskytu v aniontové formě – viz Obr. 38 a Havlová et al. (2019).

Sorpční vlastnosti jsou závislé zejména na přítomnosti minerálních fází s vyšší sorpční kapacitou, které pak ovlivňují především sorpci těch specií, které se sorbují kationovou výměnou (např. Cs). V následující tabulce jsou uvedeny příklady naměřených hodnot kationtové výměnné kapacity (CEC), stanovené v rámci projektu (Havlová et al. 2019).

Tab. 16 Hodnoty CEC horninových vzorků metodou s Cu(II)-trienem (Havlová et al. 2019)

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

a) celkový obsah biotitu a muskovitu

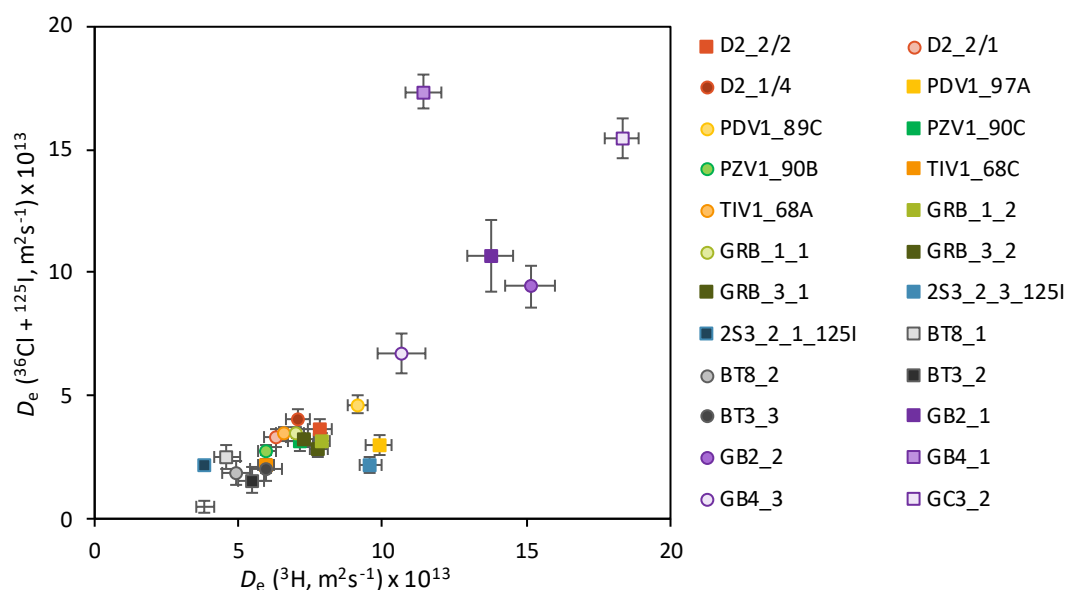
n.a. nebylo stanoveno

Při zpracování výsledků sorpčních experimentů, prováděných metodou batch, je nutno si uvědomit, že pracujeme s mletými vzorky, které zcela neodpovídají reálnému prostředí v horninovém masivu. Je zřejmé, že tyto experimenty zahrnují takové nejistoty, které není možné kontrolovat, ledaže by se během sorpčního experimentu sledovaly proměnné, jako je pH nebo např. BET před a po sorpčních experimentech, což je v literatuře jen zřídka uvedeno. Distribuční koeficienty by se neměly vykazovat jako hodnoty K_d normalizované s ohledem na hmotnost vzorku, ale spíše jako hodnoty K_a normalizované na hodnoty specifického povrchu (m² g⁻¹). Hodnoty specifického povrchu vzorků puklinových výplní ve srovnání s hodnotami pro neporušenou horninovou matrici, stanovené metodou BET, jsou uvedeny v Tab. 17 (Havlová et al. 2019).

Tab. 17 Hodnoty specifických povrchů ($m^2 g$) měřených pomocí (N_2 , Kr), hodnoty porozity stanovené pomocí Hg porozimetrie a kationtové výměnné kapacity (CEC) pro materiály puklinových výplní a horninové matrice (šedě označeno; Havlová et al. 2019)

Vzorek	Specifický povrch ($m^2 g^{-1}$) měřeno N_2	Specifický povrch ($m^2 g^{-1}$) měřeno Kr	CEC (meq/100 g) Cu(II)-trien
BZ_317m_frakce C	9,1314	//	2,31
S1_87,8m_frakce C	3,5327	4,6146	2,29
S8_47,8m_frakce C	1,5748	1,8329	1,58
ZK2_13m_frakceC	1,1479	1,4287	0,57
S1_40,3m_frakce C	1,1216	1,5059	1,06
S1_80,6 m			0,33
D2 3517, frakce C	0,197	0,2176	0,33
D2-3, kusový vzorek	0,0878	0,0871	

Hodnoty difúzních charakteristik byly experimentálně stanoveny pomocí metody průnikových difúzních experimentů. Přestože zkoumané vzorky pochází z různých lokalit napříč ČR a jedná se o různé horninové typy, jejich difúzní charakteristiky (efektivní difúzní koeficient D_e) se pohybují v poměrně úzkém rozmezí: pro 3H ($4-10$) $\cdot 10^{-13} m^2 s^{-1}$, pro ^{36}Cl ($1-10$) $\cdot 10^{-13} m^2 s^{-1}$ a pro ^{125}I ($1-4$) $\cdot 10^{-13} m^2 s^{-1}$, přičemž hodnoty jdoucí pod $2\cdot 10^{-13} m^2 s^{-1}$ jsou pouhým odhadem pohybujícím se v mezi stanovitelnosti vycházející z mezí detekce. U vzorků metamorfovaných hornin se podařilo prokázat aniontovou exkluzi, která vede k nižším hodnotám D_e pro ^{36}Cl a ^{125}I v porovnání s 3H . Poměr efektivních difúzních koeficientů mezi tritiem a aniontem je dále zobrazen v Obr. 39 (Havlová et al. 2019).



Obr. 39 Hodnoty efektivních difúzních koeficientů (analytické řešení) tritia (3H) vs. aniont (chlorid ^{36}Cl , jodid ^{125}I) – Havlová et al. (2019)

Pro migraci radionuklidů v horninovém prostředí jsou velmi významné i geochemické podmínky na lokalitě, a to především pH, Eh, obsah O₂ a CO₂ ve vodě, přítomnost komplexotvorných látek atd. Měření hydrochemických parametrů podzemní vody v *in-situ* (PVP Bukov) bylo prováděno formou hydrochemického profilování, tak dlouhodobého měření parametrů pro sledování vývoje Eh v prostředí odpovídajícímu prostředí HÚ. Změřené hodnoty oxidačně redukčního potenciálu, přepočtené vůči standardní vodíkové elektrodě Eh (SHE) se pohybovaly v rozmezí -200 až -250 mV při pH okolo 8 a teplotě 15,2 až 15,4 °C. Nejlépe změřenému oxidačně-redukčnímu potenciálu odpovídal redoxní pár Fe²⁺/Fe(OH)₃(s). Změřené hodnoty odpovídají podzemním vodám z hlubokého horninového prostředí a je možno je použít jako referenční hodnoty při hodnocení migrace radionuklidů v horninovém prostředí HÚ.

Získané hodnoty migračních parametrů byly zpracovány ve formě databáze a předány Objednateli.

4.6.2.3 Nejistoty řešení ZL

Experimentální stanovení migračních parametrů je spojeno s celou řadou nejistot a zjednodušení:

- V současné době neprobíhají v ČR žádné průzkumné invazivní práce, které by poskytovaly horninové vzorky z hloubek, odpovídajících HÚ (cca 500 m). Pro experimentální práce tedy byly využívány vzorky ze starších kampaní, mělčích vrtů a pouze z širší oblasti potenciálních lokalit či vzorky z podzemního pracoviště Bukov/Rožná.
- Syntetická podzemní vod SGW2, která je používána pro experimentální práce, je uměle připravený roztok, jehož složení přibližně odpovídá složení podzemní vody z lokality Rožná z hloubky cca 500 m; je použit pro všechny experimentální práce z důvodu reprodukovatelnosti stabilního složení.
- Složení podzemní vody na jednotlivých lokalitách neznáme; jsme schopni pouze odhadovat ze složení vod v mělčích vrtech (např. v kap. 4.7.3 Kolomá a Klajmon 2018).
- Měření porozity je u hornin, kde se porozita pohybuje pod 1 %, velmi problematické. Žádná z metod není 100% a má své výhody a nevýhody.
- K experimentálním pracím se používají vzorky malých rozměrů či vzorky dokonce mleté. 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.
- Práce s některými radionuklidy v laboratoři, zejména s těmi redox-senzitivními (Se, U), přesně neodrážejí podmínky *in-situ*; pro provedení odpovídajících experimentů, připravených tak, že se radionuklidy budou vyskytovat v odpovídajícím oxidačním stavu (Se⁻¹; U⁴⁺) by bylo nutné je provést v anaerobní atmosféře bez přístupu O₂ a za odpovídajícího parciálního tlaku CO₂.
- Popis difúzních procesů v podobě výsledného efektivního koeficientu D_e neodráží přímo popis charakteru pórové sítě – konstriktivou, tortuozitu a vlastní konektivitu.
- Měření Eh, pH a dalších parametrů *in-situ* vyžaduje pečlivé dlouhodobé anaerobní měření bez přístupu O₂.

4.6.2.4 Návrh dalších prací

Další práce by měly zahrnovat následující položky:

- experimentální stanovení migračních vlastností na reálných vzorcích hornin a puklinových výplní z potenciálních lokalit v rámci průzkumných prací po zúžení počtu lokalit;
- zavést použití syntetických vod o složení, odpovídajícímu složení podzemní vody na lokalitách, jako roztoků pro experimentální práce;
- rozšíření portfolia radionuklidů o radionuklidy specifické např. pro odpady z vyřazování JE nebo o aktinidy;
- provedení sorpčních experimentů s redox-senzitivními prvky v podmínkách odpovídajících podmínkám HÚ (Eh, pH, O₂), tj. např. v anaerobním boxu;
- definování hraničních podmínek pro sorpci (mineralogické složení, Eh, pH, složení roztoku, teplota, CEC); zaměřit sledování směrem např. k tzv. smart K_d konceptu;
- rozšířené studium pórového prostoru se zapojením moderních technik (XCT, SEM apod.), směřující ke kvantifikaci mikrostrukturách charakteristik;
- detailní popis difúzního procesu pro konzervativní radionuklidy pro reálné vzorky z potenciálních lokalit ČR;
- detailní popis difúzního procesu pro sorbující se radionuklidy pro reálné vzorky z potenciálních lokalit ČR; vyhodnocení postupů upscalingu migračních parametrů z laboratorního do reálných;
- podmínek hornin masivu Českého masivu;
- získání dat pro migrační charakteristiky reprezentativních materiálů puklinových systémů České republik a klasifikace typických puklinových materiálů s cílem zahrnout jejich migrační charakteristiky do hodnocení bezpečnosti. Výsledný bezpečnostní výpočet bude realističtější.

4.6.2.5 Výstupy ZL

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.

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.

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

HAVLOVÁ V., KOLOMÁ K., BRÁZDA L., RUKAVIČKOVÁ L. (2019): 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. (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., ZUNA M., BRÁZDA L., KOLOMÁ K., GALEKOVÁ E., ROSENDORF T., JANKOVSKÝ F. (2019): Migration processes of radionuclides in the rock massive; migration parameters of Bohemian massive rocks. – MS SÚRAO, ZZ 333/2018/EN, Praha.

Databáze experimentálních dat v elektronické formě:

T1_databaze_24062020.xls

T1_databaze_24062020.xlm

4.6.3 Vstupní parametry a procesní modely pro hodnocení transportu RN v horninovém prostředí (PB-2014-ZL-S2300-003-Transport1) Část 2: Modely

Hlavní autoři: Říha J., Královcová J., Maryška J. (TUL), Uhlík J., Černý M., Gvoždík L., Polák M., Milický M., Baier J. (PROGEO), Grecká M., Trpkošová D., Havlová V. (ÚJV)

ZL Vstupní parametry a procesní modely pro hodnocení transportu RN v horninovém prostředí byl rozdělen na 2 části. První se věnovala experimentálnímu a modelovému stanovení horninových charakteristik (zejména transportních), které tvoří vstupní parametry do bezpečnostního hodnocení. Druhá část se věnovala transportním modelům, které popisují migraci radionuklidů na daných lokalitách. Tato část řešení se věnuje transportním modelům.

4.6.3.1 Cíl ZL

Cílem dílčího úkolu bylo získat procesní modely pro hodnocení transportu radionuklidů přes horninové prostředí, konkrétně:

- Shrnutí a analýza transportních procesů, modelů a výpočetních kódů pro určení transportních cest a hodnocení transportu radionuklidů přes horninové prostředí.
- Výběr vhodných procesních modelů pro popis transportu radionuklidů v krystalinickém prostředí a určení transportních cest na kandidátních lokalitách v návaznosti na přípravu 3D strukturně-geologických a hydrogeologických modelů v dílčích projektech, aktualizace analýz zahraničních poznatků a určení transportních cest pro vybrané lokality podle požadavků SÚRAO.
- Ověření vybraných modelů a implementace výpočetních kódů pro určení transportních cest v potenciálních lokalitách.

Stanovení a popis transportních cest měly posloužit k hodnocení jednotlivých lokalit a k jejich vzájemnému porovnání. Dílčí výstupy tohoto ZL měly posloužit za vstup navazujícím ZL: Aktualizace integrovaného, transportního modelu pro hodnocení dlouhodobé bezpečnosti (viz 4.6.4), Bezpečnostní rozbor HÚ v lokalitě Kraví hora (4.6.10) a Předběžné hodnocení lokalit z hlediska dlouhodobé bezpečnosti (viz 4.7.3 a 4.7.4).

Dílčím cílem byla také vzájemná verifikace implementací modelů jednotlivých řešitelů a potvrzení jejich použitelnosti v příštích projektových etapách.

4.6.3.2 Zhodnocení řešení projektu

ZL byl paralelně řešen třemi řešiteli užitím tří různých SW prostředků; na TUL byl využíván SW Flow123D, v PROGEO SW MODFLOW-USG a v ÚJV SW FEFLOW.

ZL byl řešen v několika fázích, jak je dokumentováno v jeho průběžných zprávách. První fáze byla rešeršní, v jejím rámci byla provedena analýza zahraničních metodických postupů zpracování transportních modelů pro určení transportních cest radionuklidů horninovým prostředím v různých stádiích posuzování lokalit vybraných k možnému situování HÚ.

Druhá fáze byla verifikační, byly navrženy a jednotlivými řešiteli zpracovány tři syntetické srovnávací úlohy, na nichž je hodnocena shoda transportních cest generovaných na základě výstupů jednotlivých modelů.

V posledních dvou fázích byla vždy stanovena a popsána metodika stanovení transportní cesty vždy od východiska v podobě zkalibrovaného hydraulického modelu k výsledné transportní cestě a její dokumentaci. Tyto metodiky byly následně aplikovány pro jednotlivé kandidátní lokality; v rámci třetí fáze pro každou z v té době sedmi kandidátních lokalit, kdy podkladem pro stanovení transportních cest byly zkalibrované regionální hydraulické modely, a v rámci fáze čtvrté pro každou z již devíti kandidátních lokalit, kdy podkladem pro stanovení transportních cest byly zkalibrované detailní hydraulické modely.

Lze konstatovat, že výsledky jednotlivých simulačních SW dosáhly relativně dobré shody.

Vzniklé rozdíly jsou způsobeny celou řadou faktorů:

- Rozdíly v proudovém poli – hydraulické modely byly kalibrovány pomocí shodných kritérií (hladina mělce zaklesnuta pod terénem, historické hladiny v průzkumných hydrogeologických vrtech); vypočtená pole vektorů rychlosti (a úrovní hladin podzemní vody v přívrchové vrstvě) z hydraulických modelů ale nejsou zcela totožná.
- Různé implementace metody particle tracking – odlišná numerická schémata výpočtu polohy částice, odlišná kritéria pro ukončení trasování částic v oblasti drenáže.
- Různá diskretizace – podrobnost výpočetní sítě má vliv na výsledky metody particle tracking.
- Různé konceptuální přístupy modelů – vznikají rozdíly v popisu proudového pole mezi modelem na bázi ekvivalentního kontinua (MODFLOW) a modely využívajícími kombinaci ekvivalentního kontinua a diskretních puklin (Flow123D, Feflow). To má vliv na výsledky metody particle tracking.
- Modelová doména (především mocnost horninového masivu s výpočtem proudění) není u všech řešitelů vymezena shodně. V případě SW Flow123D je v modelu uvažovaná mocnost horninového masivu menší. To se projevuje například u lokality Čertovka, kde je projektovaná úroveň úložiště blíže bázi modelu než u jiných lokalit a kde jsou zároveň v úrovni úložiště relativně vysoké rychlosti. Některé transportní cesty určené metodou particle tracking na podkladě proudového pole z Flow123D pak končí na bázi modelu, což vede ke zkrácení ve statistickém vyhodnocení.

Kvalitativní shoda jednotlivých modelů je nicméně velmi dobrá (viz kapitoly hodnotící jednotlivé lokality s využitím jednotlivých SW). V určení směru postupu (tedy identifikaci povodí drenáže) a identifikaci míst s nejkratší dobou zdržení není mezi modely významný rozdíl.

Lze konstatovat, že dílčí rozdíly výsledků transportu jsou výsledkem konceptuálního nastavení modelu v rámci jednotlivých softwarových platforem. Pro hodnocení transportních

charakteristik posuzovaných lokalit je potřeba primárně vycházet z konzistentní sady dat získané v rámci shodné softwarové platformy.

Tab. 18 Medián délky transportní cesty – srovnání výsledků použitých SW

Medián délky transportní cesty (m)	Flow123D	MODFLOW	FEFLOW
Březový potok	2743	1671	-
Kraví hora	2136	1579	-
Magdaléna	1333	1210	-
Čihadlo	4318	2543	2950
Čertovka	2322	1916	-
Horka	3120	2345	3170
Hrádek	3422	1103	-
Temelín	1659	1205	-
Dukovany	2774	2573	-

Tab. 19 Medián doby zdržení – srovnání výsledků použitých SW

Medián doby zdržení (roky)	Flow123D	MODFLOW	FEFLOW
Březový potok	9149	11285	-
Kraví hora	5163	5840	-
Magdaléna	1689	2430	-
Čihadlo	7333	8620	8921
Čertovka	2463	4573	-
Horka	5637	6116	7240
Hrádek	3305	3036	-
Temelín	8468	8010	-
Dukovany	4280	7757	-

Níže je popsána finální varianta metodiky, tak jak byla implementována pro detailní hydraulické modely. Podobné metodiky byly zpracovány ostatními řešiteli pro jejich příslušné výpočetní nástroje (pro více informací viz Říha et al., 2018).

Transportní cesty byly hledány na základě detailních hydraulických modelů, které jsou výstupem zakázkového listu HG modely.

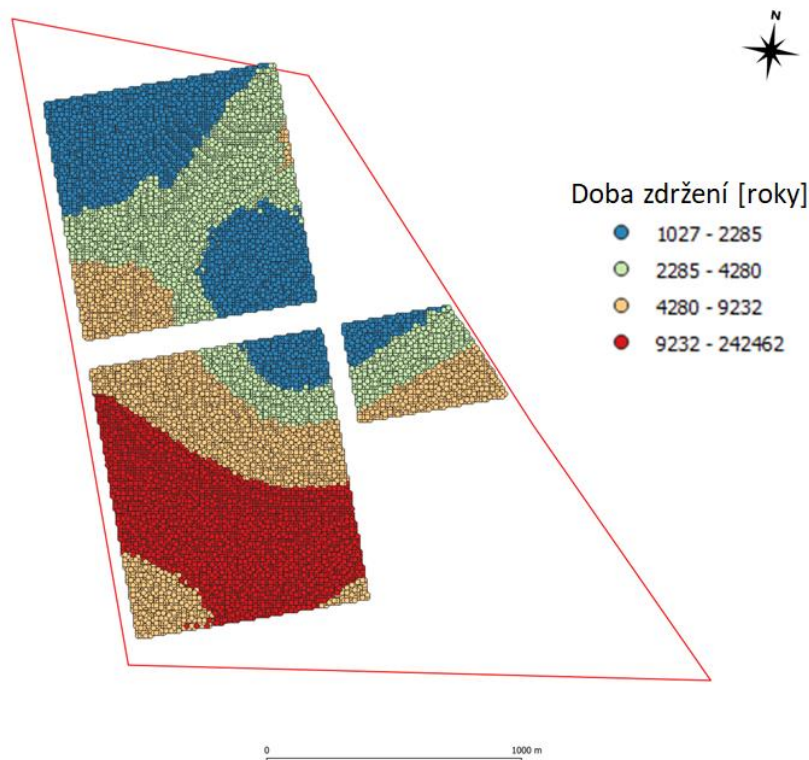
Východiskem pro stanovení transportní cesty je zkalibrovaný hydraulický model realizovaný ve Flow123D. Výstupem hydraulického modelu je ustálené pole proudění (vektory darcyovské rychlosti v těžištích elementů).

Transportní cesty byly stanoveny metodou particle tracking (Říha et al. 2018). Před samotným výpočtem je třeba přepočíst darcyovské rychlosti na skutečné jejich vydělením porozitou v daném elementu. V první modelové vrstvě (přípovrchové zóně) je ve všech elementech zadána konstantní porozita 5 %.

Vlastní stanovení transportních cest bylo realizováno v programu Paraview metodou Runge-Kutta řádu 4-5 v módu forward tracking, tedy jen ve směru proudění podzemní vody. Výpočet je ukončen, jakmile proudnice protne hranici simulované oblasti (opustí modelovou doménu). Výsledky výpočtů particle tracking byly hodnoceny z hlediska:

- délky trajektorie do drenážní oblasti;
- doby postupu částice do drenážní oblasti (doba zdržení);
- směru postupu částice;
- místa drenáže.

Tyto výstupy jsou pro každou z devíti kandidátních lokalit dokumentovány obrazově (formou map) a tabelárně (Říha et al. 2018). Vyhodnocení transportních cest na všech posuzovaných lokalitách proběhlo z prostor UOS, vymezených projekty HÚ. Ukázka vyhodnocení pro jednu z kandidátních lokalit, založeného na detailním hydraulickém modelu zpracovaném v SW Flow123D, je znázorněna na Obr. 40 (Říha et al. 2018).



Obr. 40 Lokalita Magdaléna – doba zdržení – ukázka vyhodnocení založeného na detailním hydraulickém modelu zpracovaném v SW Flow123D

4.6.3.3 Nejistoty řešení ZL

Nejistoty řešení ZL plynou především z nedostatečné prozkoumanosti jednotlivých lokalit, konkrétně pak z nedostatku informací o geologické stavbě, hydrogeologické situaci či hydraulických a transportních vlastnostech hornin.

Další nejistoty pak plynou již ze samé podstaty numerického modelování. Modely realitu reprezentují zjednodušeně, zahrnují jen vybrané (ideálně ty nejpodstatnější) procesy. Rovnice popisující tyto procesy nejsou řešeny analyticky, ale numericky na diskrétní výpočetní síti. Velikost elementů výpočetní sítě má vliv na přesnost numerického řešení. Simulace probíhají na počítačích, v aritmetice s konečnou přesností, což vede k zaokrouhlovacím chybám. Konečně výsledky modelů jsou analyzovány metodou particle tracking, což je rovněž metoda numerická, a tedy inherentně nepřesná (míra nepřesnosti závisí na velikosti elementů výpočetní sítě a zvoleném numerickém schématu řešení diferenciální rovnice; řádu metody).

Zatímco nejistoty plynoucí z numerického řešení lze vhodně zvoleným konceptem modelu, vhodnou diskretizací a vhodným numerickým schématem řešení diferenciálních rovnic minimalizovat, nejistoty plynoucí z nedostatečné prozkoumanosti lokalit nelze v dané fázi odhadnout či zmenšit. Lze tak konstatovat, že v etapě invazivního průzkumu mohou být výsledky tohoto hodnocení překonány.

4.6.3.4 Návrh dalších prací

V příští etapě lze v souvislosti s geofyzikálním a invazivním průzkumem kandidátních lokalit očekávat větší množství geologických, hydrogeologických i transportních dat. Na jejich základě bude možno připravit detailnější a přesnější hydraulické a transportní modely. Metodika stanovení transportní cesty pravděpodobně zůstane v principu stejná, může se však dílčím způsobem změnit v závislosti na současném stavu poznání a také v závislosti na zvoleném konceptu modelu. Vedle stávajících modelů založených na ekvivalentním porézním médiu (s několika diskretními zlomovými pásmy) bude třeba metodiku stanovení a popisu transportní cesty ověřit také na modelech založených na diskretní puklinové síti. Pro stanovení transportní cesty bude i nadále využívána metoda particle tracking, která by však měla být doplněna o simulace transportu zahrnující vedle advekce rovněž difúzi, sorpci a radioaktivní rozpad. Výsledky simulací transportu jsou vhodným doplňkem k simulaci kritických transportních cest v modelu realizovaném pomocí SW GoldSim. Obecně lze očekávat směřování k větší integraci dílčích modelů s cílem umenšit nejistoty plynoucí z předávání dat na rozhraní modelů.

4.6.3.5 Výstupy ZL

HAVLOVÁ V., KRÁLOVCOVÁ J., UHLÍK J., MILICKÝ M. (2015): Transportní modely – průběžná zpráva. – MS SÚRAO, TZ 11/2015, Praha.

ŘÍHA J., UHLÍK J., GRECKÁ M., MARYŠKA J., KRÁLOVCOVÁ J., ČERNÝ M., GVOŽDÍK L., POLÁK M., MILICKÝ M., BAIER J., TRPKOŠOVÁ D., HAVLOVÁ V. (2016): Transportní modely – průběžná zpráva. – MS SÚRAO, TZ 47/2016, Praha.

ŘÍHA J., UHLÍK J., GRECKÁ M., MARYŠKA J., KRÁLOVCOVÁ J., ČERNÝ M., GVOŽDÍK L., POLÁK M., MILICKÝ M., BAIER J., TRPKOŠOVÁ D., HAVLOVÁ V. (2017): Transportní modely – průběžná zpráva. – MS SÚRAO, TZ 270/2018, Praha.

ŘÍHA J., UHLÍK J., GRECKÁ M., MARYŠKA J., KRÁLOVCOVÁ J., ČERNÝ M., GVOŽDÍK L., POLÁK M., MILICKÝ M., BAIER J., TRPKOŠOVÁ D., HAVLOVÁ V. (2018): Transportní modely – závěrečná zpráva. – MS SÚRAO, TZ 324/2018, Praha.

4.6.4 Aktualizace integrovaného, transportního modelu pro hodnocení dlouhodobé bezpečnosti (PB-2014-ZL-S2303-006-Transport2)

Hlavní autoři: Trpková D., Havlová V., Hušáková H. (ÚJV)

4.6.4.1 Cíl ZL

Pro bezpečnostní hodnocení umístění hlubinného úložiště v hypotetické lokalitě v koncepci referenčního projektu zpracovaného v letech 2009 až 2011 a v projektu MPO FR-TI1/362 „Výzkum vlastností materiálů pro bezpečné ukládání radioaktivních odpadů a postupů jejich hodnocení“ zpracovaného v letech 2009-2013 byl připraven výpočetní model v prostředí kompartmentového výpočetního kódu GoldSim (www.GoldSim.com). Řada vlastností, událostí a procesů, které mohou ovlivnit transport radionuklidů, však byla zjednodušena především z důvodu časového a věcného omezení projektů. Vývoj integrovaného, transportního modelu

je dlouhodobý proces, který musí postupně zahrnout nejdůležitější znaky, události a procesy probíhající v úložišti v horizontu 100 000 let na základě poznatků získávaných při řešení přípravy hlubinného úložiště. Cílem tohoto projektu bylo provést aktualizaci integrovaného, transportního modelu pro potřeby výběru vhodné lokality pro hlubinné úložiště. Tato aktualizace musí umožnit zahrnout změny koncepce hlubinného úložiště, změnu parametrů horninového prostředí či změnu komponent úložiště a jejich parametrů.

4.6.4.2 Zhodnocení řešení projektu

Předmětem řešení projektu bylo:

- Podrobný věcný a časový harmonogram prací včetně logické provázanosti s ostatními dílčími projekty projektu „Výzkumná podpora pro bezpečnostní hodnocení HÚ“.
- Shrnutí a analýza stávajícího modelu hodnocení bezpečnosti vytvořeného pro referenční projekt hlubinného úložiště 2011 a identifikace jeho koncepčních nedostatků.
- Návrh programu aktualizace stávajícího modelu v závislosti na výsledcích bodu 1) zadání zahrnující možnost změn koncepce a parametrů jednotlivých komponent hlubinného úložiště.
- Implementace navržené aktualizace.
- Testování aktualizovaného modelu.
- Návrh další aktualizace.

Analýza původního modelu hodnocení bezpečnosti hlubinného úložiště, identifikace jeho koncepčních nedostatků a návrh jeho aktualizace byla předmětem první průběžné zprávy (Landa et al. 2015). Implementace navržených aktualizací a testování modelu včetně návrhů další aktualizace byly předmětem druhé průběžné zprávy (Trpkošová et al. 2016).

Model hlubinného úložiště vyhořelého jaderného paliva a vysoce aktivních odpadů je vyvíjen v ÚJV Řež, a. s. od roku 2003. První verze byly vyvíjeny pomocí programu Amber, od roku 2006 je model vyvíjen v programu GoldSim. Vývoj probíhal v rámci projektů EC Pamina „Performance Assessment Methodologies in Application to Guide the Development of the Safety Case“ (2006-2010), „Aktualizace referenčního projektu hlubinného úložiště radioaktivních odpadů v hypotetické lokalitě“ SÚRAO (2009–2011; dále jen ARP 2011 či ARP) a projektu MPO FR-T11/362 „Výzkum vlastností materiálů pro bezpečné ukládání radioaktivních odpadů a postupů jejich hodnocení“ (2009-2013, dále jen MPO TIP).

V rámci řešení projektu „Výzkumná podpora pro bezpečnostní hodnocení HÚ“ úkolu PB-2014-ZL-S2303-006-Transport2 byly předány SÚRAO dvě stěžejní verze modelu, ARP 2011 (Vokál et al. 2010) a MPO TIP (Landa et al. 2013) a tyto dvě verze byly detailně analyzovány v rámci první průběžné zprávy (Landa et al. 2015). Tyto původní modely měly ještě řadu míst vyžadujících další vývoj. Na tyto nedostatky či nejasnosti bylo zaměřeno studium literárních poznatků, na základě, kterých byly definovány návrhy možných změn. Tyto návrhy byly následně diskutovány se zadavatelem a vybrané návrhy byly implementovány formou změn do aktualizované verze modelu (DRS_v723.gsm). Konkrétně bylo studováno:

- 1) modelování úniku radioaktivity při bodových defektech ukládacích obalových souborů;
- 2) vzájemné umístění sekcí s VJP a s VAO;

- 3) zohlednění skutečné geometrie superkontejnerů včetně distančních bloků při simulaci bentonitové tlumicí a těsnicí vrstvy;
- 4) oprava chybné interpretace difúzních koeficientů;
- 5) rozhraní bentonit/horninové prostředí;
- 6) prostorová interpretace úložného prostoru ve vztahu k rozmístění preferenčních cest v horninovém prostředí;
- 7) způsob simulace preferenčních cest v geosféře;
- 8) rozhraní geosféra/biosféra;
- 9) model klimatických změn;
- 10) variantní model pro všechny kandidátní lokality.

U každého diskutovaného tématu byl popsán způsob simulace problematiky v původním matematickém modelu spolu s návrhem pro další vývoj. Diskutovaná témata byla rozdělena do 4 kategorií na základě nutnosti implementace do matematického modelu. Navržené kategorie implementací jsou:

Nutné implementace:

- oprava chybné interpretace difúzních koeficientů;
- variantní model pro všechny kandidátní lokality;
- rozhraní bentonit/horninové prostředí.

Implementace závislé na výstupech hydrogeologických a transportních modelů:

- prostorová interpretace úložného prostoru ve vztahu k rozmístění preferenčních cest v horninovém prostředí;
- způsob simulace preferenčních cest v geosféře.

Implementace závislé na výsledcích citlivostních analýz:

- vzájemné umístění sekcí s VJP a s VAO.

Volitelné implementace dle stupně pokročilosti bezpečnostních analýz:

- modelování úniku radioaktivity při bodových defektech ukládacích obalových souborů;
- zohlednění skutečné geometrie superkontejnerů včetně distančních bloků při simulaci bentonitové tlumicí a těsnicí vrstvy;
- rozhraní geosféra/biosféra;
- model klimatických změn.

Po dohodě s objednatelem byla věnována pozornost následujícím problematickým bodům:

- 1) oprava chybné interpretace difúzních koeficientů;
- 2) způsob simulace transportní cesty v geosféře;
- 3) detailní popis biosférického modelu a jeho srovnání se zahraničními modely.

Oprava chybné interpretace difúzních koeficientů

V původním modelu byly chybně zadávány parametry difúzních koeficientů, kdy byly za D_s chybně dosazovány efektivní difúzní koeficienty (D_e) namísto difúzních koeficientů v čisté vodě (D_w).

Návrh implementace změn do současné verze modelu hodnocení hlubinného úložiště:

Na základě komunikace s distributorem programu bylo špatné zadávání parametrů objasněno. Po dohodě s objednatelem byla tato otázka dále řešena formou implementace nového zadávání parametrů do aktualizovaného modelu.

Způsob simulace preferenčních cest v geosféře

V původních verzích modelu byl použit model geosféry ve dvou základních variantách. V projektu Pamina byl vytvořen pomocí tří kaskádních komponent „Pipe“, v modelu ARP (2011) byla použita komponenta „Network“, ve verzích pro projekt MPO TIP byl proveden návrat k původnímu modelu tří kaskádních komponent „Pipe“. Parametry transportní cesty však nebyly založené na výsledcích hydrogeologických modelů.

Návrh implementace změn do současné verze modelu hodnocení hlubinného úložiště:

Po dohodě s objednatelem byl vytvořen samostatný model simulující transport geosférou na základě výsledků ZL Vstupní parametry a procesní modely pro hodnocení transportu RN v horninovém prostředí (viz kap. 4.6.2), model je označován jako Geosfera_3D_1D.gsm.

Rozhraní geosféra/biosféra

Rozhraní geosféra biosféra (Geosphere – Biosphere Interface (GBI)) je jednou z nejobtížnějších částí z hlediska hodnocení bezpečnosti hlubinného úložiště. Původní model má GBI modelované velice konzervativně. Veškerý tok z geosféry vtéká do dvou povrchových kompartmentů, z nichž jeden představuje zemědělskou půdu a druhý lesní půdu. Z těchto kompartmentů pak voda odtéká do rybníka a dále do řeky. Původní model je velice konzervativní a z hlediska proudění podzemní vody a základního odtoku nerealistický.

Návrh implementace změn do současné verze modelu hodnocení hlubinného úložiště:

Po dohodě s objednatelem byla provedena rešerše zahraničních modelů biosféry, na základě, které byl model upraven v ZL Bezpečnostní rozbor HÚ v lokalitě Kraví hora (viz kap. 4.6.10).

4.6.4.3 Nejistoty řešení ZL

V rámci řešení zadávacího listu se nevyskytly žádné závažné nejistoty.

4.6.4.4 Návrh dalších prací

Nejdůležitějšími závěry pro další vývoj komplexního modelu hlubinného úložiště jsou:

- 1) Doporučení rozšířit komplexního modelu o způsob simulace transportní cesty, kdy jsou parametry transportní cesty založeny na výsledcích advektivního transportu simulovaného 3D hydrogeologickými modely.
- 2) Doporučení rozšíření komplexního modelu o biosférický model ¹⁴C.

Na zadávací list tematicky navazuje ZL Bezpečnostní rozbor HÚ v lokalitě Kraví hora (viz kap. 4.6.10), ve kterém byla problematika dále řešena, a model byl kompletně přepracován.

4.6.4.5 Výstupy ZL

LANDA J., TRPKOŠOVÁ D., HAVLOVÁ V., GONDOLLI J. (2015): Analýza stávajícího modelu hlubinného úložiště. – MS SÚRAO, TZ 8/2015. Praha.

TRPKOŠOVÁ D., HAVLOVÁ V., HUSTÁKOVÁ H. (2016): Aktualizace integrovaného, transportního modelu pro hodnocení dlouhodobé bezpečnosti. – MS SÚRAO, ZZ 44/2016. Praha.

Počítačový model DRS_v723.gsm

Počítačová model Geosfera_3D_1D.gsm

4.6.5 Transport radionuklidů z úložiště / Vstupní parametry a procesní modely pro hodnocení transportu radionuklidů přes inženýrské bariéry (PB-2015-ZL-S2565-013-Transport3)

Hlavní autoři: Hofmanová E., Červinka R., Brázda L., Pecková A. (ÚJV), Vopálka D., Baborová L., Vetešník A., Víglašová E. (FJFI ČVUT), Vašíček R. (CEG ČVUT)

4.6.5.1 Cíl ZL

Pro hodnocení bezpečnosti hlubinných úložišť ve vybraných lokalitách je třeba znát rychlost transportu radionuklidů přes systém inženýrských bariér. Cíle tohoto dílčího projektu byly:

1. Porozumět procesům ovlivňujících transport radionuklidů přes inženýrské bariéry

Cílem bylo shrnout a analyzovat transportní procesy (difúze a sorpce) přes inženýrské bariéry (tlumící a výplňové materiály na bázi bentonitu) včetně transportu přes rozhraní na transportní cestě od UOS do horninového prostředí (korozní produkty-bentonit, bentonit-hornina, příp. bentonit-cementové materiály). Experimentální práce zahrnovaly měření transportních charakteristik vybraného bentonitu pro vybrané radionuklidy a studium migračních procesů přes simulované rozhraní s ostatními bariérovými materiály.

2. mMt k dispozici procesní modely pro predikci transportu radionuklidů přes inženýrské bariéry

Na základě úvodního shrnutí transportních modelů a kódů potřebných pro hodnocení transportu přes inženýrské bariéry bylo cílem upravovat stávající modely a vyvíjet a ověřovat nové procesní modely, např. na provedených experimentech difúze radionuklidů přes skládané vrstvy.

3. Získat znalosti a vstupní data pro hodnocení bezpečnosti hlubinného úložiště

Cílem bylo shrnout a aktualizovat transportní parametry pro inženýrské bariéry ve formě databáze parametrů včetně odhadu jejich nejistot, vhodné pro použití v integrovaném transportním modelu, na základě experimentálních prací a analýz dosavadních poznatků.

4.6.5.2 Zhodnocení řešení projektu

Experimentální práce zaměřené na geochemickou a geotechnickou charakterizaci bentonitů byly provedeny na pracovištích ÚJV Řež, a. s. (ÚJV) a na Centru experimentální geotechniky (CEG), FSv, ČVUT v Praze. Experimentální práce zaměřené na studium transportu

radionuklidů byly provedeny na pracovištích ÚJV a na Katedře jaderné chemie (KJCH) FJFI, ČVUT v Praze. Za vývoj a ověření procesních modelů bylo zodpovědné pracoviště KJCH.

Kationtová výměna byla identifikována jako jeden z dominantních procesů, které mohou ovlivnit transport radionuklidů přes inženýrskou bariéru bentonitu a rozhraní s ostatními bariérovými materiály. V pórech bentonitu se bude v kontaktu s granitickou podzemní vodou vyvíjet bentonitová pórová voda a kationtově-výměnnými reakcemi se bude měnit původní složení iontovýměnného komplexu v mezivrstvi jílu ze skupiny smektitu. Zastoupení vyměnitelných kationtů v mezivrstvi mohou významně ovlivňovat také výluhy z cementových materiálů (bohaté na Na^+ , K^+ nebo Ca^{2+} podle stádia loužení cementových materiálů). Z literárních dat lze usuzovat, že charakter vyměnitelného kationtu (Na^+ vs. Ca^{2+}) ovlivňuje nejen geotechnické vlastnosti (např. Pusch 2006), ale i vlastnosti transportní (např. Choi a Oscarson 1996, González Sánchez et al. 2008). Rozdílné geotechnické a transportní vlastnosti sodné a vápenaté formy jsou v literatuře přisuzovány rozdílné mikrostruktuře porézního prostředí dané formy jílového materiálu. Experimentální program byl proto zejména zaměřen na studium vlivu vyměnitelného kationtu na difúzní chování a okrajově i na geotechnické chování kompaktovaného bentonitu.

Charakterizace bentonitových materiálů

Pro tento ZL byly vybrány dva české kandidátní materiály z ložiska Černý vrch, které jsou komerčními produkty firmy Keramost, a. s. – „Bentonit a Montmorillonit“ označovaný jako BaM_2014 a „Bentonit Černý vrch“ označovaný jako BCV_2017. U obou materiálů byly stanoveny vybrané mineralogické (fázové složení), geochemické (chemické složení, kationtová výměnná kapacita, specifický měrný povrch, výluhy) a geotechnické vlastnosti (součinitel hydraulické vodivosti, bobtnací tlak, mez tekutosti apod.). Byly zjištěny velmi podobné geochemické (viz Tab. 20) a geotechnické vlastnosti obou studovaných materiálů.

Tab. 20 Shrnutí vybraných geochemických charakteristik studovaných bentonitů; kationtová výměnná kapacita, CEC, byla stanovena jednak z úbytku mědi pomocí UV-VIS spektrofotometrie a ze sumy vytěsněných kationtů

materiál	chemické složení, hm. % (silikátová analýza na mokré cestě)											
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	C _{celk.}	S _{celk.}
BaM_2014	50,0	14,6	12,2	3,1	0,1	3,2	3,1	0,2	0,9	0,7	4,5	0,1
BCV_2017	49,8	14,8	11,1	3,0	0,2	2,5	3,1	0,3	1,2	0,9	2,3	0,3
	stanovení CEC a zastoupení kationtů na vyměnitelných místech											
	CEC _{Cu-VIS} (mmol ⁺ ·100 g ⁻¹)	CEC _{sum} (mmol ⁺ ·100 g ⁻¹)	Na ⁺ (%)	Ca ²⁺ (%)	K ⁺ (%)	Mg ²⁺ (%)						
BaM_2014	61,2 ± 2,0	74,7 ± 5,5	7	23	6	64						
BCV_2017	60,9 ± 1,1	64,4 ± 0,8	11	23	2	64						

Vliv vyměnitelného kationtu na klíčové geotechnické parametry byl studován na bentonitových formách připravených z bentonitu BCV (Na-, Ca- a směsné Na/Ca-). Citlivost geotechnických parametrů na zastoupení vyměnitelných kationtů klesala se vzrůstající objemovou hmotností ρ_d (volné bobtnání ~ první desítky kg m⁻³; mez tekutosti ~ první stovky kg m⁻³; součinitel

hydraulické vodivosti a bobtnací tlak $\sim 1300-1800 \text{ kg m}^{-3}$). Od objemové hmotnosti $\sim 1500 \text{ kg m}^{-3}$ nebyl pozorován žádný významný vliv vyměnitelného kationtu na geotechnické chování, viz Tab. 21.

Tab. 21 Shrnutí vybraných geotechnických charakteristik bentonitu BCV a z něho připravených forem; SI swell index, w_L mez tekutosti, k součinitel hydraulické vodivosti a σ_{sw} bobtnací tlak při dané objemové hmotnosti ρ_d

materiál	zastoupení dvojmocných kationtů ve výměnných pozicích, %	SI, ml/2 g	w_L , %	ρ_d , $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$k\cdot 10^{13}$, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	σ_{sw} , MPa
Na-BCV	20	22,8 ± 1,3	307,4 ± 4,9	1460	2,56	3,04
				1762	0,67	15,89
Na/Ca- BCV	56	18,2 ± 0,5	260,8 ± 4,2	1449	2,59	3,20
				1759	0,80	18,91
Ca-BCV	97	7,5 ± 0,5	137,7 ± 2,2	1443	2,85	2,22
				1774	0,56	20,23
BCV_2017	87	7,9 ± 0,5	140,2 ± 2,2	1471	2,26	3,72
				1803	0,46	24,31

Experimentální studium migrace radionuklidů

Pro migrační studie byl zvolen bentonit BaM. Byl použit jednak v jeho výchozí (surové) formě nebo byl pro studium vlivu vyměnitelného kationtu na difúzní chování upraven do homoionních forem (Na-, Ca-, příp. K- a Mg-). Byla studována migrace těchto specií:

- tritiované vody (HTO) představující neutrální konzervativní stopovač, který se standardně používá k charakterizaci bentonitu, zejména geometrického uspořádání pórového prostoru;
- jodidu jako zástupce anionických forem radioaktivních kontaminantů;
- stroncia jako předpokládaného analogu k radiu a jako zástupce kationických forem radioaktivních kontaminantů;
- cesia jako významného štěpného produktu ve VJP.

Během řešení projektu bylo rozhodnuto o rozšíření náplně této oblasti o porovnání experimentálních technik a prohloubení poznání mechanismů retardace během difúzního transportu). Proto byly jako další specie pro migrační experimenty vybrány:

- sodík, který byl použit v elektromigračních experimentech (Večerník et al. 2017a);
- radium ve formě izotopu ^{223}Ra (Kukleva et al. 2015);
- baryum jako prvek mezi Sr a Ra v II. A skupině k zhodnocení chemické analogie.

Významným výsledkem experimentálního studia migrace radionuklidů je poznatek, že stanovené hodnoty zdánlivých difúzních koeficientů HTO, jodidu, sodíku a stroncia v sodné a vápenaté formě bentonitu jsou srovnatelné. Z toho vyvozujeme, že charakter dominantního vyměnitelného kationtu neovlivňuje významněji geometrické uspořádání pórového prostoru, což je v rozporu s poznatky jiných autorů, které byly shrnuty v úvodní literární rešerši. Dalším významným výsledkem je zjištění, že hodnoty zdánlivých difúzních koeficientů pro aniontové a kationtové stopovače z difúzních experimentů s plošným zdrojem při rozdílných iontových silách (demineralizovaná voda a elektrolyt o iontové síle $0,1 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$) jsou srovnatelné, viz Tab. 22. Naše výsledky jsou tedy v rozporu s dosud přijímanou interpretací výsledků,

tzv. multiporozitní koncept, který předpokládá měnící se tloušťku difúzní dvojvrstvy a míru retardace se změnou iontové síly roztoku. Také indikují, že složení bentonitové pórové vody není výrazně ovlivněno roztokem použitým k nasycení vzorku.

Tab. 22 Výsledky difúzních experimentů s plošným zdrojem s ^{125}I a ^{22}Na na homoionních formách bentonitu; DW – demineralizovaná voda

homoionní forma BaM	kapalná fáze	$^{125}\text{I}^-$		$^{22}\text{Na}^+$	
		ρ_d , kg m^{-3}	$D_a \cdot 10^{10}$, $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$	ρ_d , kg m^{-3}	$D_a \cdot 10^{10}$, $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
Na-	DW	1395 ± 20	2,33 ± 0,28	1362 ± 19	1,41 ± 0,12
Na-	0,1 mol l ⁻¹ NaCl	1408 ± 17	2,43 ± 0,11	1413 ± 16	1,48 ± 0,15
Ca-	DW	1402 ± 24	2,43 ± 0,49	1395 ± 18	1,35 ± 0,14
Ca-	0,033 mol l ⁻¹ CaCl ₂	1399 ± 23	2,67 ± 0,21	1381 ± 20	1,38 ± 0,13

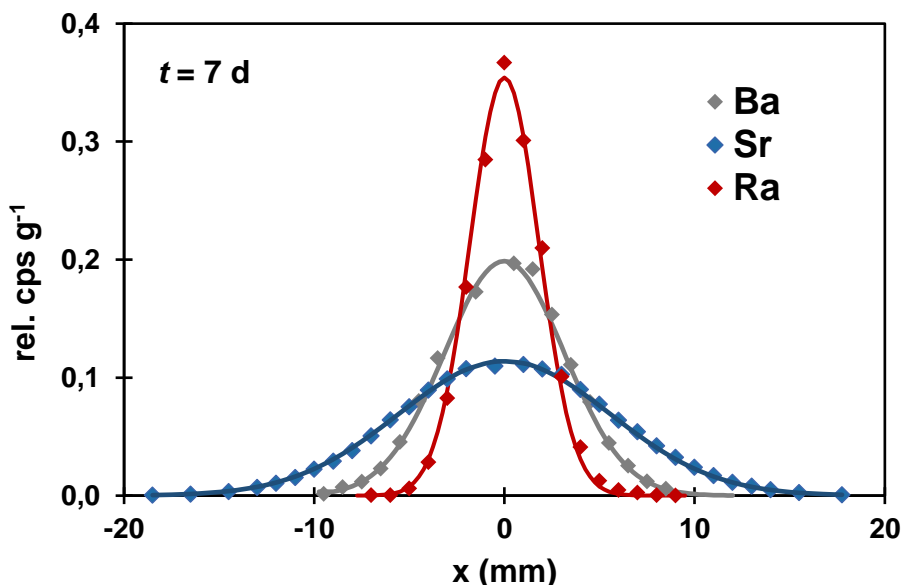
Na další nejasnosti v současném popisu a porozumění difúze nasyceným kompaktním bentonitem poukázaly i výsledky průnikových difúzních experimentů. Hodnoty efektivních porozit jodidu nebyly stejné, klesaly v pořadí K-BaM ≈ Ca-BaM > Mg-BaM > Na-BaM, ačkoliv iontová síla byla v experimentech záměrně volena stejná. V případě stroncia nebylo možné s výchozím fickovským difúzním modelem nasimulovat stejný průběh jako byl pozorován v experimentu, tedy výrazný pokles aktivity ve zdrojovém rezervoáru, plochý koncentrační profil a nevýrazný průnik do cílového rezervoáru. Kvalitativní nesoulad experimentálních dat s modelovým popisem, který vychází z fickovského přístupu k popisu difúzního transportu, byl také zjištěn pro cesium, který byl navíc závislý na koncentraci cesia. Proto bylo přikročeno k zavedení úpravy používaného difúzního modelu realizovaného v programovém prostředí GoldSim ve smyslu povrchové difúze (viz Procesní modely), pomocí kterého byly průnikové difúzní experimenty se stronciem a cesiem vyhodnoceny.

Důraz byl kladen dále na studium chování rozhraní bentonit-hornina simulovaného třemi syntetickými podzemními vodami, lišícími se typem vody (Ca-Cl, Ca-HCO₃ a Na-HCO₃). V souladu s výsledky studie vlivu vyměnitelného kationtu na difúzní chování nebyly pozorovány významné změny v hodnotách zdánlivých difúzních koeficientů HTO a jodidu v bentonitu nasyceném podzemními vodami. Nejvíce migračních experimentů bylo provedeno v prostředí referenční vody SGW2 s cílem získávat hodnoty parametrů popisující difúzi v podmínkách blízkých plánovanému českému hlubinnému úložišti. Ty pak sloužily pro aktualizaci sorpčních a difúzních parametrů pro bezpečnostní hodnocení (viz Aktualizace sorpčních a difúzních parametrů radionuklidů pro bezpečnostní výpočet). Z této oblasti lze považovat za nejvýznamnější stanovení a srovnání migračního chování analogů radia (stroncia a barya) s vlastním radiem. Rozdílné sorpční a difúzní chování prezentuje

Tab. 23 a Obr. 41. Za stejnou dobu trvání difúzního experimentu nejdále migrovalo stroncium. Radium bylo nejméně mobilní, což bylo ve shodě s výsledky sorpčních experimentů, kde bylo radium nejvíce zadržovaným kationtem. Přímé použití stroncia a barya jako analogů k rádiu se proto nejeví jako vhodné.

Tab. 23 Výsledky sorpčních experimentů s ^{85}Sr , ^{133}Ba a ^{223}Ra na bentonitu BaM ekvilibrovaném s vodou SGW2

studovaný kationt	$K_d \cdot 10^{-3}, \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
^{85}Sr	352 ± 14
^{133}Ba	701 ± 132
^{223}Ra	1692 ± 156



Obr. 41 Experimentální koncentrační profily po 7 dnech trvání difúzních experimentů s plošným zdrojem s ^{85}Sr , ^{133}Ba a ^{223}Ra na bentonitu BaM nasyceném SGW2 vodou proložené odpovídajícím analytickým řešením

V případě dalších studovaných rozhraní (korozní produkty-bentonit a bentonit-cementové materiály) byly již pozorovány změny v transportních vlastnostech bentonitu. Velmi tenká vrstva korozních produktů (pravděpodobně první desítky μm) ovlivnila průběh difúze jodidu přes studované rozhraní tím výrazněji, čím byla nižší objemová hmotnost bentonitu. V přítomnosti cementové vody byly na okrajích bentonitového bločku pozorovány změny v textuře bentonitu. Vznik alterované vrstvy také indikovalo rozdílné zastoupení vápníku a hořčíku na krajích a ve středu bločku. Vyšší distribuční koeficienty a pomalejší ustavování sorpce stroncia na bentonitu byly pozorovány v přítomnosti hydratovaného cementu a cementové vody než v přítomnosti podzemních vod.

Výsledky všech sorpčních a difúzních experimentů z tohoto projektu jsou uloženy v databázi transportních parametrů, vytvořené v programu MS Access, čítající přes 500 záznamů.

Procesní modely

V rámci řešení projektu byla také postupně naplňována databáze procesních modelů. Do databáze jsme, vedle realizovaných výpočetních postupů a programů, zahrnuli i teoretické postupy, které přispívají k tvorbě procesních modelů, zejména tehdy, pokud byly v rámci řešících pracovišť realizovány v nějakém programu či aplikaci. Dále jsme do databáze zařadili

i provedené aplikace, které byly použity při simulačním testování nově ověřených modelů, při modelování dílčích dějů a při vyhodnocování experimentů. Tento širší výčet metod, postupů, programů a jejich aplikací dosáhl 60 položek.

Těžištěm databáze jsou matematické postupy a programy, které analyticky a/nebo numericky řeší difúzní rovnici pro počáteční a okrajové podmínky odpovídající způsobům vedení difúzních experimentů. Na rozdíl od většiny autorů zabývajících se vyhodnocováním průnikových difúzních experimentů v homogenní vrstvě bariérového materiálu jsme se snažili popsat experimentální data trojího typu, která bylo možno získat z prováděných difúzních experimentů: průběh koncentrací v pracovních rezervoárech v čase a profil celkové koncentrace sledovaného nuklidu v difúzní vrstvě po skončení experimentu.

Pro vyhodnocování a modelování základních typů difúzních experimentů se v rámci řešení ZL podařilo rozvinout a široce aplikovat modelové popisy trojího druhu:

- analytické založené na řešení rovnic 1. a 2. Fickova zákona;
- numerické v rámci programového prostředí PhreeqC;
- numerické v rámci programového prostředí GoldSim.

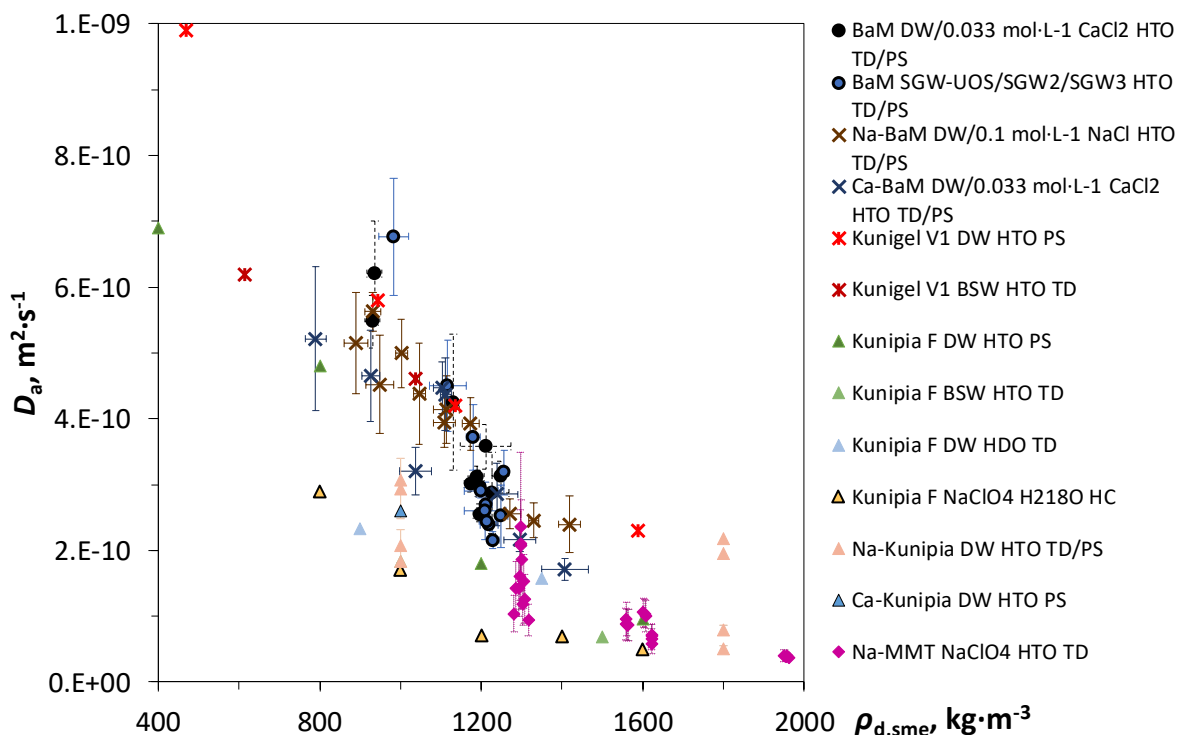
Ukázali jsme, že připravené modely všech tří typů spolu ve svých výstupech souhlasí a jsou vzájemně nahraditelné pro podmínky experimentů použitých v rámci ZL (průniková metoda a metoda planárního zdroje). Tato kompatibilita pomohla např. při odvození metody přímek pro jednu vrstvu i pro dvě navazující vrstvy, která je originálním výstupem, který dokáže eliminovat vliv oddělovacích filtrů při vyhodnocování reálných průnikových experimentů vedených do ustáleného stavu.

Osvojení si modelování difúze kationtů v neustáleném stavu modely připravenými v prostředí GoldSim s respektováním všech tří datových výstupů umožnilo vyhodnocovat reálné průnikové difúzní experimenty s kationty, jejichž migrace je ve vrstvě kompaktovaného bentonitu významně retardována. Na druhé straně vyhodnocování a modelování tohoto typu experimentů odhalilo, že v době ustavování ustáleného stavu nemá mnohdy difúze jednoduchý fickovský charakter (tedy není možné popsat transport ve vrstvě kompaktovaného bentonitu jedinou difúzní rovnicí s konstantní hodnotou retardačního koeficientu). V prostředí GoldSim byl následně realizován model, který uvažuje dvě paralelní difúzní prostředí (tzv. DTM model, který je obdobou modelu dvojí porozity či povrchové difúze), který umožňuje lépe proložit reálná experimentální data. Nefickovský charakter difúze v homogenní vrstvě kompaktovaného bentonitu se ukázal být realitou i při popisu difúzního transportu kationtů v prostředí PhreeqC pro případ, kdy je interakce sledovaného kationtu s bentonitem řízena iontovou výměnou a resp. i povrchovou komplexací. Navrhli jsme a realizovali postup umožňující pro oba zmíněné difúzní experimenty získat zjednodušený dvouparametrický popis difúze standardním difúzním modelem, který doporučujeme pro popis difúzního transportu v komplexním modelu úložiště.

Aktualizace sorpčních a difúzních parametrů radionuklidů pro bezpečnostní výpočet

V době konstrukce a provozu HÚ může být k dispozici jiný bentonit než ten, který byl experimentálně studován v této studii a v minulosti, a bude známo i konkrétní složení vod na zvolené lokalitě. Z tohoto důvodu byly nejdříve stanovené hodnoty parametrů popisující difúzi pro jodid, stroncium, radium a cesium porovnány s hodnotami pro bezpečnostní výpočet (Trpkošová et al. 2018b). Dále byly diskutovány možnosti přenosu zahraničních migračních parametrů pro nasycený a kompaktovaný bentonit na český koncept a podmínky HÚ. Naše

experimentální výsledky ukázaly, že hodnota zdánlivého difúzního koeficientu není významně závislá na externích podmínkách, zatímco hodnota efektivního difúzního koeficientu ano. Jedním z vhodných přístupů se proto jeví normalizace zdánlivých difúzních koeficientů na objemovou hmotnost smektitu, viz příklad na Obr. 42. Srovnávání pro další stopovače (jodid, stroncium, cesium) již naráželo na dostupnost, variabilitu a kvalitu zahraničních difúzních dat. S proměnlivostí efektivního difúzního koeficientu v závislosti na podmínkách v úložišti se při stávajících metodách bezpečnostního hodnocení úložiště (zatím) nepočítá.



Obr. 42 Normalizace na objemovou hmotnost smektitu pro hodnoty zdánlivých difúzních koeficientů vody v BaM, Na-BaM, Ca-BaM a dalších materiálech (Kunigel V1, Kunipia F a Na-montmorillonit) nasycených různými roztoky (DW – destilovaná/demineralizovaná voda; SGW-UOS, SGW2, SGW3 – syntetické granitické vody použité při studiu rozhraní bentonit-hornina, BSW – bentonitová syntetická voda) pomocí různých difúzních experimentů (TD – průniková difúzní metoda, PS – metoda plošného zdroje, HC – metoda polovičního bločku)

4.6.5.3 Nejistoty řešení ZL

Výběr materiálu z pohledu homogenity předurčuje kvalitu výstupních dat. Variabilita a neurčitosti získaných migračních, geochemických a geotechnických dat, které byly stanovovány na vzorcích malého měřítka, byly patrně ovlivněny nehomogenitou hustoty, a to v obou materiálech.

Na základě provedených migračních experimentů s homoionními bentonity vyvstává otázka, zda vápenatá forma je vhodným reprezentantem bentonitů z ložiska Černý vrch, kde dominantním vyměnitelným kationtem je hořčík. Pro všechny stopovače byly stanoveny nižší zdánlivé difúzní koeficienty na hořečnaté formě bentonitu oproti vápenaté formě.

Při aplikaci multiparametrické nelineární regrese složitějších modelových popisů (v prostředích GoldSim i PhreeqC) mohou vznikat neurčitosti v hodnotách parametrů, potřebných pro další

modelování. Při srovnávání se s výsledky jiných laboratoří je významným zdrojem neurčitostí zřejmě i nejednotnost v metodice vedení a vyhodnocování difúzních experimentů, zvláště tehdy, když se v preferování zájmu o jednoduchost popisu transportu pro účely PA potlačují poznatky naznačující potřebu aplikace komplexnějších popisů sorpce i difúze.

Stávající přístup charakterizace pole blízkých interakcí v oblasti transportních vlastností bentonitu pomocí dílčích parametrů v prostředí GoldSim přináší několik úskalí, např. lze zpochybnit správnost používání referenčních difuzivit při nekonečném zředění a distribučních koeficientů ze sorpčních experimentů pro popis difúzního transportu v kompaktovaném bentonitu. Nedořešena je zatím také implementace pozorovaného zrychleného transportu kationtů (např. vyvinutého modelu duálního transportu DTM) do obecnějších transportních kódů.

Pro zajištění dlouhodobé bezpečnosti HÚ by však měly být k dispozici takové modely, které dokáží chování radionuklidů v inženýrské bariéře kompaktovaného bentonitu spolehlivě predikovat. Obecně takový model zatím neexistuje. Velmi slibným modelem pro predikci hodnot efektivních porozit, resp. koeficientů iontové rovnováhy Ξ , se jeví tzv. *homogeneous mixture model*, HMM, (Birgersson 2017).

4.6.5.4 Návrh dalších prací

Pro navazující práce v laboratorním měřítku je zásadní zajistit dostatečné množství homogenního bentonitového materiálu či nastavit postupy vypořádání se s nehomogenitou hustoty a zajistit jeho charakterizaci s co nejmenšími nejistotami, zejména stanovení obsahu jílových minerálů ze skupiny smektitu. Vhodné by bylo zajistit i referenční materiál, nejlépe čistý montmorillonit, na kterém by byly prováděny stejné experimenty s cílem identifikovat vliv přídavných minerálů a testovat tak možnost škálování dat na objemovou hmotnost smektitu.

Vliv zastoupení hořčíku na migrační chování nebyl doposud dostatečně zkoumán. Z výsledků průnikových difúzních experimentů jodidu bylo patrné rozdílné chování vápenaté a hořečnaté formy. Významnost přítomnosti hořčíku byla také identifikována na rozhraní bentonit-cementové materiály, kdy patrně dochází k tvorbě brucitu měnícího transportní parametry bentonitu.

Na základě všech výsledků ÚJV, hodnot zdánlivých difúzních koeficientů nezávislých na podmínkách v externím roztoku, a vyšších hodnot efektivní porozity jodidu v K- oproti Na-systému, inklinujeme k HMM přístupu. Pro rozvoj tohoto modelu v budoucích letech doporučujeme z migračních metod difúzní experimenty s plošným zdrojem a pro získávání hodnot Ξ např. jednoduché saturační experimenty.

KJCH navrhuje se v navazujícím období hlouběji zabývat teoretickým popisem difúze kationtů i aniontů, jak s ohledem na možnost predikce hodnot charakteristických difúzních koeficientů potřebných pro účely PA (na základě vyhodnocení difúzních experimentů za specifických podmínek laboratorních experimentů), tak s ohledem na potřebu upřesnění podmínek přenosu výsledků zahraničních laboratoří pro účely doplňování české databáze transportních parametrů kompaktovaného bentonitu. Hlubší vhled do problematiky transportu specií sorbujících se iontovou výměnou by mohl přinést další práce s modelem duálního transportu DTM a také prohloubení funkcionalit modelu reálného difúzního experimentu, který byl připraven v prostředí geochemického programu PhreeqC.

4.6.5.5 Výstupy ZL

- BABOROVÁ L., VOPÁLKA D., VETEŠNÍK A., HOFMANOVÁ, E. (2016): Migration Behaviour of Strontium in Czech Bentonite Clay. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*. 4(3), 293-306.
- BABOROVÁ L., VOPÁLKA D., ČERVINKA R. (2018): Sorption of Sr and Cs onto Czech natural bentonite: experiments and modelling. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 318(3), 2257-2262.
- ČERVINKA R., VOPÁLKA D., BABOROVÁ L., BÁRTA J., BRÁZDA L., DRTINOVÁ B., HOFMANOVÁ E., KOČAN K., PATOČKA A., PECKOVÁ A., ROSENDORF T., ŠTAMBERG K., VETEŠNÍK A. (2019): Transport radionuklidů z úložiště / vstupní parametry a procesní modely pro hodnocení transportu radionuklidů přes inženýrské bariéry: 3. průběžná zpráva. – MS SÚRAO, TZ 352/2019, Praha.
- ČERVINKA R., VEČERNÍK P., KAŠPAR V., VAŠÍČEK R. (2018): Kompletní charakterizace bentonitu BCV 2017. Průběžná zpráva – Samostatná příloha. – MS SÚRAO, TZ 419/2019, Praha.
- ČERVINKA R., VOPÁLKA D., ADAM R., BABOROVÁ L., BRÁZDA L., DRTINOVÁ B., HOFMANOVÁ E., KITTNEROVÁ J., ROSENDORF T., ŠTAMBERG K., VETEŠNÍK A. (2016): Transport radionuklidů z úložiště / vstupní parametry a procesní modely pro hodnocení transportu radionuklidů přes inženýrské bariéry: 2. průběžná zpráva. – MS SÚRAO, TZ 51/2016, Praha.
- ČERVINKA R., VOPÁLKA D., ADAM R., BRÁZDA L., DRTINOVÁ B., HOFMANOVÁ E., KITTNEROVÁ J., RAMEŠOVÁ L. REIMITZ D., ŠIMÚTHOVÁ Z., ŠTAMBERG K., VETEŠNÍK A. (2015): Transport radionuklidů z úložiště / Vstupní parametry a procesní modely pro hodnocení transportu radionuklidů přes inženýrské bariéry: 1. průběžná zpráva. – MS SÚRAO, TZ 24/2015, Praha.
- ČERVINKA R., VOPÁLKA D. (2015): Transport radionuklidů z úložiště / Vstupní parametry a procesní modely pro hodnocení transportu radionuklidů přes inženýrské bariéry: Podrobný věcný a časový harmonogram prací. – MS SÚRAO, Technická zpráva, Praha.
- HOFMANOVÁ E., ČERVINKA R., VOPÁLKA D., BABOROVÁ L., BRÁZDA L., PECKOVÁ A., VETEŠNÍK A., VIGLAŠOVÁ E., VAŠÍČEK R. (2019): Transport radionuklidů z úložiště / vstupní parametry a procesní modely pro hodnocení transportu radionuklidů přes inženýrské bariéry: Závěrečná zpráva. – MS SÚRAO, ZZ 420/2019, Praha.
- HOFMANOVÁ E., ČERVINKA R., VOPÁLKA D., BABOROVÁ L., BRÁZDA L., PECKOVÁ A., VETEŠNÍK A., VIGLAŠOVÁ E., VAŠÍČEK R. (2019): Transport of radionuclides from the repository / Input parameters and process models for evaluation of radionuclide transport through engineered barriers – Final report. – MS SÚRAO, ZZ 420/2019/ENG, Praha.
- ROSENDORF T., HOFMANOVÁ E., VOPÁLKA D., VETEŠNÍK A. A ČERVINKA R. (2018): Comparative study of HTO diffusion on individual and coupled systems of compacted bentonite and fresh ordinary Portland cement paste, *Applied Geochemistry*, 97, 102-108.
- VAŠÍČEK R., HOFMANOVÁ E., SVOBODA J., ČERVINKA R. (2019): Geotechnická charakterizace homoionních forem bentonitu BCV 2017. Závěrečná zpráva. – MS SÚRAO, ZZ 425/2019, Praha.

4.6.6 Testování transportních modelů s využitím *in-situ* zahraničních experimentů (PB-2015-ZL-S1900-022-Transport4)

Hlavní autoři: Hokr M., Říha J. (TUL), Trpková D., Havlová V. (ÚJV), Vetešník A., Vopálka D. (FJFI ČVUT), Gvoždík L. (PROGEO)

4.6.6.1 Cíl ZL

Cílem tohoto dílčího projektu je validovat koncepční a počítačové modely transportu radionuklidů, vytvořené v prostředí GoldSim a Flow123d, případně dalších, s využitím dat poskytnutých ze zahraničních podzemních laboratoří.

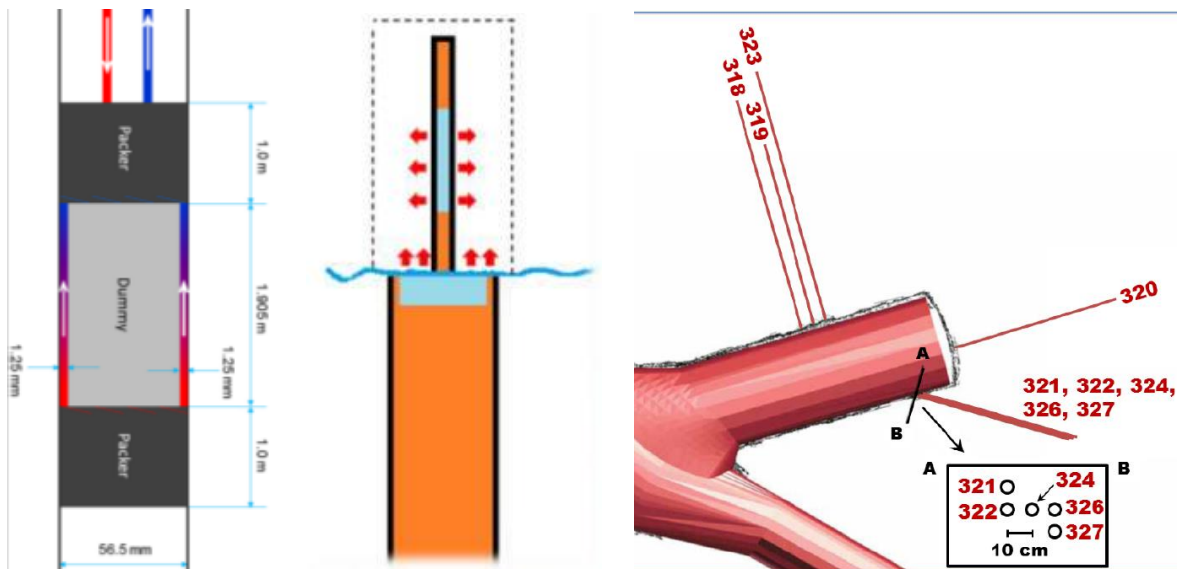
Studované experimenty a modely se soustředí na problematiku retenčních jevů v horninové matici působících na migraci radionuklidů advekcí v puklině (Obr. 43). Řešenou otázkou jsou odchylky experimentálních dat od modelů lineární difúze a sorpce v homogenním prostředí, což je často zároveň spojeno s rozdílným chováním difúze a sorpce v laboratorních a *in-situ* podmínkách, v závislosti na měřítku apod.

Konkretizované zadání modelových úloh a cíle řešení vycházely z mezinárodního projektu GWFTS, kde byly definovány takto:

- Task 9A: prediktivní výpočet experimentu WPDE (Water Phase Diffusion Experiment) v podzemní laboratoři ONKALO ve Finsku, proudění roztoku stopovačů ve štěrbině podél stěny vrtu v délce cca 2 m, ovlivněných difúzí do matrice s měřením průnikové křivky (Löfgren et al, 2015) (Obr. 43 vlevo).
- Task 9B: inverzní modelování experimentu LTDE-SD (Long Term Sorption Diffusion Experiment) v podzemní laboratoři Äspö ve Švédsku, difúzní průnik do matrice ze stěny vrtu a z přirozené pukliny s daty průběhu koncentrace v rezervoáru a vzorků horniny po obvrtní (Löfgren a Nilsson, 2015) (Obr. 43 uprostřed).
- Task 9C: prediktivní model experimentu TDE (Through-Diffusion Experiment) v ONKALO, difúze mezi jedním injekčním a dvěma monitorovacími vrtky v kolmém uspořádání (Löfgren et al, 2017) (Obr. 43 vpravo).
- Task 9D: syntetická úloha transportu advekcí a retenčními procesy v matici, v měřítku odpovídajícím hodnocení bezpečnosti, varianty s fiktivními stopovači, různým typem vstupu a se zjednodušenou reálnou rozpadovou řadou (Crawford, 2019).

4.6.6.2 Zhodnocení řešení projektu

Jednotliví spoluřešitelé se orientovali na aplikaci vybraného softwaru, případně koncepčního přístupu nebo numerického algoritmu, který pak byl opakovaně použit ve všech nebo vybraných úlohách 9A-9D. TUL použila vlastní vyvíjený Flow123d s využitím propojení 2D-3D resp. 1D-2D pro systém puklina-matrice, ÚJV použil GoldSim ve variantě s prvkem Pipe Pathway pro úlohy s transportem v puklině (9A, 9D) resp. v „diskretizační“ variantě Cell Net (9C), FJFI použila GoldSim ve variantě Cell Net (9A,9B,9C) a Pipe (9D) a PROGEO použilo MT3D pro vybrané úlohy vzájemného porovnání (2D geometrie puklina-matrice) a vedle toho NAPSAC (v rámci systému ConnectFlow a s návazností na další software) pro metodiku mikro-DFN pro úlohu 9B.



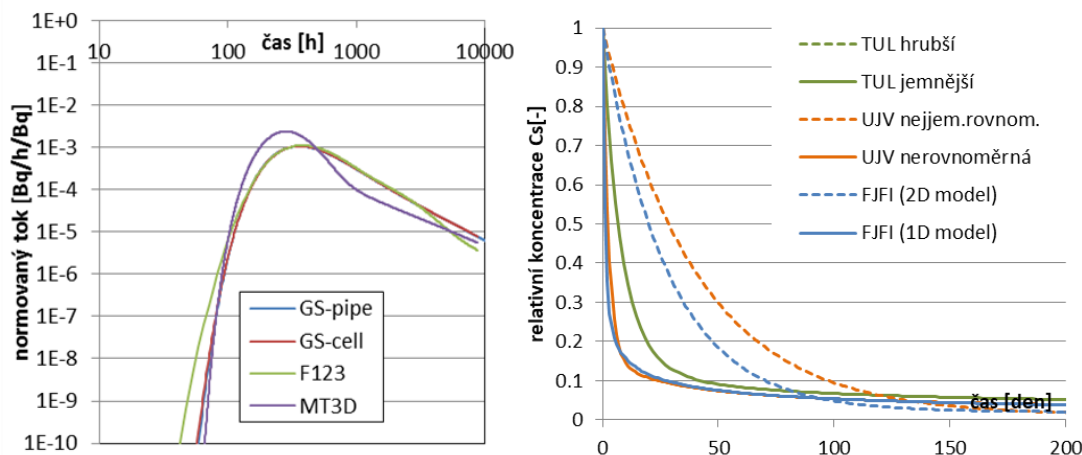
Obr. 43 Schémata experimentů, které byly základem pro modelové úlohy – zleva: WPDE pro Task 9A, LTDE-SD pro Task 9B a TDE pro Task 9C (vrty 326, 324, 327)

Ověřeny byly v rámci všech úloh 9A-9D mezi sebou modely jmenovaných řešitelů TUL, ÚJV, FJFI a PROGEO (Obr. 44). V případě rozdílů bylo vhodným zjemněním (pokud bylo možné, alternativně také zadáním nižšího distribučního koeficientu) vždy dosaženo přiměřené shody s uvážením rozdílů geometrie apod. Efekt je ukázán na Obr. 44 (MT3D na levém grafu a čárkované křivky na pravém) V rámci Task 9A provedl porovnání zahrnující všechny zahraniční řešitele J. Soler jako určený hodnotitel v rámci GWFTS a tyto výsledky jsou obsahem zprávy SKB (Soler et al, 2019) a zasláného vědeckého článku (Soler et al., 2020). U ostatních úloh proběhlo mezinárodní porovnání formou diskusí na schůzkách GWFTS.

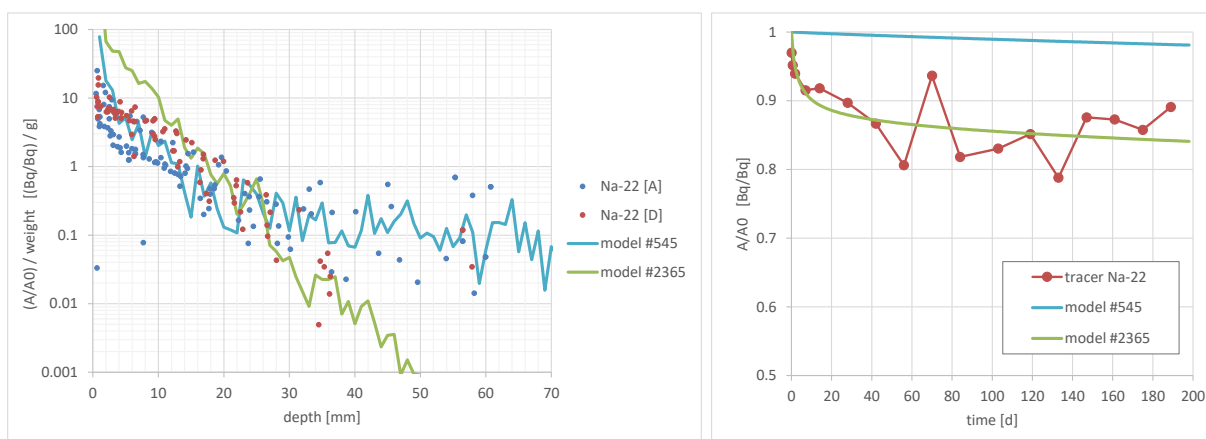
Výhodou výpočtu s prvky Pipe v GoldSim (resp. algoritmu založeného na analytickém řešení příčné difúze do matrice) je eliminace vlivu diskretizace, a tedy obvykle nejpřesnější řešení, za cenu omezení v geometrii oblasti a prostorové nehomogenitě (příčný směr z pukliny, homogenní matrice). Nepřesností vlivem diskretizace při silně sorbujících látkách trpí všechny modely založené na diskretizaci (GoldSim-CellNet, Flow123d i MT3D). Obecné 3D/2D modely Flow123d a MT3D mohou reprezentovat obecnou geometrii, zatímco u GS-CellNet je třeba uvažovat různá koncepční zjednodušení.

Nad rámec zadání v rámci GWFTS byla provedena inverzní analýza u experimentů WPDE a TDE po zveřejnění dat, která nebyla v čase zpracování predikčních modelů známá. U experimentu WPDE byl rozdíl v charakteru disperze ve štěrbině, což nebylo předmětem zkoumání. Poklesová část průnikové křivky vyjadřující difúzi do matrice obsahovala řadu nepravidelných pohybů a celkový trend bylo možné vystihnout změnou hodnot parametrů. U experimentu TDE bylo nutno použít rozdílné difúzní koeficienty pro dosažení shody s měřeními buď v injektážním, nebo monitorovacím vrtu (stopovače HTO a ^{36}Cl).

Jednotliví řešitelé dále aplikovali specifická vyhodnocení jako vliv diskretizace, volby numerického algoritmu, vlivu advekce, speciace prvků použitých jako stopovače, umělých zásahů do experimentu apod.



Obr. 44 Ukázka výsledků porovnání modelů – vlevo Task 9A průniková křivka pro mírně sorbující sodík, vpravo Task 9C koncentrace v injektážním vrtu pro silně sorbující stopovač cesium



Obr. 45 Příklad výsledky vyhodnocení dat LTDE-SD pomocí konceptu mikro-DFN: vlevo profil ve vzorku horniny (A – kolmo na puklinu, D – radiálně od stěny vrtu), vpravo průběh v injektážním rezervoáru

Stejně jako u dřívějších vyhodnocení experimentu LTDE-SD se potvrdilo, že měřená data charakterizující difúzní transport se sorpcí nelze v mnoha případech vysvětlit použitím standardních rovnic a laboratorně určených koeficientů. Inverzní modely byly realizovány v podobě nehomogenní matrice s různými koeficienty v závislosti na vzdálenosti od stěny vrtu jako předpokládaný efekt porušení např. vrtáním. Takto bylo možné ve většině případů získat výsledky modelu v souladu s měřením, ovšem s mnoha omezeními: často je určení nejednoznačné a zároveň získané koeficienty a polohy rozhraní nejsou přenositelné pro jiné případy.

Metodika mikro-DFN rovněž dokáže úspěšně vysvětlit měřená data (Obr. 45). Zdrojem dat nehomogenity v modelu jsou skutečná data mikrostruktury horniny z autoradiografických snímků a 3D mikrotomografie. Pro vyhodnocení byla použita data z dalších zdrojů –

experiment LTD a laboratorní experimenty ÚJV. Princip použití modelu je nejprve stochastické vygenerování sítě mikropuklin a následný převod na mikro-CPM model s odpovídající heterogenitou. Byly zpracovány varianty modelů s různými parametry mikro i makro puklin, případně s rozlišením minerálů.

Mezinárodní spolupráce přispěla jak formou dostupnosti velkého množství dat, tak hodnocením metodik a výsledků v širším kolektivu, včetně přímého porovnání výsledků většího počtu modelů různých řešitelů. Dle požadavků zadání bylo dosaženo v potřebné míře verifikace použitých simulačních kódů Flow123d a GoldSim pro uvažované jevy transportu radionuklidů v poměrně rozmanitých konfiguracích a zároveň detekovány kritické situace vyžadující pozornost a kontrolu řešení.

4.6.6.3 Nejistoty řešení ZL

Byť se jednalo o zdánlivě jednoduché úlohy (lineární rovnice, pravidelná geometrie), ukazuje se, že numerické algoritmy se mohou chovat komplikovaně a nepředvídatelně. Typické příčiny známé v numerické matematice lze identifikovat i v těchto úlohách: velké kontrasty koeficientů (projevuje se v případě sorpce nepřímo až v podobě prostorové bilance hmoty), prostorovém měřítku (dosah pronikání do matrice) a časovém měřítku (rychlost rozpadu versus rychlost transportu). Pro praktické použití modelů je tedy vždy vhodné provést alespoň ověření mezi dvěma variantami diskretizace nebo proti vhodnému referenčnímu případu (analytické řešení).

U většiny experimentálních dat bylo podstatnou nejistotou rozlišení zájmových fyzikálních jevů a artefaktů experimentů. Zejména pro experiment LTDE-SD (Task 9B) bylo zjištěno mnoho nesrovnalostí. Přitom byly v rámci diskusí mezinárodní skupiny řešitelů GWFTS prezentovány i protichůdné analogy – případy kdy „rychlé“ pronikání stopovače v malé koncentraci do větší hloubky lze pozorovat jako reálný jev i případy vysvětlení např. kontaminací vzorků nebo skladování. Mezi řešiteli nebylo dosaženo jednoznačných závěrů.

4.6.6.4 Návrh dalších prací

I po vyhodnocení uvedených experimentů zůstávají otevřené otázky vztahu difúzních a sorpčních koeficientů v laboratorních podmínkách a *in-situ*. Vliv prostorově omezeného porušení granitu (BDZ) se ukazuje jako použitelné vysvětlení pouze ve vztahu ke konkrétní případové studii, a tedy vyžaduje další experimentální zkoumání i hledání vhodných koncepčních modelů pro získání závěrů obecné platnosti. Experimenty je potřebné provádět s nezávislým měřením časových průběhů i prostorového rozložení, aby se omezila nejednoznačná interpretaci a určení transportních parametrů. Mikro-DFN modely se ukázaly jako perspektivní přístup umožňující vysvětlení jevů na základě fyzikálně založeného mikroskopického přístupu, praktická aplikace ale vyžaduje hlubší porozumění efektu jednotlivých vstupních dat pro zobecnění výsledků nad rámec jednotlivých vzorků a pro přenos dat do většího měřítko.

4.6.6.5 Výstupy ZL

HOKR M., TRPKOŠOVÁ D., VETEŠNÍK A., ŘÍHA J., HAVLOVÁ V., VOPÁLKA D., GVOŽDÍK L. (2015): Testování transportních modelů s využitím *in-situ* zahraničních experimentů. – MS SÚRAO, TZ 33/2015, Praha.

- HOKR M., TRPKOŠOVÁ D., VETEŠNÍK A., ŘÍHA J., HAVLOVÁ V., VOPÁLKA D., GVOŽDÍK L. (2016): Testování transportních modelů s využitím *in-situ* zahraničních experimentů, – MS SÚRAO, TZ 77/2016, Praha.
- HOKR M., TRPKOŠOVÁ D., VETEŠNÍK A., ŘÍHA J., HAVLOVÁ V., VOPÁLKA D., GVOŽDÍK L. (2017): Testování transportních modelů s využitím *in-situ* zahraničních experimentů. – MS SÚRAO, TZ 172/2017, Praha.
- HOKR M., TRPKOŠOVÁ D., VETEŠNÍK A., ŘÍHA J., HAVLOVÁ V., VOPÁLKA D., GVOŽDÍK L. (2020): Testování transportních modelů s využitím *in-situ* zahraničních experimentů. – MS SÚRAO, ZZ 480/2020, 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.
- SOLER J., NERETNIEKS I., MORENO L., LIU L., MENG S., SVENSSON S., TRINCHERO T., IRAOLA A., EBRAHIMI H., MOLINERO J., VIDSTRAND P., DEISSMANN G., ŘÍHA J., HOKR M., VETEŠNÍK A., VOPÁLKA D., GVOŽDÍK L., POLÁK M., TRPKOŠOVÁ D., HAVLOVÁ V., PARK D.-H., JI S-H., TACHI Y., ITO T. (2019): Evaluation and modelling report of Task 9A based on comparisons and analyses of predictive modelling results for the REPRO WPDE experiments, SKB Report R-17-10, Jan 2019.
- SOLER J., NERETNIEKS I., MORENO L., LIU L., MENG S., SVENSSON S., TRINCHERO T., IRAOLA A., EBRAHIMI H., MOLINERO J., VIDSTRAND P., DEISSMANN G., ŘÍHA J., HOKR M., VETEŠNÍK A., VOPÁLKA D., GVOŽDÍK L., POLÁK M., TRPKOŠOVÁ D., HAVLOVÁ V., PARK D.-H., JI S-H., TACHI Y., ITO T. (2020): Predictive modelling of a simple field matrix diffusion experiment. Is it so straightforward?, Submitted to Hydrogeology Journal.

4.6.7 Transport radionuklidů přes materiály na bázi cementu (PB-2015-ZL-S2368-024-Transport5)

Hlavní autoři: Večerník P., Brázda L., Galeková E., Havlová V., Hofmanová E., Kašpar V., Kolomá K. (ÚJV), Drtinová B., Bárta, J., Kittnerová J., Rosendorf, T., Vopálka D. (FJFI)

4.6.7.1 Cíl ZL

Cement a cementové materiály budou jedním z materiálů tvořících inženýrské bariéry budoucího hlubinného úložiště VJP a RAO. Použití těchto materiálů lze rozdělit na použití jako matrice RAO, těsnící a výplňové materiály, materiály ukládacích obalových souborů a materiály konstrukční. Při kontaktu cementových materiálů s vodou dochází vlivem loužení jejich složek k výraznému zvýšení pH vodního prostředí a změně jeho chemického složení. To může v důsledku znamenat negativní ovlivnění jak vlastností bentonitové bariéry, tak transportních vlastností (sorpce, difúze) radionuklidů uvolněných z ukládacích souborů, ve kterých bude uložen radioaktivní odpad.

Cílem tohoto ZL bylo stanovit transportní vlastnosti různých typů cementových materiálů s uvážením změny vlastností cementových materiálů v důsledku jejich stárnutí v prostředí úložišť radioaktivních odpadů a připravit databázi transportních vlastností cementových materiálů (difúze, sorpce, rozpustnost radionuklidů) pro bezpečnostní rozborů a také shromáždění relevantních informací, které zahrnují přehled o základních charakteristikách a

vlastnostech cementových materiálů, o jejich bezpečnostních funkcích či zařazení do konceptu HÚ, vlastnostech ve vztahu k migraci radionuklidů a shrnutí transportních vlastností cementových materiálů, relevantních pro podmínky České republiky.

Dle zadávacího listu, Dodatku 1 a Dodatku 2 tohoto dílčího projektu byly zadány a prováděny práce rozděleny do Etap 1-20 a byly řešeny na pracovištích ÚJV Řež, a. s. a FJFI ČVUT v Praze.

4.6.7.2 Zhodnocení řešení projektu

V experimentálních pracích projektu byly využívány následující materiály: cementy CEM I, CEM II/A-S a CEM III/B, beton Richard a beton ÚJV. Z jednotlivých cementů byly připraveny cementové pasty s poměrem vody k cementu $w/c = 0,5$ a směsi cementu a referenčního normového písku s hmotnostním poměrem 1:3 a poměrem $w/c = 0,5$ dle normy ISO 679:2009 (Večerník et al. 2016b, 2017a). Na základě Dodatku 1 a 2 ZL byly testovány směsi bentonitů BaM, B75 a BCV s cementy CEM II/A-S a CEM I, tzv. alternativní buffer materiály (Večerník et al. 2017b, 2019a, 2019b).

Pro difúzní experimenty byla z cementů a betonů připravena disková tělesa, sorpční a interakční experimenty byly prováděny na drcených materiálech různé zrnitosti.

Pro interakční kolonové experimenty byla použita syntetická granitická voda SGW2, která je vybraným zástupcem granitické podzemní vody. V difúzních experimentech byla jako kapalná fáze použita referenční pórová cementová voda RPCW2, která byla připravena ekvilibrací syntetické granitické vody SGW2 s portlanditem ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Vybrané sorpční experimenty byly prováděny v nasyceném roztoku $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Pro interakce směsných bentonit-cementových materiálů bylo zadavatelem požadováno použití syntetické granitické vody SGW3, která je vybraným zástupcem pro hlubší oběh podzemní vody.

Charakterizace materiálů

Cementové materiály byly studovány metodami jako jsou pyknometrická metoda, BET a rentgenová difrakce a FTIR, dále byla studována porozita metodou osychání (Večerník et al. 2017a) a metodou výměny vody v nasyceném vzorku za methanol (Večerník et al. 2019b) a pevnost v tlaku jako nejběžnější z destruktivních zkoušek.

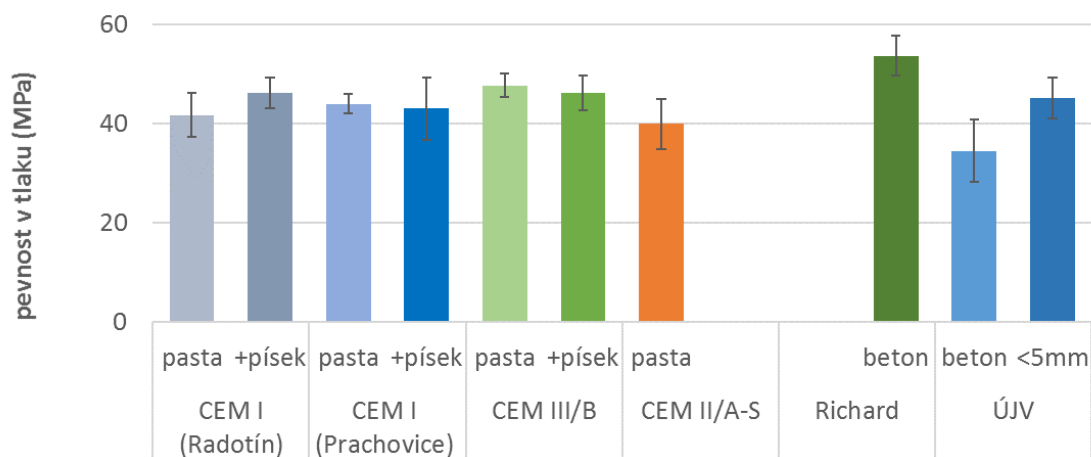
Hodnoty získané metodou osychání lze rozdělit do dvou skupin:

- 1) čisté cementové pasty, jejichž porozity se nezávisle na typu cementu pohybují pro poměr $w/c = 0,5$ v rozmezí od 33 do 36 %;
- 2) cementové směsi s pískem a betony kdy stanovené porozity dosahují hodnot od 14 do 19 %.

Hodnoty získané výměnou voda-methanol jsou pro vzorky betonů a cementových směsí s pískem porovnatelné s hodnotami získanými metodou nasycení a osychání. Jedinou výjimkou jsou vzorky směsi CEM II/A-S s pískem, kde ale došlo k nestandardnímu chování vzorků a výsledky tak nelze považovat za relevantní. U vzorků čistých cementových past CEM I a CEM II/A-S jsou hodnoty porozity získané výměnou voda za methanol vyšší než hodnoty z metody osychání, naopak tomu bylo u vzorku cementové pasty CEM III/B. Protože ale bylo proměřeno jen malé množství vzorků čistých cementových past (jeden až dva pro každý materiál), nelze z výsledků udělat jednoznačné závěry.

Na vzorku cementové pasty CEM II/A-S ($w = 0,6$) byla stanovena porozita také metodou rtuťové porozimetrie. Výsledná hodnota dobře koresponduje s hodnotou získanou z metody osychání. Tato metoda však není použitelná pro cementové směsi s pískem a pro betony, protože vzorek pro měření rtuťové porozity musí mít malé rozměry (v řádu mm) a materiál s kamenivem by proto byl příliš nehomogenní, pokud by se ho vůbec v daných rozměrech povedlo připravit. Další potenciální nevýhodou metody je použití vysokých tlaků rtuti, která by mohla porušit vnitřní jemnou strukturu pórů.

Z výsledků testů pevnosti v tlaku je patrné, že není významný rozdíl mezi jednotlivými typy cementů, a to ani pokud porovnáváme čistou vytvrdlou cementovou pastu nebo směs cementu s pískem. Významnější rozdíl v pevnosti směrem k vyšším hodnotám je možné vidět u betonu z ÚRAO Richard po 44 dnech zrání, naopak nejmenších hodnot pevnosti bylo dosaženo pro beton ÚJV s původním kamenivem a cementovou pastu CEM II po 3 měsících zrání (souhrnně viz Obr. 46). Provedené testy pevnosti používaly nenormová tělesa a výsledky testů jsou tedy považovány pouze za provozní pracovní výsledky, které poskytují pouze orientační hodnoty a jsou pouze podkladovou či doplňující informací pro další testy a analýzy.



Obr. 46 Pevnost v tlaku na vzorcích o rozměrech 50 × 50 × 50 mm

Modelování rozpustnosti radionuklidů v cementovém prostředí

Dle zadání ZL byly na základě rovnovážných termodynamických výpočtů určeny limity rozpustnosti vybraných prvků (U, Ra, Sr, Ca, Co, Cs, Ni) odpovídající vybraným relevantním radionuklidům pro bezpečnostní hodnocení úložiště radioaktivní odpadů (Večerník et al. 2017b). Znalost rozpustností kritických radionuklidů a jejich speciace je nutná pro zhodnocení jejich migrace do blízkého i vzdáleného pole interakcí. Pro modelování rozpustnosti prvků (radionuklidů) byl využit program PhreeqC 3.3.12, implementující programovací jazyky C++ a Python a termodynamická databáze ThermoChimie (verze 9b0). V modelových studiích byla použita jako vstupní roztok referenční pórová cementová voda RPCW2. Jelikož v reálném geologickém prostředí hlubinného úložiště lze očekávat teploty okolo 15 °C a v databázích jsou standardně uváděny termodynamické konstanty při 25 °C, byly veškeré výpočty provedeny při obou teplotách 15 a 25 °C.

Vápník ve svých stabilních izotopech je dominantním prvkem v celém systému, jeho koncentrace je definována rozpustností portlanditu ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) v referenční pórové cementové vodě RPCW2. S ohledem na jeho radioaktivní izotopy je třeba uvažovat i rychlost izotopové

výměny mezi radioaktivními a stabilními nuklidy vápníku. Mezi nejčastější rozpuštěné uranové formy patří hydroxokomplexy uranylu, především pak $(\text{UO}_2(\text{OH})_4)^{2-}$ a diuranátu sodného při Eh nižším než 0 mV, dalšími formami jsou $(\text{UO}_2(\text{OH})_3)^-$ a $((\text{UO}_2)_3(\text{OH})_7)^-$. Koncentrace radia v cementové vodě souvisí s koncentrací síranových iontů a může být také řízena procesem společného srážení s hlavními prvky systému, v našem případě hlavně Ca^{2+} , což vede k menším koncentracím rozpuštěného radia, než jsou předpovědi z rozpustnosti čistých pevných látek. Dominantní specií stroncia v roztoku je Sr^{2+} a $(\text{SrOH})^+$, přičemž limitní fází je minerál celestite (SrSO_4). Stejně jako u radia, je nutné brát v úvahu, že koncentrace stroncia v cementové vodě může být nižší vzhledem ke společnému srážení s hlavními prvky systému (Ca^{2+}). V roztoku je dominantní specií kobaltu neutrální $\text{Co}(\text{OH})_2$, dále jsou pak přítomny $\text{Co}(\text{OH})_3^-$ a stopové koncentrace hydroxokomplexů a limitující fáze je $\text{Co}(\text{OH})_2$. Dominantní specií niklu v roztoku jsou hydroxokomplexy a jako limitní fáze byl identifikován $\text{Ni}(\text{OH})_2$. Rozpustnost cesia je považována v modelovaném systému za bezlimitní, a to ve formě Cs^+ .

Difúzní experimenty

Difúzní experimenty byly prováděny metodou průnikového difúzního experimentu se stopovači ^3H , ^{14}C , ^{36}Cl a ^{125}I . Detailnější popis experimentů a vyhodnocení výsledků je uveden ve zprávách (Večerník et al. 2016b, 2017b, 2019a, 2019b, 2019c). Vyhodnocení difúzních experimentů na cementových materiálech je souhrnně uvedeno v Tab. 24.

Tab. 24 Aktualizované hodnoty efektivních difúzních koeficientů (ND = nebyl detekován průnik stopovače)

$D_e \cdot 10^{12}$ ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)	^3H	^{14}C (octan)	^{36}Cl	^{125}I ($10^{-4} \text{ mol l}^{-1}$)	^{125}I ($0,05 \text{ mol l}^{-1}$)
CEM I	(5,9 ± 0,7)	(1,99-2,70)	–	ND	–
CEM I + p	(2,3 ± 0,6)	(0,61-1,05)	–	ND	(2,8 ± 0,1)
CEM II/A-S (w/c = 0,6)	(11,3 ± 1,6)	–	(4,4 ± 0,1)	ND	–
CEM II/A-S (w/c = 0,5)	(3,7 ± 2,0)	(0,1-0,2)	–	ND	(2,8 ± 0,1) $\times 10^{-12}$
CEM II/A-S + p	(2,3 ± 1,2)	< 0,2	–	ND	(1,7 ± 0,1)
CEM III/B	(0,11 ± 0,06)	ND	–	ND	ND
CEM III/B + p	(0,045 ± 0,003)	ND	–	ND	ND
beton ÚJV	(1,0 ± 0,4)	–	(0,17 ± 0,06)	ND	(1,0 ± 0,1)
beton Richard	(0,37 ± 0,21)	–	(0,013 ± 0,002)	ND	–

Nejvyšší difuzivita tritia byla pozorována u cementové pasty CEM II/A-S s poměrem w/c = 0,6. Tento materiál vykazoval také nejvyšší porozitu. Přibližně poloviční až třetinové hodnoty

efektivních difúzních koeficientů pro ^3H byly stanoveny u vzorků z cementové pasty CEM I a CEM II/A-S s poměrem $w/c = 0,5$. Nižší hodnoty efektivních difúzních koeficientů u vzorků ze směsi cementu a písku a betonových vzorků pak korespondují s nižšími hodnotami porozity. Výrazně nižší hodnoty D_e pro ^3H byly pak vyhodnoceny pro vzorky z cementu CEM III/B (jak pro čistou pastu, tak pro směs s pískem). Tento pokles však již nelze vysvětlit pouze rozdílem v celkové porozitě, která se podle výsledků gravimetrického stanovení nijak zvlášť neodchyluje od ostatních sledovaných materiálů. Rozdíl by však mohl být v distribuci velikosti pórů (směrem k menším pórům) a tortuozitě. Difúzní experimenty se stopovačem ^{36}Cl byly provedeny pouze na prvotních materiálech navržených v tomto ZL, tj. pastě CEM II, betonu UJV a betonu Richard, přičemž byly vyhodnoceny difúzní koeficienty s řádovými poklesy v pořadí materiálů pasta CEM II > beton UJV > beton Richard (viz Tab. 24). K difúznímu průniku ^{14}C stopovače ve formě octanu na studovaných materiálech došlo jen v malé míře nebo nedošlo vůbec (vzorky z CEM III), nemohlo tedy prozatím dojít k plnohodnotnému vyhodnocení a experimenty dále pokračují. Při experimentech s ^{125}I s počáteční koncentrací jodidu $c_0 = 10^{-4} \text{ mol l}^{-1}$ nebyl zaznamenán průnik stopovače do cílového rezervoáru pro žádný z testovaných materiálů. V případě vzorků z cementů CEM I a CEM II/A-S byl však pozorován výrazný pokles aktivity ve zdrojovém rezervoáru během experimentu. V reakci na tyto výsledky byla přidána série experimentů, kdy počáteční koncentrace jodidu ve zdrojovém rezervoáru byla výrazně navýšena na $c_0 = 0,05 \text{ mol l}^{-1}$. Toto množství stopovače ve zdrojovém rezervoáru již bylo dostatečné, aby byla nasycená sorpční místa podél transportní dráhy vzorkem, takže již bylo možné pozorovat průnik stopovače do cílového rezervoáru. Hodnoty efektivních difúzních koeficientů pro jodid jsou za těchto podmínek srovnatelné s difúzí ^3H (viz Tab. 24).

Difúzní charakteristiky studovaných cementových materiálů lze shrnout:

- Materiály na bázi CEM III (pasta či beton Richard) vykazují pro ^3H o jeden až dva řády nižší hodnoty D_e (10^{-13} až $10^{-14} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) než materiály na bázi CEM I a CEM II ($10^{-12} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$).
- Difúze ^{14}C octanu probíhá na pastách CEM I obdobně rychle jako difúze ^3H , na pastě CEM II je již difúzní koeficient o řád nižší a na pastě CEM III nebyl v experimentech pozorován průnik stopovače. Difúze ^{14}C (hydrogen)uhlíčitanu není, s ohledem na srážení s vápenatými ionty, relevantní.
- Difúzní procesy s jodidovým stopovačem jsou ovlivněny interakcí (sorpce) s cementovými materiály, kdy při nízké koncentraci nosiče ($c_0 = 10^{-4} \text{ mol l}^{-1}$) nebyl zaznamenán průnik stopovače. Toho bylo docíleno až při koncentraci nosiče $c_0 = 0,05 \text{ mol l}^{-1}$. Hodnoty efektivních difúzních koeficientů pro jodid jsou za těchto podmínek srovnatelné s difúzí ^3H (viz Tab. 24).
- Difúzní koeficienty stopovače ^{36}Cl byly vyhodnoceny o půl až jeden řád nižší ve srovnání s hodnotami pro ^3H na materiálech CEM II, beton UJV a beton Richard (viz Tab. 24).

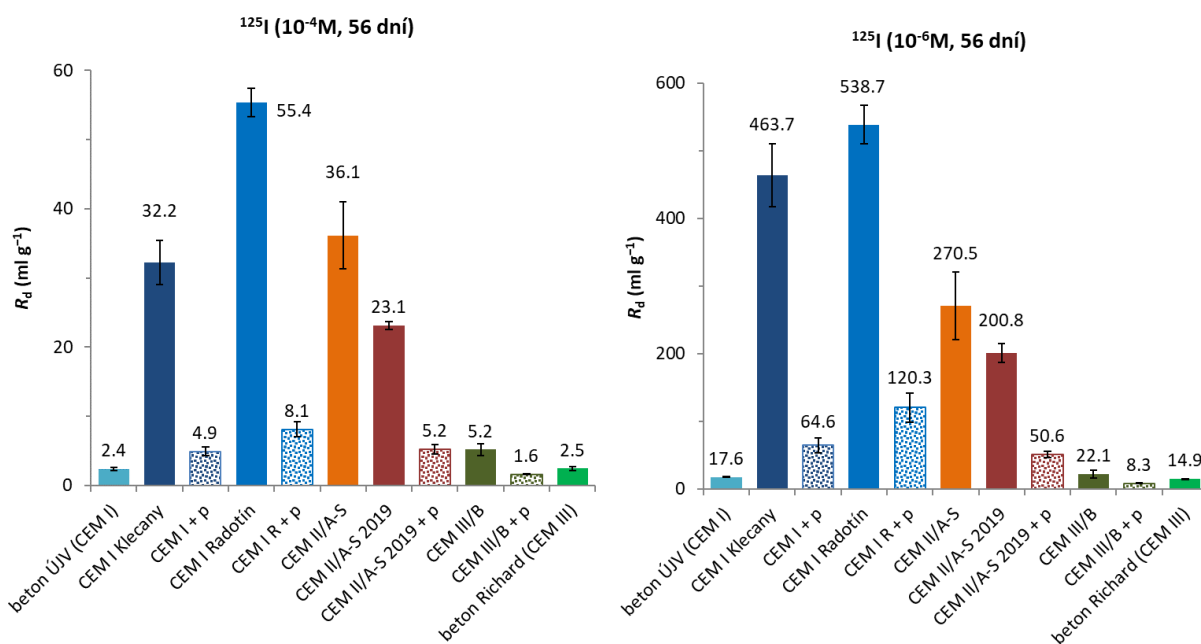
Sorpční experimenty

Sorpční experimenty byly prováděny pro doplnění k vybraným difúzním experimentům (se stopovači ^{14}C a ^{125}I) a jako samostatné experimenty se stopovači radiem, stronciem a uranem. Detailnější popis experimentů a vyhodnocení výsledků je uveden ve zprávách (Večerník et al. 2016b, 2017, 2019a, 2019b, 2019c).

Výsledky sorpčních experimentů se stopovačem $^{125}\text{I}^-$ dokazují, že cementové materiály mají potenciál v zachycení specií jódu, které se na jiné bariérové materiály, jako jsou horniny Českého masivu nebo bentonity, prakticky nesorbují. Nejvýrazněji se sorpce jodidu projevila na cementové pastě CEM I, kdy se hodnoty retardačních koeficientů pohybovaly v rozmezí desítek až stovek ml g^{-1} (viz Obr. 47), pro ostatní cementové materiály byly zjištěny hodnoty R_d v jednotkách až desítkách ml g^{-1} . Typ cementové fáze zodpovědný za sorpční schopnosti studovaných cementových materiálů nebyl identifikován.

V experimentech se stopovačem ^{14}C bylo ověřeno, že stopovač ve formě (hydrogen)uhlčitanu se stává v cementovém prostředí imobilním (srážení ve formě málo rozpustného uhlčitanu vápenatého), v experimentech používajících stopovač ve formě octanu bylo na materiálu CEM II dosaženo hodnot distribučního koeficientu v desetínách až jednotkách ml g^{-1} . Je možné předpokládat, že nenulových sorpčních koeficientů octanu bude dosaženo pro jakýkoli cementový materiál, použitý v HÚ, proto je nutno v bezpečnostních výpočtech zhodnotit míru konzervativního předpokladu pro vybrané radionuklidy a jejich chemické formy.

Studium sorpce uranu bylo silně limitováno rozpustností uranu v alkalickém prostředí v kombinaci se zvolenými analytickými metodami. Pro kapalnou fázi $0,03 \text{ mol l}^{-1}$ NaOH a poměry fází $V/m = 5, 100$ a 400 l kg^{-1} se hodnoty K_d pro U a CEM II pohybovaly v rozmezí 10^2 - 10^4 l kg^{-1} . Výsledky modelování srážení uranu v alkalickém prostředí se ale neshodují s experimentálně stanovenými údaji. Speciace Ca, Sr a Ra je v silně alkalickém prostředí velmi podobná, dominuje forma M^{2+} . Ve všech sorpčních experimentech byly podle výsledků modelování použity koncentrace nižší než součin rozpustnosti jednotlivých prvků. Stroncium se sorbuje téměř nezávisle na koncentraci nosiče ($3,5 \cdot 10^{-4}$ – $2 \cdot 10^{-3} \text{ mol l}^{-1}$), poměru fází 3-1000 l kg^{-1} a na typu cementového materiálu. Toto zjištění lze zdůraznit jako důkaz, že v provedených experimentech byla udržována izotopová rovnováha (^{85}Sr – stabilní izotopy ^{87}Sr a ^{88}Sr) a že absorpce Sr nebyla závislá na koncentraci. Hodnoty K_d leží v rozmezí 8–30 l kg^{-1} pro 90 % provedených dílčích experimentů. Významně se liší hodnoty pro systém obsahující NaOH v kapalně fázi, v němž byly hodnoty K_d až 7,5krát vyšší pro materiál CEM I a až 60krát pro CEM III. V případě studia sorpčního chování Ra (beznosičové experimenty) hodnoty K_d rostou s rostoucím poměrem fází V/m (l kg^{-1}) nezávisle na použité kapalně fázi (portlanditová voda nebo roztok NaOH o srovnatelném pH) a pohybují se pro všechny studované cementové materiály v rozmezí 43-580 l kg^{-1} v prostředí nasyceného Ca(OH)_2 a mezi 71-8160 l kg^{-1} v roztoku NaOH pro CEM I a CEM III. Velký rozdíl mezi hodnotami K_d v obou kapalných fázích je nejpravděpodobněji způsoben konkurencí Ca v případě použití portlanditové vody jako vstupního roztoku. Nárůst K_d s rostoucím V/m lze obecně připisovat záchytu mechanismem iontové výměny. Menší množství pevné fáze méně ovlivní změnu složení kapalně fáze (rozpuštění, iontová výměna makrosložek) a v roztoku je tedy menší koncentrace konkurujících iontů.



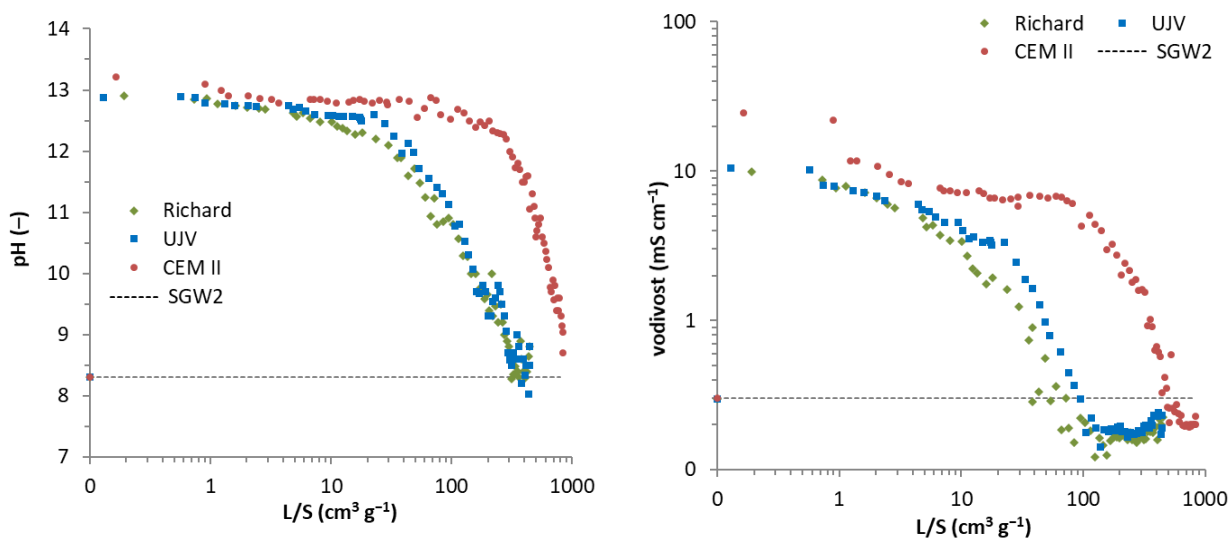
Obr. 47 Výsledky sorpčních experimentů s ^{125}I ve formě retardačních koeficientů při dvou různých počátečních koncentracích nosiče ($c_0 = 10^{-4}$ a 10^{-6} mol l⁻¹)

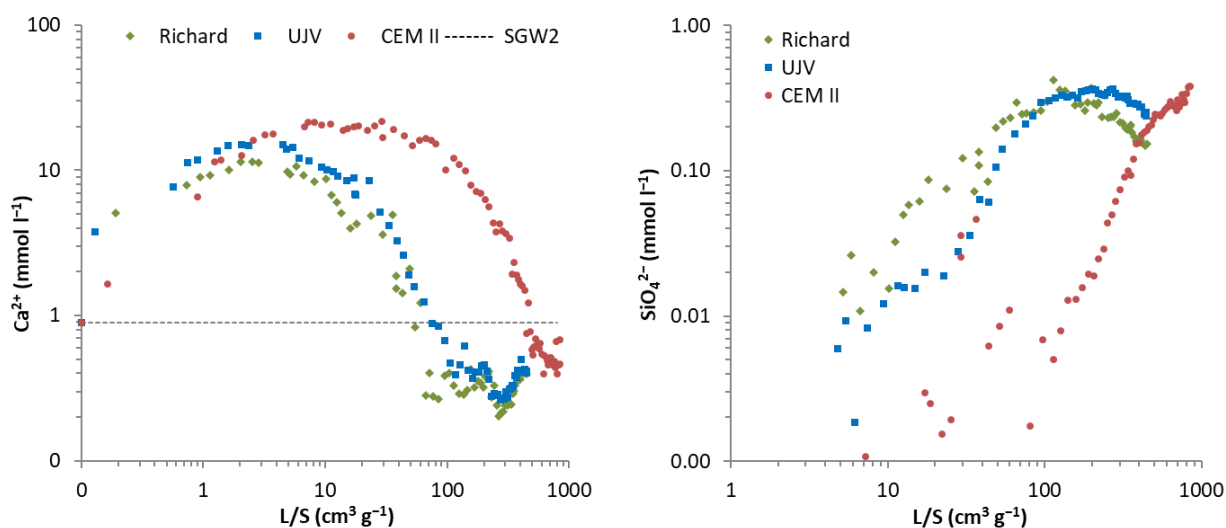
Sorpční charakteristiky studovaných cementových materiálů lze shrnout:

- U všech cementových materiálů dochází ke srážení anorganického ^{14}C stopovače ve formě uhličitanu vápenatého a tím k jeho imobilizaci. Užitím organického ^{14}C stopovače (octanu) bylo na pastě CEM II dosaženo hodnot K_d v desetinách až jednotkách ml g⁻¹. Je možné předpokládat, že nenulových sorpčních koeficientů octanu bude dosaženo pro jakýkoli cementový materiál.
- Nejvýraznější sorpce jodidu ^{125}I byla zaznamenána na pastě CEM I, kdy se hodnoty retardačních koeficientů pohybovaly v rozmezí desítek až stovek ml g⁻¹, pro pasty CEM II, CEM III a betony ÚJV a Richard byly zjištěny hodnoty R_d v jednotkách až desítkách ml g⁻¹. Identifikace cementové fáze zodpovědné za sorpční vlastnosti nebyla náplní provedených experimentů a měl by na ni být zaměřen další výzkum.
- Studium sorpčního chování uranu bylo omezeno jednak limitem rozpustnosti uranových fází a také analytickými technikami. Hodnoty K_d se pro sorpci U na pastě CEM II pohybovaly v rozmezí stovek až desetitisíců l kg⁻¹.
- Speciace Ca, Sr a Ra je v silně alkalickém prostředí velmi podobná, v sorpčních experimentech byly použity koncentrace nižší než součin rozpustnosti jednotlivých dominantních sloučenin. Stroncium při koncentraci nosiče ($3,5 \cdot 10^{-4} - 2 \cdot 10^{-3}$ mol l⁻¹) se sorbuje téměř nezávisle na poměru fází a typu cementového materiálu při K_d v rozmezí 8-30 l kg⁻¹. Při studiu sorpce Ra (beznosičové experimenty) hodnoty K_d rostou s rostoucím poměrem fází V/m (l kg⁻¹) nezávisle na použité kapalně fázi a pohybují se pro všechny studované cementové materiály v rozmezí desítek až stovek l kg⁻¹. Výraznější sorpce (až tisíce l kg⁻¹) bylo dosaženo při použití roztoku NaOH jako kapalně fáze, kdy byla v ekvilibrovaném roztoku snížena koncentrace konkurenčních vápenatých iontů.

Interakce cementových materiálů s podzemní vodou

Interakce cementových materiálů s podzemní vodou byly sledovány pomocí dlouhodobých kolonových experimentů, které v porovnání se statickým loužením lépe odpovídají představě průtoku podzemní vody prostorem úložiště. Byly testovány tři druhy materiálů – cementová pasta CEM II/A-S, beton ÚJV a beton Richard v interakci s vodou SGW2. V kapalně fázi vystupující z interakční kolony byly vyhodnocovány základní geochemické parametry (pH, vodivost) a chemické složení (koncentrace kationtů: Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Sr^{2+} , Mg^{2+} , Al^{3+} a aniontů: Cl^- , SO_4^{2-} , SiO_3^{2-} , OH^- , HCO_3^- , CO_3^{2-}). Popis uspořádání interakčních experimentů popis vyhodnocení a přehled výsledků je možné najít ve zprávách (Večerník et al. 2017b, 2019a, 2019b, 2019c). V grafech na Obr. 48 jsou pro studované materiály porovnány některé sledované parametry. Z grafů vývoje pH a vodivosti je patrný výrazný nárůst hodnot u všech tří materiálů ihned po zahájení experimentu. Tento efekt je způsoben počátečním loužením hydroxidů alkalických kovů (Na^+ , K^+), které následně přechází v rozpouštění portlanditu $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Jak postupně dochází k ubývání portlanditu v systému, dochází také k poklesu pH a vodivosti výluhu. Následně se z cementové matrice rozpouští CSH fáze, což se projeví v nárůstu koncentrace křemičitanů. Postupně dochází k poklesu koncentrace vápenatých iontů a vodivosti výluhu pod počáteční hodnoty (v grafech čárkované linie) v syntetické granitické vodě, což spolu s nízkými koncentracemi hořčnatých a hydrogenuhličitanových iontů indikuje zpětné srážení složek z SGW2.





Obr. 48 Porovnání hodnot pH, vodivosti, koncentrace vápníku a křemičitanů ve výluzích z kolonových experimentů

Po skončení interakčního experimentu byl materiál CEM II/A-S v koloně vysušen a rozdělen na šest dílů zhruba v poměru 1:2:3:3:2:1, odebraný materiál byl následně analyzován za účelem stanovení chemického složení (XRF) a fázového složení (XRD). Výsledky potvrdily, že došlo k vyloužení prakticky veškerého draslíku v celém objemu materiálu kolony. Naopak v případě hořčíku byla zaznamenána výrazná precipitace (patrně ve formě hydroxidu nebo uhličitanu). U síranů se jedná o kombinaci obou výše popsaných principů. V části kolony, kudy vtékal roztok SGW2, docházelo převážně k rozpouštění síranových aniontů, na opačném konci kolony (výtok) převažovala zpětná precipitace síranů z roztoku dříve obohaceného rozpouštěním. Pro vápník výsledky naznačují částečný úbytek po interakci s roztokem. Bilanci Ca zejména v počáteční fázi interakčního experimentu negativně ovlivňuje rozpouštění portlanditu $\text{Ca}(\text{OH})_2$, v pozdější fázi pak převládá srážení kalcitu CaCO_3 .

Směsi bentonitu a cementu – alternativní buffer materiály

Jako alternativní buffer materiály (ABM) byly testovány různé směsi bentonitů a cementů, nejvíce však směs bentonit BCV + cement CEM I. Protože bentonit-cementová směs s obsahem cementu 10 % vykazovala výrazně nižší propustnosti, jeví se jako vhodný materiál s izolační funkcí. Byly proto, kromě testů propustnosti, vývoje pH výluhu a vlivu na korozní procesy (společně se ZL Experimenty UOS), provedeny testy sycení a interakce s vodou SGW3 na vzorcích této směsi o různých suchých objemových hmotnostech (1300, 1400, 1500 a 1600 $\text{kg}\cdot\text{m}^3$). Z chemických analýz kapalných fází je patrné, že dochází ke vzájemné interakci ABM a SGW3. Pro koncentrace sodných iontů je patrné výrazné loužení do kapalné fáze a s množstvím proteklé kapalné fáze ustalování koncentrací Na^+ blízkým koncentracím ve vstupní SGW3. Stejný trend je vidět i pro draselné ionty, kdy je zaznamenáváno loužení do kapalné fáze a s množstvím proteklé kapalné fáze ustalování koncentrací K^+ je však patrné, že ABM je v probíhajícím experimentu stále konstantním zdrojem draselných iontů. U vápenatých iontů a celkového železa přítomného v interagované kapalné fázi se nijak výrazně nemění v čase a koncentrace přibližně odpovídají hodnotám ve vstupní SGW3 vodě. U analyzovaných aniontů se projevuje rychlé loužení chloridových iontů s ustálením

na hodnotách koncentrací vstupní SGW3 a pomalejší loužení síranových iontů, přičemž ABM stále v probíhajícím experimentu slouží jako zdroj síranových iontů.

4.6.7.3 Nejistoty řešení ZL

Dle zadání ZL a Dodatků byly jasně definovány studované cementové materiály. Tyto materiály jsou v současnosti používány při nakládání s RAO (zpracovávání v ÚJV a ukládání do ÚRAO Richard). Není definováno, jaké typy cementových materiálů budou používány v HÚ (typy cementů, přesné složení betonů, vyžadované parametry a jejich limitní hodnoty). Další nejistotou je dlouhodobá stabilita, chemický a mineralogický vývoj cementových materiálů v dlouhodobém horizontu. Materiály, které je možno dnes studovat jsou připravovány čerstvé, případně mohou být pár desítek let staré, pro dlouhodobé hodnocení bezpečnosti je nutno zohlednit vývoj vlastností cementových materiálů v čase. Další nejistota je dána časovým hlediskem např. některé z difúzních experimentů nebyly v průběhu řešení dokončeny, neboť nedošlo k průniku stopovače studovanými vzorky a je tedy v některých případech nutno počítat s experimentálními časy spíše v letech než v měsících.

4.6.7.4 Návrh dalších prací

Řešitelé ZL Transport radionuklidů přes materiály na bázi cementu (Transport 5) navrhují, aby další výzkum cementových materiálů pro potřeby HÚ byl zaměřen na následující oblasti:

- přesnou definici a vývoj cementových materiálů a směsí, které budou finálně použity v hlubinném úložišti, ať už jako konstrukční materiály, materiály inženýrské bariéry (zátky, betonkontejnery) nebo matrice pro ostatní typy RAO, které budou ukládány do HÚ;
- detailní charakterizaci vybraných cementových materiálů a jejich alterovaných stavů a degradačních produktů (mineralogie, mikrostruktura, chemismus, pevnostní charakteristiky...);
- interakce s kovovými materiály, a to jak s konstrukčními prvky v případě použití cementových materiálů v konstrukčních částech HÚ, tak s potenciálními odpady, ukládanými do cementového prostředí;
- studium jednotlivých čistých fází tvořících cementové materiály (zejména CSH fázi) pro lepší porozumění mechanismům zachytu radioaktivních kontaminantů na cementových materiálech a také jako vhodný vstup pro modelování rovnováh i transportu;
- další studium migračního chování současně zvolených i dalších vybraných kontaminantů a stopovačů vývoj chemismu různých typů vod po interakci s cementovými materiály a vývoj chemismu cementové pórové vody („young cement water“ vs. „equilibrated cement water“) na migrační chování kontaminantů;
- studium vhodných příměsí do cementů (aditiv), které by mohly výrazně ovlivnit nejen sorpční a difúzní vlastnosti těchto materiálů, ale i jejich fyzikálně-chemické parametry;
- ozařování cementových vzorků s následným studiem chemicko-fyzikálních a migračních parametrů, případně výzkum vlivu karbonátace;
- práce se starými cementovými materiály (zde bude obtížné nalezení vhodných vzorků, informací o jejich původních parametrech a jejich charakterizace) jako s antropogenními analogy recentních materiálů. Takové vzorky by lépe odpovídaly, či se alespoň více přiblížily stavu materiálu po stovkách let v hlubinném úložišti;

- pokračování studia vlastností bentonit-cementových směsí jako možného tlumícího materiálu v HÚ. Kromě studia chemicko-fyzikálních vlastností by měl další výzkum studovat vlastnosti geotechnické, strukturní a zejména transportní a migrační (tj. sorpci a difúzi) pro vybrané kontaminanty a stopovače;
- vliv přítomnosti cementových (alkalizujících) materiálů na okolní prostředí, zejména horninu.

4.6.7.5 Výstupy ZL

VEČERNÍK P., DRTINOVÁ B., ADAM R., BABOROVÁ L., BRÁZDA L., FILIPSKÁ H., HAVLOVÁ V., KITTNEROVÁ J., KOZEMPEL J., PODOJIL A., VOPÁLKA D., ZAVADILOVÁ A. (2016a): Transportní vlastnosti cementových materiálů. – MS SÚRAO, TZ 42/2016, Praha.

VEČERNÍK P., DRTINOVÁ B., BRÁZDA L., HAVLOVÁ V., KITTNEROVÁ J., KOLOMÁ K., KOZEMPEL J., PODOJIL A., ROSENDORF T., VIŠŇÁK J., VOPÁLKA D. (2016b): Transportní vlastnosti cementových materiálů – průběžná zpráva II. – MS SÚRAO, TZ 82/2016, Praha.

VEČERNÍK, P., DRTINOVÁ, B., BÁRTA, J., BRÁZDA, L., HAVLOVÁ, V., KITTNEROVÁ, J., KOLOMÁ, K., ROSENDORF, T., VOPÁLKA, D. (2017): Transportní vlastnosti cementových materiálů – průběžná výzkumná zpráva III. – MS SÚRAO, TZ 209/2017, Praha.

VEČERNÍK, P., DRTINOVÁ, B., BRÁZDA, L., HAVLOVÁ, V., KAŠPAR, V., KITTNEROVÁ, J., ŠUSTKOVÁ, E., VOPÁLKA, D. (2019a): Transportní vlastnosti cementových materiálů – průběžná zpráva IV. – MS SÚRAO, TZ 365/2019, Praha.

VEČERNÍK P., BRÁZDA L., HAVLOVÁ V., GALEKOVÁ E., HOFMANOVÁ E., KAŠPAR V. (2019b): Transportní vlastnosti cementových materiálů – průběžná zpráva V. – MS SÚRAO, TZ 428/2019.

VEČERNÍK P., DRTINOVÁ B., BÁRTA, J., BRÁZDA L., GALEKOVÁ E., HAVLOVÁ V., HOFMANOVÁ E., KAŠPAR V., KITTNEROVÁ J., KOLOMÁ K., ROSENDORF, T., VOPÁLKA D. (2019c): Transportní vlastnosti cementových materiálů – závěrečná zpráva. – MS SÚRAO, TZ 430/2019.

VEČERNÍK P., DRTINOVÁ B., BÁRTA, J., BRÁZDA L., GALEKOVÁ E., HAVLOVÁ V., HOFMANOVÁ E., KAŠPAR V., KITTNEROVÁ J., KOLOMÁ K., ROSENDORF, T., VOPÁLKA D. (2019c): Transport properties of cement materials – Final report. – MS SÚRAO, ZZ 430/2019/EN, Praha.

4.6.8 Hodnocení nejistot transportu radionuklidů z hlubinného úložiště (PB-2016-ZL-S0744-028-Transport6)

Hlavní autoři: A. Vetešník, Vopálka D. (FJFI ČVUT)

4.6.8.1 Cíl ZL

Cílem tohoto dílčího projektu byla analýza neurčitosti a citlivosti modelu transportu ^{14}C z hlubinného úložiště ostatních radioaktivních odpadů (nepřijatelných do přípovrchových úložišť) do biosféry. Cílem těchto analýz bylo kvantifikovat vliv neurčitosti vybraných vstupních parametrů na celkovou neurčitost sledovaných výstupů, a tím identifikovat kritické parametry. Konkrétně byl analyzován vliv osmi parametrů; čtyř parametrů zdrojového členu: rychlosti loužení, rozpustnosti, inventáře a objemu volné vody v kontejneru a čtyř parametrů blízkého pole: K_d výplňového materiálu, porozity výplňového materiálu a granitu v okolí ukládací komory a ekvivalentního difúzního toku do proudící vody v puklině.

4.6.8.2 Zhodnocení řešení projektu

V rámci projektu byl navržen a v programovém prostředí GoldSim implementován 1-D model transportu ^{14}C . Neurčitost sledovaných výstupů modelu a citlivost těchto neurčitostí na hodnoty vstupních parametrů byly analyzovány pomocí vybraných metod neurčitostní a citlivostní analýzy. V průběhu vývoje modelu byla použita screeningová metoda založená na intervalové analýze, v konečné fázi analýzy jsme použili metodu založenou na četnostním přístupu popisu neurčitosti.

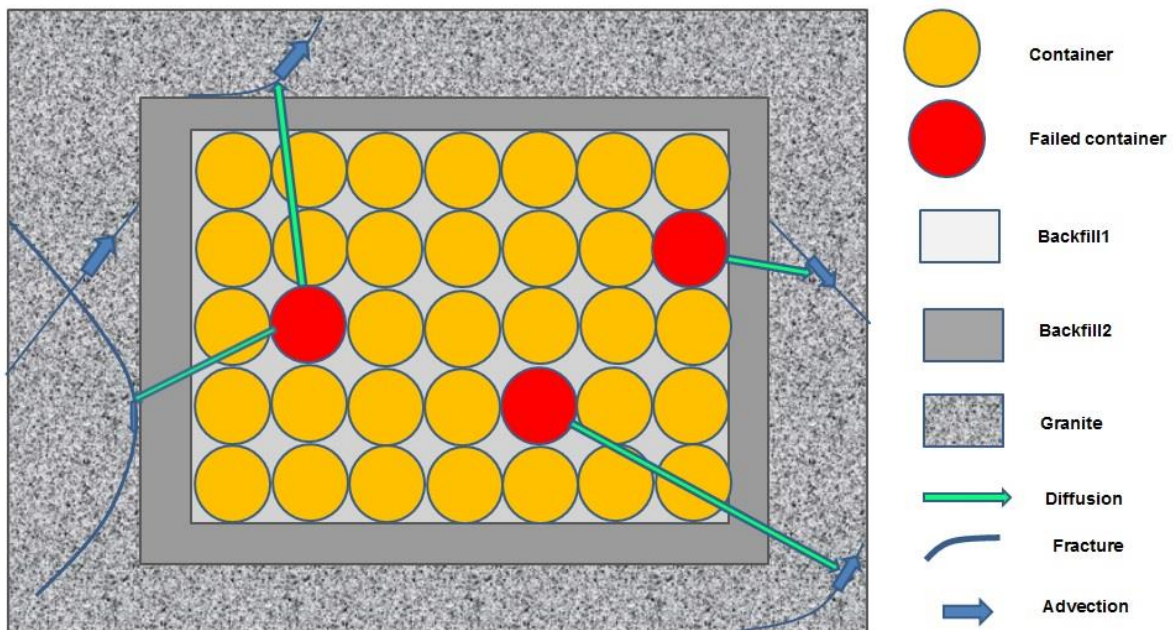
Studie ukázaly, že z parametrů zdrojového členu má pro obě formy ^{14}C největší vliv rychlost loužení a následně inventář. Pro posouzení vlivu parametrů blízkého pole je potřeba rozlišit mezi formami ^{14}C . Rozptyl toku sorbující anorganické formy ^{14}C do geosféry je způsoben rozptylem hodnot K_d výplňového materiálu. V případě nesorbující organické formy ^{14}C je tok do geosféry omezen zejména malou porozitou granitu a/nebo difúzním tokem do proudící vody v puklině.

Jako alternativu jsme implementovali model zohledňující transport v částečně saturovaném prostředí. Funkčnost implementace jsme ověřili řešením úlohy, která se zabývala transportem CH_4 . Výsledky ukázaly, že díky velkým hodnotám difuzivity v plynu a Henryho konstantě určující rozdělení v plynné a kapalně fázi je difúzní tok CH_4 v plynné formě významný i pro relativně velké saturace prostředí.

Při návrhu konceptuálního modelu jsme vyšli z předpokladu, že po selhání obalu vnitřního kovového sudu dojde k transportu ^{14}C , který bude z hlubinného úložiště ostatních RAO migrovat v kapalně a plynné fázi do geosféry a následně i do biosféry. Příspěvek jednotlivých forem ^{14}C k celkovému toku bude záviset na saturaci hostitelského prostředí vodou, chemickém složení horniny a podzemní vody, a dále na termodynamických a případně dalších podmínkách. V první fázi implementace modelu jsme se omezili na modelování transportu v kapalně fázi. Do modelu byly zavedeny dvě formy ^{14}C : anorganická a organická, pro tyto formy byly navrženy na základě literární rešerše potřebné parametry.

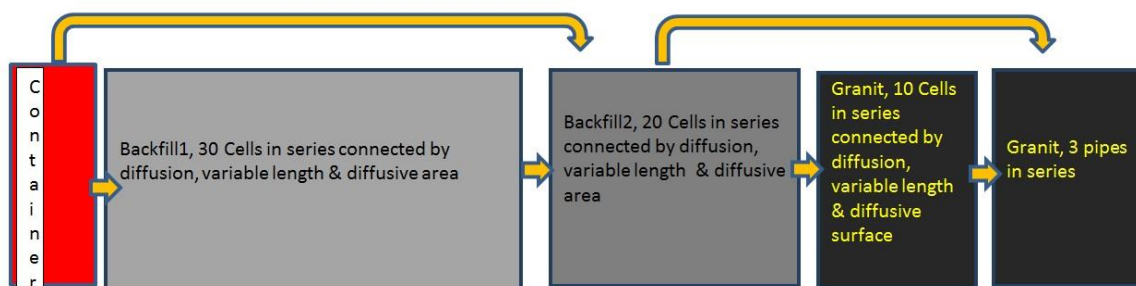
Pro navržení konceptu transportního modelu bylo nutné přihlídnout k možnostem programového prostředí GoldSim (GoldSim Pro + RT, Desktop Standalone, Verze 11.1.6) (Catlett 2014, GoldSim 2014). Difúzní transport v GoldSim je možné implementovat pomocí konečně objemového přístupu; elementární objemy jsou v GoldSim prezentovány pomocí elementů *Cell Pathway*. GoldSim je koncipován pro práci se sítí cel, která se skládá z relativně malého počtu elementů *Cell Pathway* (do tisíce).

Navržený koncept je zobrazen na Obr. 49. V tomto konceptu byla zohledněna lokalizace zdroje, která může zvýšit difúzní tok. RAO byly soustředěny do jednoho zdroje, v modelu reprezentované jedním elementem *Source*, který představuje jeden kontejner. Po selhání obalu kontejneru dojde k migraci difúzním transportem do okolního výplňového materiálu té části RAO, která je uvolněna do volného objemu v kontejneru. Radionuklidy migrují difúzí směrem k puklinám v horninovém prostředí. Tento difúzní transport jsme reprezentovali pomocí 1D sítě elementů *Cell Pathway*, které jsou vzájemně propojeny difúzním transportem. Difúzní plochy a délky mezi sousedními elementy *Cell Pathway* jsou nastavitelné. Model tak umožňuje studovat planární, sférickou, cylindrickou nebo i obecnější geometrii. Abychom umožnili zohlednit heterogenní povahu materiálových vlastností transportní cesty, byla cesta složena ze tří částí, z nichž každá reprezentuje různý materiál, přičemž difúzní cesta v každé části je reprezentována vlastní podsítí elementů *Cell Pathway*.



Obr. 49 Konceptuální model zohledňující vliv lokalizace zdroje. Směr difúze je označen hrubě přes neporušené sudy. Konceptuální model ovšem uvažuje difúzní transport v meziprostoru mezi neporušenými kontejnery

Na Obr. 50 je zobrazeno schéma implementovaného modelu. Žluté šipky označují směr difúzního toku, horní přemostující šipky označují možnost neuvažování transportu v částech transportní cesty *BackFill1* anebo *Granit*. Tím vznikl flexibilní model umožňující řešit širokou škálu transportních úloh.



Obr. 50 Schéma implementace alternativního konceptuálního modelu v prostředí GoldSim

Na začátku projektu byl vymezen soubor vstupních neurčitých parametrů, které měly být uvažovány v rámci neurčitostních a citlivostních analýz, přičemž každému parametru byla přiřazena, minimální, maximální a střední hodnota. Z tohoto souboru byly vybrány podsoubory parametrů a byl studován vliv změn jejich hodnot na sledované výstupy pomocí neurčitostní a citlivostní analýzy. Protože jsme se v rámci řešení celého projektu hlouběji zabývali vývojem modelu zdrojového členu a blízkého pole, zaměřili jsme se zejména na vliv parametrů těchto částí transportního modelu.

Jedna z provedených studií se zaměřila na parametry zdrojového členu: rychlost loužení, rozpustnost a inventář; vliv objemu volné vody v kontejneru jsme na základě předchozích zkušeností zanedbali. Pro neurčitostní a citlivostní analýzu jsme použili metodu založenou na četnostním přístupu popisu neurčitosti. Ve studii jsme uvažovali log-rovnomořné rozdělení hodnot, mezi sledované výstupy patřily: časový vývoj transportu dostupné hmoty anorganické formy ^{14}C , koncentrace této formy v kontejneru, toky na rozhraní kontejner - první cela Backfill1 a na rozhraní poslední cela *Granit - Pipe1*. Celkem bylo provedeno v rámci této studie $(2+3) \times 2^9 = 2560$ simulací. Z časových průběhů citlivostních měř vyplývá, že v oblasti maximálních hodnot koncentrací ve volné vodě kontejneru má největší vliv rychlost loužení. Na časovém intervalu 10^4 - 10^5 let, kdy dochází k poklesu sledovaných veličin, má největší vliv na rozptyl parametr inventář v jednom UOS. Rozpustnost má spíše minoritní vliv.

V navazující studii jsme se zaměřili na vliv čtyř transportních parametrů blízkého pole: K_d výplňového materiálu anorganické formy ^{14}C , porozity výplňového materiálu a granitu v okolí ukládací komory a ekvivalentního difúzního toku do proudící vody v puklině. Protože je možné na intervalu 10^2 - 10^4 let považovat koncentraci ve zdrojovém členu zhruba za konstantní, analyzovali jsme pro pochopení závislosti hodnot toků polem blízkých interakcí na sledovaných parametrech zjednodušený případ konstantních toků, který dovoluje vyjádřit závislost toků na sledovaných parametrech analyticky. V tomto zjednodušeném případě jsme zanedbali radioaktivní rozpad a uvažovali jsme migraci dvěma rovinnými vrstvami o ploše A při konstantním zdroji na počátku první vrstvy reprezentující současně *Backfill1* a *Backfill2*. Jako hraniční podmínku na konci druhé vrstvy, která reprezentuje *Granit*, jsme uvažovali definovaný ekvivalentní tok do proudící pukliny. Konstantní tok, F , můžeme za těchto podmínek vyjádřit ve tvaru

$$F = AC_0 \frac{\varepsilon_1 D_1 \varepsilon_2 D_2 Q_{\text{eq}}}{(\varepsilon_1 D_1 L_2 + \varepsilon_2 D_2 L_1) Q_{\text{eq}} + A \varepsilon_1 D_1 \varepsilon_2 D_2} \quad (4.6.8.-1)$$

kde C_0 je konstantní vstupní koncentrace, $\varepsilon_{1,2}$ jsou porozity vrstev, $D_{1,2} = G_{1,2} D_w$ jsou difúzní koeficienty v pórech a $L_{1,2}$ jsou délky vrstev. Pro $Q_{\text{eq}} \gg (A \varepsilon_1 D_1 \varepsilon_2 D_2) / (\varepsilon_1 D_1 L_2 + \varepsilon_2 D_2 L_1)$ přechází vztah (4.6.8.-1) ve tvar

$$F \approx AC_0 \frac{\varepsilon_1 D_1 \varepsilon_2 D_2}{\varepsilon_1 D_1 L_2 + \varepsilon_2 D_2 L_1}, \quad (4.6.8.-2)$$

který odpovídá konstantnímu toku při nulové koncentraci na konci druhé vrstvy. V takovém případě nemá Q_{eq} vliv na hodnotu konstantního toku. Dále, díky malé hodnotě porozity granitu může platit $\varepsilon_1 D_1 L_2 > \varepsilon_2 D_2 L_1$, tok F je pak determinován zejména porozitou prostředí *Granit*; granitová vrstva je díky své malé porozitě hlavním omezujícím činitelem difúzního toku. Pokud naopak $Q_{\text{eq}} \ll (A \varepsilon_1 D_1 \varepsilon_2 D_2) / (\varepsilon_1 D_1 L_2 + \varepsilon_2 D_2 L_1)$, je F možné aproximovat jako,

$$F \approx C_0 Q_{\text{eq}}, \quad (4.6.8.-3)$$

Q_{eq} má rozhodující vliv na hodnotu konstantního toku vrstvami.

Abychom ilustrovali výsledky a rozsah platnosti analytického řešení, provedli jsme dvě numerické studie, které se lišily rozsahem hodnot Q_{eq} . V prvním případě bylo Q_{eq} uvažováno z intervalu možná až nerealisticky vysokých hodnot (10^7 - 10^{10}) l rok $^{-1}$, tak aby Q_{eq} nemělo vliv na hodnotu konstantního toku na rozhraní *Granit - Pipe1* (rovnice (4.6.8.-2)). V druhém případě jsme naopak uvažovali Q_{eq} z intervalu malých hodnot (10^{-2} - 10^1) l rok $^{-1}$, tak aby Q_{eq} omezovalo hodnotu konstantního toku. Pro neurčitostní a citlivostní analýzu jsme použili

metodu založenou na četnostním přístupu popisu neurčitosti. Ve studii jsme uvažovali rovnoměrné (porozita vrstvy *Backfill1,2*) a log-rovnoměrné rozdělení hodnot (K_d výplňového materiálu, porozita vrstvy *Granit*, Q_{eq}), v každé studii jsme provedli $(2+4) \times 2^9 = 3070$ simulací.

V případě anorganické formy ^{14}C a pro první případ Q_{eq} je rozptyl hodnot koncentrací způsoben především K_d výplňového materiálu a částečně porozitou výplňového materiálu; v důsledku velké hodnoty K_d výplňového materiálu tok na rozhraní *Granit - Pipe1* nedosahuje stacionárního stavu a není možné použít vztah (4.6.8.-2). V případě organické formy ^{14}C a pro první případ Q_{eq} tok dosahuje stacionárního stavu a závislost rozptylu jeho hodnot odpovídá výsledkům analytického řešení (4.6.8.-2). Rozptyl hodnot toku závisí především na porozitě granitu a částečně na porozitě výplňového materiálu. V případě anorganické formy ^{14}C a pro druhý případ Q_{eq} má rozptyl hodnot Q_{eq} malý vliv na rozptyl hodnot sledovaných veličin, který je způsoben především rozptylem hodnot K_d výplňového materiálu. V případě organické formy ^{14}C a pro druhý případ Q_{eq} závisí tok na rozhraní *Granit - Pipe1* především na rozptylem hodnot Q_{eq} podle vztahu (4.6.8.-3).

Pro ověření implementace transportu v částečně saturovaném prostředí jsme řešili dvě úlohy, které se zabývaly transportem CH_4 . V první úloze jsme uvažovali saturační faktor $S_w = 0,5$, geometrický faktor pro plynnou fázi jsme vypočítali jako $G_g = 0,66\varepsilon(1-S_w)$, kde ε je porozita. V důsledku velké hodnoty referenční difuzivity v plynné fázi a hodnotě Henryho konstanty, která určuje rozdělení v plynné a kapalně fázi, převyšuje tok v plynné fázi tok v kapalně o čtyři řády. V druhé úloze jsme uvažovali saturační faktor $S_w = 0,999$. V důsledku velké hodnoty saturace převyšoval tok v kapalně fázi tok v plynné fázi.

4.6.8.3 Nejistoty řešení ZL

Hlavním úkolem tohoto projektu bylo zhodnocení vlivu neurčitosti parametrů ovlivňujících transport ^{14}C a případně dalších mobilních radionuklidů z hlubinného úložiště ostatních radioaktivních odpadů nepřijatelných do přípořchových úložišť. Pro tento úkol jsme vytvořili model, který je založen na předpokladu, že v několika kontejnerech bude uložena převážná část množství ^{14}C připadajícího na jeden úložný prostor. Koncentrace zdroje komplikuje ovšem transportní úlohu; v případě uložení kontejneru s kritickým množstvím ^{14}C do středu úložného prostoru, představují okolní sudy a výplňový materiál pro jeho transport do geosféry heterogenní prostředí. Pro přesný popis transportu takovým prostředím je nutné použít podrobný popis, který není možné implementovat v GoldSim. Implementovaný 1-D transportní model složený z několika vrstev materiálu odpovídá velmi konzervativnímu scénáři, ve kterém je kontejner s kritickým množstvím ^{14}C uložen v bezprostřední blízkosti geosféry s hydraulicky vodivou puklinou. Získané toky tak mohou být nadhodnocené.

4.6.8.4 Návrh dalších prací

Snížení rozptylu vypočtených toků ^{14}C by bylo možné dosáhnout snížením rozptylu parametrů s největším vlivem na tyto toky a popisem nejistot těchto parametrů pomocí pravděpodobnostních funkcí.

4.6.8.5 Výstupy ZL

VETEŠNÍK A., REIMITZ D., VOPÁLKA D. (2017): Popis vývoje modelu transportu C-14 z hlubinného úložiště. – MS SÚRAO, Technická zpráva, Praha.

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.

VETEŠNÍK A., REIMITZ D., BABOROVÁ L., VOPÁLKA D. (2017): Development of the model of C-14 transport from the deep. MS SÚRAO, Technical report TZ 171/2017/ENG, SÚRAO.

4.6.9 Vývoj a ověřování metodik modelování THMC procesů v rámci mezinárodního projektu DECOVALEX 2019 (PB-2016-ZL-S0870-029-Decovalex)

Hlavní autoři: Maryška J., Hokr M., Říha J. (TUL), Blaheta R. (ÚGN)

4.6.9.1 Cíl ZL

Cílem tohoto dílčího projektu bylo porovnání modelových řešení pro vyhodnocení vybraných termo-hydro-mechano-chemických (THMC) jevů v horninovém prostředí, souvisejících s transportem radionuklidů, v rámci mezinárodního týmu. K tomu byla využita platforma DECOVALEX („Development of Coupled Models and their Validation against Experiments“) a čtyřletá projektová etapa DECOVALEX-2019 na období 2016-2019. Účelem porovnání je samotné porozumění jevům v hornině a inženýrské bariéře na základě dat ze zahraničních experimentů a dále verifikace a validace použitých simulačních kódů a podklady pro jejich případný další rozvoj nebo hledání alternativ.

Řešené úlohy vycházely z *in-situ* experimentů, byly navrženy a koordinovány zahraničními odborníky a jejich jednotlivé cíle jsou následující:

- Task C (Hydro-mechanical-chemical-biological processes during groundwater recovery – GREET) měl za cíl vyhodnotit procesy při zatopení úseku rozrážky podzemní laboratoře Mizunami, jako analogu obnovení hydraulického a chemického stavu podzemní vody po uzavření úložiště.
- Task D (Interactions in Bentonite Engineered Barriers – INBEB) měl za cíl vyhodnotit hydro-mechanický proces saturace bentonitových bloků a pelet a jejich homogenizaci v experimentu EB v laboratoři Mont Terri, což umožní posoudit funkci různých uspořádání bentonitových bariér.
- Task G (Reliability, feasibility and significance of Measurements of conductivity and transmissivity of the rock mass for the understanding of the evolution of a repository of spent nuclear fuel – EDZ Evolution) měl za cíl ověřit proveditelnost, spolehlivost a relevanci *in-situ* měření hydraulické vodivosti horninové matrice a transmissivity puklin v době uzavření úložiště, na základě dat získaných z experimentu TAS04 v podzemní laboratoři Äspö.

4.6.9.2 Zhodnocení řešení projektu

Řešitelé pracovali na základě zadání a řízení koordinátorů Tasků ve spolupráci s řešitelskými týmy z dalších zemí – pro Task C Teruki Iwatsuki (Japonská agentura pro atomovou energii – JAEA) a celkem 3 týmy, pro Task D Antonio Gens (Katalánská technická univerzita – UPC) a

celkem 5 týmů a pro Task G Tobias Backers (externí spolupracovník švédského úřadu pro radiační bezpečnost – SSM) a celkem 3 týmy.

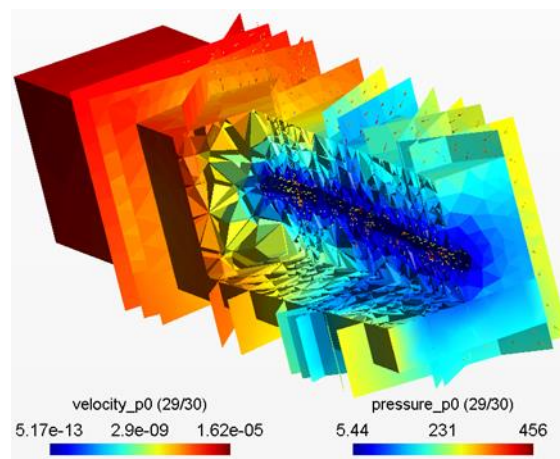
Task C: Koordinátor v prvním kroku řešení navrhl konkrétní formulaci modelové úlohy a geometrickou konfiguraci, pro fázi slepé predikce hydraulického efektu ražby cca 100 m dlouhé rozrážky, monitorované v souběžném vrtu. V tomto modelu, s aproximací homogenní horninou, dosáhly jednotlivé týmy dobré shody.

V následném řešení, zahrnujícím kalibraci na data monitoringu (JAEA, 2018) a další fáze experimentu – drenáž, instalace zátky a zatopení, použily řešitelské týmy rozdílné přístupy. Úroveň shody průběhu tlaků byla u jednotlivých modelů srovnatelná, i když konkrétní rozdíly mezi modelem a experimentem byly jinak prostorově lokalizované. Úspěchem je dosažení výsledků s kombinací deterministických puklin a kontinua pro matrici v blízkém poli, s tímto typem modelu jsou dosud v tomto prostorovém měřítku malé zkušenosti. Řešitelé TUL použili vlastní software Flow123d (TUL, 2016), který zde ukázal schopnost postihnout i komplikované podmínky během ražby a změny konfigurace v čase.

Na hydraulický model navazovalo modelování nereaktivního transportu chloridových iontů, které mají na lokalitě specifickou roli v podobě indikátoru hloubkové úrovně původu podzemní vody. Původní zadání vedlo na velmi malé změny monitorovaných koncentrací, neodpovídající měření. Pomocný model TUL demonstroval koncepty potenciálně vedoucí k většímu rozsahu hodnot koncentrací, což motivovalo koordinátora k návrhu modelu v měřítku celé URL, s transportem na větší vertikální vzdálenost.

Geochemická analýza, provedená spolupracovníkem TUL J. Zemanem, přinesla nový pohled na prostorové a časové rozložení složení podzemní vody v okolí laboratoře, jako směsí dvou vod (vybraných analýz) v různém poměru – z toho vyplývá dominantní role transportu (advekce a disperze) proti reakcím mezi složkami a mezi vodou a horninou.

Experiment spolu s jeho modelovou interpretací ukázal, že tlakové pole se vrátí do stavu blízkého původnímu, i přes případné změny propustnosti vlivem deformací, ale nevratný transport rozpuštěných látek může vytvořit novou nerovnováhu mezi vodou a horninou.



Obr. 51 Prostorové rozložení tlakové výšky (m) v okolí experimentu GREET ve fázi drenáže – doména vzdáleného pole není zobrazena, pukliny a matrice blízkého pole jsou dále oříznuty dvěma plochami podélně s rozrážkou

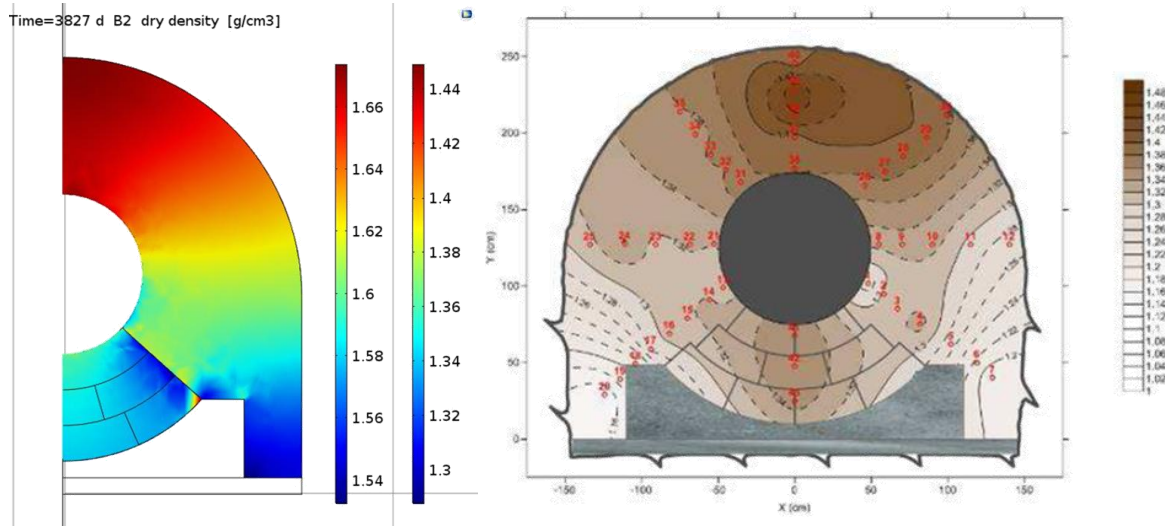
Task D: EB experiment (Gens 2016), vychází z horizontálního konceptu ukládání v jílové hostitelské hornině. Je charakterizován použitím kombinace pelet a bentonitových bloků, umělou hydratací pomocí perforovaných trubek (bariéra je téměř nasycená na konci testu) a izotermickými podmínkami, tedy existencí pouze hydro-mechanických interakcí.

V průběhu řešení projektu se podařilo postupně vylepšit numerický model, který byl v závěru schopen simulovat sdružené hydro-mechanické procesy se zahrnutím následujících specifik:

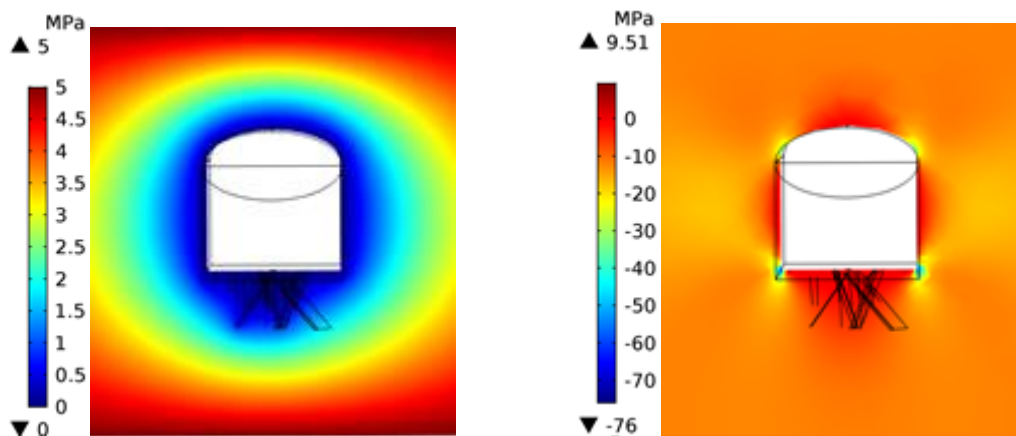
- 3D konfigurace s plnou vzájemnou interakcí hydratačních trubek, bentonitových pelet, bentonitových bloků, hydratačních geotextilií, bentonitové zátky, betonového lůžka, okolního masivu, injektorů a otevřené chodby;
- umělou saturaci pomocí hydratačních trubek a injektorů. Přirozenou saturaci skrze okolní horninový masiv;
- vyšší saturaci bentonitu, než odpovídá jeho pórovému prostoru;
- proměnné saturační křivky pro pelety i bloky v závislosti na objemové hmotnosti a porositě;
- mezery mezi bloky a jejich postupné uzavírání v čase;
- průtok vody mezi peletami vlivem gravitace, bobtnání pelet až do vyplnění prostoru mezi peletami, práce s nehomogenní distribucí pelet vlivem technologie umístění pelet, práce s různou propustností pelet v závislosti na jejich distribuci;
- zaplnění pórového prostoru geotextilie bentonitem;
- rozlišení použití H, M nebo HM modelu, pro různé komponenty modelu podle jejich fyzikálního chování.

Implementace všech uvedených specifik byla unikátní mezi řešitelskými týmy v rámci DECOVALEX-2019. Uvedená specifika se ukázala důležitá pro konstrukci modelu, který má simulovat chování těsnění instalovaného v EB experimentu a model tak mohl lépe vystihnout měřená data, včetně změn objemové hmotnosti za sucha při homogenizaci. Zkušenosti s modelováním jsou přímo použitelné při návrhu jiných experimentů, které souvisí s danou

problematikou, a umožňují vyhnout se případným problémům při interpretaci získaných dat, tj. pro potřeby českého programu HÚ i pro odpovídající typ hostitelské horniny. Implementace v prostředí SW COMSOL Multiphysics (COMSOL, 2017) má výhodu v další rozšiřitelnosti fyzikálních jevů (např. o tepelné procesy).



Obr. 52 Model EB experimentu: rozložení suché objemové hmotnosti bentonitu $M_g \cdot m^{-3}$ v řezu B2 v čase 3827 dnů – vlevo výsledek modelu (symetrie) a vpravo interpolace z vzorků při rozebrání



Obr. 53 Model experimentu TAS04: vypočtené pole tlaku vody (vlevo) a vertikální složky tenzoru napětí (vpravo) v okolí tunelu v příčném řezu 3D modelu se zahrnutím sítě puklin (linie pod počvou)

Task G: Řešení se skládalo z dvou hlavních koncepčních modelů, pro něž byly spočteny a vyhodnoceny jednotlivé dílčí varianty. V prvním případě se jedná o „syntetický“ 2D model sruženého proudění a lineární elasticity v okolí tunelu v příčném řezu, který byl určen pro verifikaci řešení jednotlivých týmů a použitých simulačních kódů. V druhé fázi řešení byl použit 3D model s reálnými daty povrchu stěny rozrážky v laboratoři Äspö a sítě puklin v prostoru pod její počvou (Backers et al. 2018). Na něm bylo rovněž spočteno sružené hydro-mechanické pole a následně byly pomocí hydraulického modelu interpretovány tlakové interferenční testy

mezi jednotlivými vrty vedoucími z rozrážky. Většina výpočtů byla prováděna v COMSOL Multiphysics (COMSOL, 2017).

Výsledky 2D modelu byly v dobré shodě mezi řešitelskými týmy. Dalším porovnáním variant s homogenní horninou, sítí stochastických diskretních puklin a kombinací sítě deterministických a stochastických puklin byl demonstrován efekt nehomogenity a nespojitostí. Hlavní vliv na řešení měly právě deterministické pukliny, a to ve větší míře na tlakové pole a rychlost proudění než na napětí a deformace.

Porovnáním 3D modelu s povrchem tunelu dle laserového skenování a generalizovaným modelem s pravidelným profilem byl zjištěn málo významný efekt nerovností v měřítku decimetrů. Na většinu veličin byl efekt zanedbatelný, nejvýraznější rozdíl byl 17 % u neustálené úlohy injektážního testu mezi vrty propojené puklinou v těsné blízkosti stěny tunelu.

Na 3D modelu s pravidelnou geometrií a sítí puklin a vrtů pak byla provedena citlivostní studie: sledován byl efekt změn transmisivity jednotlivých puklin, propustnosti matrice a EDZ zóny, případně vynechání některých puklin. Řada odezev v modelu, odpovídajících injektážním testům, byla korelovaná a nebylo tak možné vysvětlit odlišné reakce v měřených datech. Byly identifikovány tři varianty kombinací parametrů a výběru puklin, pro něž se v rozumné míře shodovaly tři z osmi odezev na injektáž. Pro dosažení lepší shody by bylo třeba uvažovat obecněji formulovaný model, resp. změny parametrů, což je diskutováno jako součást návrhu dalších prací.

4.6.9.3 Nejistoty řešení ZL

Obecnou zásadní nejistotou v experimentech v krystalické hornině je nehomogenita, konkrétně přítomnost puklin s nepravidelnými hydraulickými a mechanickými vlastnostmi.

V případě drenáže při ražbě nelze predikovat lokální hydraulický efekt jen z obecných dat o lokalitě, ani z pilotního vrtu – vystihnout modelem proměnnou komunikaci mezi vrtem a rozrážkou bylo možné až zpětně z měřených dat. Pro dlouhodobé změny chemického složení vlivem transportu v ovlivněném tlakovém poli není dobře odhadnutelné potřebné měřítko modelu, tj. prostorový dosah transportu. U chemických analýz byly odchylky od trendu často spojeny s např. chybou nábojové bilance, tedy s nejistotou v analýze vzorku.

Výpočty s kombinací puklin a kontinua jsou ve velké míře limitovány možnostmi pre-procesorů, tj. efektivním zadáním geometrie podzemních prostor a puklin a diskretizace bez zbytečných zjemnění mimo oblasti zájmu.

I při podrobné existující dokumentaci řešeného EB experimentu se ukázaly dílčí rozporuplné nebo chybějící údaje, z čehož pak vyplývají nejistoty při modelování a interpretaci. Různé typy mezer mezi bentonitovými bloky, peletami a okolními stěnami v složitém uspořádání nemusí být dostatečně přesně zjištěné. Problémem byla také bilance vody.

V měřených datech injektážních a interferenčních testů v zóně EDZ s vlivem puklin jsou přítomny efekty, které nelze vysvětlit standardními modely mechanického a hydraulického chování. Je nutno uvažovat data rozmístění deterministických puklin pouze jako orientační. Také je možno připustit, že hydraulické vlastnosti puklin jsou ovlivněny dalšími jevy, které nelze modelem predikovat nebo postihnout, ať už jejich prostorové rozložení, nebo změny v čase.

4.6.9.4 Návrh dalších prací

Vzhledem k tomu, že dílčí projekt (ZL) zahrnoval práce jen v části časového období etapy DECOVALEX-2019, z hlediska zadání Tasků ze strany jejich koordinátorů jsou práce rozvrženy až do cca poloviny roku 2019.

V případě Task C se jedná o zmíněné použití modelu většího měřítka pro vysvětlení většího rozsahu změn koncentrace chloridů, výpočet inverzního modelu hydrauliky a transportu s prodlouženou řadou dat, a hodnocení efektu betonu na chemismus. V případě Task D se jedná o modelování experimentu FEBEX, tj. jiného experimentu s podobnými jevy v bentonitu, ale se zahrnutím tepla jako dalšího sdruženého jevu. V případě Task G byla další data od koordinátora Tasku dodána ke konci řešení ZL či po jeho skončení a nabízejí tak možnost zpřesnění modelu – např. revidovat použité pukliny a zvážit jejich doplnění či zanedbání na základě nových dodaných dat, případně zavést do modelu anizotropii.

Navazující práce po skončení DECOVALEX-2019 by měly směřovat k využití poznatků v českém programu vývoje HÚ. Modely vyvinuté nebo zdokonalené v projektu a ověřené na uvedených experimentech mohou podpořit efektivnější plánování *in-situ* experimentů prováděných SÚRAO.

4.6.9.5 Výstupy ZL

- BLAHETA R., HASAL M., MICHALEC Z. (2018): DECOVALEX-2019, Task D – Modelling the EB experiment: model formulation, implementation, results from 3D model, Institute of Geonics CAS. – MS SÚRAO, Technical report, Praha.
- BLAHETA R., HASAL M., MICHALEC Z. (2018): Modelling of (T)HM processes in bentonite sealing barriers with pellets, blocks and inter-block gaps and model validation against EB experiment. Proc. CouFrac 2018, Wuhan, China. Extended abstract 4pp.
- IWATSUKI T. ET AL (2018): Task C: GREET Hydro-mechanical-chemical-biological processes during groundwater recovery in crystalline rock, Intermediate Report, DECOVALEX-2019/JAEA, 153 str.
- MARYŠKA J., BLAHETA R., HOKR M., ŘÍHA J., ET AL. (2017): Vývoj a ověřování metodik modelování THMC procesů v rámci mezinárodního projektu DECOVALEX 2019 – První etapa. – MS SÚRAO Technická zpráva, Praha.
- MARYŠKA J., BLAHETA R., HOKR M., ŘÍHA J., ET AL. (2018): Vývoj a ověřování metodik modelování THMC procesů v rámci mezinárodního projektu DECOVALEX 2019 - Závěrečná zpráva. – MS SÚRAO TZ 292/2018, Praha.
- MARYŠKA J., BLAHETA R., HOKR M., ŘÍHA J., ET AL. (2018): Development and verification of modelling methods for THMC processes within the international project DECOVALEX 2019 - Final report. MS SÚRAO ZZ 298/2018, Praha.

4.6.10 Transport radionuklidů z úložiště / Bezpečnostní rozbor HÚ v lokalitě Kraví hora (PB-2017-PZ-S3852-034-Transport7)

Hlavní autoři: Trpkošová D., Havlová V., Dobrev D., Husťáková H., Gondolli J., Klajmon M., Mendoza Miranda A. N., Večerník P. (ÚJV), Bukovská Z. (ČGS), Rataj J., Frýbort J., Fejt F., Štamberg K., Vetešník A., Vopálka D. (FJFI ČVUT), Uhlík J., Gvoždík L. (PROGEO), Královcová J., Říha J., Maryška J., Steinová J. (TUL), Staš L. (ÚGN)

4.6.10.1 Cíl ZL

Při rozhodování o lokalitách pro umístění hlubinného úložiště je třeba posoudit, zda lokality splní požadavky SÚJB na dlouhodobou bezpečnost. Jedním ze základních kritérií je dávka 0,25 mSv, kterou může obdržet reprezentativní osoba žijící v blízkosti hlubinného úložiště v jednom kalendářním roce. Tuto dávku je možno získat výpočtem transportu radionuklidů z úložiště s uvažováním různých scénářů vývoje hlubinného úložiště. Pro provedení těchto výpočtů byla vybraná lokalita Kraví hora, kde v současnosti je k dispozici nejvíce dat. Odhad této dávky v ostatních lokalitách potom může být získán porovnáním nejdůležitějších parametrů s využitím citlivostní analýzy. Cílem tohoto dílčího projektu bylo provedení výpočtů transportu radionuklidů do životního prostředí pro různé scénáře vývoje úložiště a odhadnutí maximální dávky, kterou může obdržet reprezentativní osoba z uvolněných radionuklidů. Cílem bylo i shrnutí dat a modelů potřebných pro výpočet transportu radionuklidů a výpočet efektivní dávky.

4.6.10.2 Zhodnocení řešení projektu

Předmětem řešení projektu bylo:

- Shrnutí modelů a dat potřebných pro výpočet transportu radionuklidů a výpočet efektivní dávky
- Shromáždění dat pro bezpečnostní výpočty (inventář radionuklidů, příprava výstupů z detailního 3D strukturně geologického modelu, HG modelu a modelu transportu)
- Naplnění osnovy bezpečnostní zprávy včetně deterministického výpočtu transportu radionuklidů do životního prostředí a citlivostní a neurčitostní analýzy
- Analýza VUP (vlastností, událostí a procesů).

V rámci řešení projektu byl proveden popis modelů včetně popisu modelových dat, které jsou potřebné pro výpočet dávky při posuzování bezpečnosti hlubinného úložiště. V první průběžné zprávě (Trpkošová et al. 2017) byl popsán způsob tvorby strukturně geologického modelu v programu Move, obecné principy hydrogeologických a 3D transportních modelů se zaměřením na tvorbu modelů v programech MODFLOW a Flow123d. Popis komplexního modelu vytvořeného v programu GoldSim byl rozdělen do čtyř částí (modely definující inventář výpočetním nástrojem SCALE, model pole blízkých interakcí tvořený v programu GoldSim, model pole vzdálených interakcí tvořený v programu GoldSim, biosférický model tvořený v programu GoldSim).

Data pro bezpečnostní modely jsou shromážděna ve druhé průběžné zprávě (Trpkošová et al. 2017a).

V rámci řešení projektu byl detailně popsán nově vyvinutý biosférický model, který je součástí třetí průběžné zprávy (Husťáková 2018).

V rámci řešení projektu byla naplněna osnova bezpečnostního rozboru dlouhodobé bezpečnosti hlubinného úložiště umístěného v krystalinické hornině v konceptu modifikovaného švédského konceptu KBS 3 pro lokalitu Kraví hora (čtvrtá průběžná zpráva Trpkošové et al. 2018a a závěrečná zpráva Trpkošové et al. 2018b). Zpráva obsahuje základní předpoklady pro prokázání bezpečnosti hlubinného úložiště po jeho uzavření, a to především na základě legislativních požadavků dle AZ č. 263/2016 Sb. Východiskem byly definované bezpečnostní funkce HÚ, na jejichž základě byly odvozeny scénáře vývoje úložiště a definován časový interval hodnocení.

HÚ bylo pro účely bezpečnostního rozboru rozděleno na následující komponenty:

1. Ukládací obalové soubory s VJP
 - 1.1. VJP
 - 1.2. UOS
2. Úložiště (všechny inženýrské prvky úložiště kromě UOS s VJP)
 - 2.1. Design úložiště
 - 2.2. Tlumicí bariéra (buffer)
 - 2.3. Výplňový materiál v úložných tunelech (backfill)
 - 2.4. Podzemní prostory (underground openings) včetně EDZ
 - 2.5. Těsnění šachet a vrtů a dalších volných prostor včetně zátek (closure)
 - 2.6. Ostatní konstrukční materiály
3. Horninové prostředí
 - 3.1. Izolační část horninového prostředí bez poruchových zón (izolační část)
 - 3.2. Obklopující horninové bloky s poruchovými zónami (transportní část)
4. Biosféra

Každá z komponent byla popsána i s ohledem na specifika zvolené lokality Kraví hora. V matematickém modelu je každá z komponent popsána parametry, které ji definují.

Byl proveden detailní popis koncepčních, matematických a výpočetních modelů zdrojového členu, transportu radionuklidů blízkým a vzdáleným polem a poté biosférou.

Vyvinuté výpočetní modely byly propojeny do komplexního modelu v programovém prostředí GoldSim, jehož finálním výstupem je roční efektivní dávka na reprezentativní osobu, kterou je třeba porovnat s dávkovou optimalizační mezí $0,25 \text{ mSv rok}^{-1}$ stanovenou v §82 AZ č. 263/2016 Sb. V komplexním modelu transportu radionuklidů z HÚ do životního prostředí byl proveden výsledný deterministický výpočet, s ohledem na uvažovaný scénář byl výpočet proveden pro dva časové intervaly hodnocení 0-10250 let s krokem 1 rok (hodnocení dopadu okamžitého poškození 10 UOS v čase 10 000 let) a 0-1 milion let s krokem 100 let (hodnocení postupného selhávání 60 UOS po vypršení jejich životnosti). Z výpočtu vyplývá, že pro zvolený centrální scénář v obou časových intervalech hodnocení nedojde k překročení stanovené dávkové optimalizační meze $0,25 \text{ mSv rok}^{-1}$ – maximum vypočtené roční efektivní dávky na reprezentativní osobu dosahuje hodnoty $0,136 \text{ mSv rok}^{-1}$ (54,4% dávkové optimalizační meze) v roce 10 020 (20 let po náhlém poškození 10 UOS současně v jednom roce).

V časovém intervalu hodnocení 0-10 250 let k výsledné roční efektivní dávce nejvíce přispívají radionuklidy s vysokou hodnotou IRF (^{129}I , ^{36}Cl a ^{14}C). Dominantním radionuklidem je ^{129}I , který k dávce přispívá téměř 98 %. K výpočtu byla použita hodnota IRF pro ^{129}I 0,1 (tj. 10 %), která je velmi konzervativní. Lze říci, že pokud dojde k porušení jednoho UOS v době 10 000 let, přispějí radionuklidy s vysokými IRF z něj uvolněné k výsledné roční efektivní dávce hodnotou cca 0,0136 mSv rok⁻¹. Dominantní cestou ozáření reprezentativní osoby je příjem radionuklidů požitím (ingesce), který přispívá k celkové hodnotě roční efektivní dávky téměř 100 %.

Postupná degradace 60 UOS po skončení jejich minimální životnosti v období od cca 140 000 až 220 000 má za následek zvýšení roční efektivní dávky z hodnoty 0,0020 mSv rok⁻¹ v roce 140 000 na hodnotu 0,0117 mSv rok⁻¹ (8,6 % dávkové optimalizační meze) v období od roku cca 774 600 do 937 000. Po tomto období začíná dávka pozvolna klesat. Dominantní cestou ozáření reprezentativní osoby i v tomto období je příjem radionuklidů požitím (ingesce), která přispívá k celkové hodnotě roční efektivní dávky téměř ze 100 %.

Citlivostní analýza biosférického modelu ukázala vysoký stupeň jeho konzervativnosti a míru vlivu jednotlivých analyzovaných parametrů na výslednou dávku.

V rámci řešení projektu byla provedena analýza VUP (pátá průběžná zpráva, Gondolli et al. 2018), jejíž hlavním výsledkem je především seznam projekt-specifických VUP pro referenční návrh HÚ v krystalické hornině pro sekci ukládání vyhořelého jaderného paliva ve variantě vertikálního ukládání, který obsahuje přes 400 konkrétních VUP v 8 komponentách HÚ.

4.6.10.3 Nejistoty řešení ZL

Základní nejistoty vstupují hned na počátku do procesu vytváření modelu, a to především jako vstupní data, která jsou pro některé z parametrů jen obtížně dostupná a jsou tedy přejímána buď z archivu nebo z odborné literatury. Jde např. o geologické podklady pro některé části území, na kterém je předpokládáno potenciální umístění HÚ, data pro propustnost v hloubce umístění HÚ, data pro transportní parametry radionuklidů v poli blízkých interakcí, v poli vzdálených interakcí i v biosféře, informace o lokalitě pro biosférický model apod.

Kalibrace 1D transportního modelu na výsledky 3D transportního modelu odhalila nejistoty spjaté s převodem EPM modelu do modelu jedné pukliny použitým v modelu GoldSim V EPM modelu dochází k nadhodnocení porozity oproti reálnému prostředí. Z tohoto důvodu, ale i z důvodu postihnout míry všech transportních procesů, jako je i difúze do horninové matrice a sorpce na puklinovou výplň.

V rámci neurčitostní a citlivostní analýzy byla provedena srovnávací studie, ve které autoři co nejvíce přiblížili vytvořený komplexní model v GoldSim k modelu použitým v Posiva (1996). Srovnání hodnot toků z pole blízkých interakcí a geosféry potvrdilo správnost naší implementace komplexního modelu.

Dále byly provedeny citlivostní a neurčitostní analýzy toků sedmi kritických radionuklidů ^{14}C , ^{36}Cl , ^{79}Se , ^{129}I , ^{226}Ra , ^{234}U , a ^{238}U pro scénář jednoho UOS. Radionuklidy byly rozděleny do dvou skupin a ve dvou studiích bylo provedeno 2x256 simulací; na základě těchto simulací byly zjištěny maxima toků z NF a geosféry, a byly identifikovány parametry, které nejvíce ovlivňují nejistoty v hodnotách maxim těchto toků. Odstranění nejistot v hodnotách vypočtených maxim toků vybraných radionuklidů by bylo možné dosáhnout snížením rozptylu parametrů s největším vlivem na tyto toky a popisem nejistot těchto parametrů pomocí pravděpodobnostních funkcí. V případě toku z NF a první skupiny

radionuklidů (^{14}C , ^{36}Cl , ^{79}Se , ^{129}I) to jsou parametry IRF zdrojového členu a vstupního objemového toku do modelu geosféry (IN_F); v případě druhé skupiny (^{226}Ra , ^{234}U , a ^{238}U) to jsou distribuční koeficient bentonitu ($K_{d-\text{bent}}$) a geometrický faktor (G (-)). V případě toku z geosféry jsou to pro první skupinu radionuklidů průtočná plocha a délka modelu pukliny, v případě druhé skupiny jsou to tyto tři parametry: smáčený obvod modelu pukliny, efektivní difúzní koeficient horninové matrice ($D_{e-\text{granit}}$) a distribuční koeficient horninové matrice ($K_{d-\text{granit}}$).

Jedna z nejistot vzniká z omezené aplikace transportních procesů radionuklidů jak v poli blízkých interakcí, tak v horninovém prostředí, která zohlednila např. chemismus vybraných typických kationtů a kinetické efekty transportu kationtů a aniontů ve vrstvě kompaktovaného bentonitu či v hornině.

Citlivostní analýza biosférického modelu ukázala vysoký stupeň jeho konzervativnosti a míru vlivu jednotlivých analyzovaných parametrů na výslednou dávku. Největší nejistoty, a to jak modelu, tak parametrů do nich vstupujících, vycházejí především z nedostatku konkrétních dat o lokalitě - např. nedostatek detailnějších údajů o lokalitě (hydrologie přípoверхové vrstvy, studie zvyklostí místní komunity – zemědělská praxe, životní zvyklosti atd.).

4.6.10.4 Návrh dalších prací

Vývoj a implementace bezpečnostních výpočtů na data z reálného prostředí lokality Kraví hora prokázaly, že provedení bezpečnostní analýzy na zvolené lokalitě je proveditelné, včetně implementace reálných dat. Na základě těchto prací (Trpkošová et al. 2018b) byla vyslovena následující doporučení ve vztahu k hodnocení bezpečnosti na potenciálních lokalitách.

Oblast HG a transportních modelů pro hodnocení bezpečnosti

Posouzení vhodnosti lokalit z hlediska umístění HÚ v procesu výběru finální a záložní lokality bude primárně podřízeno prokazování bezpečnosti. Tomu je potřeba podřídit metodiku průzkumných prací i metodiku aplikace modelovacího softwaru. Jedním z cílů průzkumných prací bude zajistit potřebná data pro numerické modely.

Rozdíly v proudění podzemní vody v jednotlivých lokalitách souvisí s morfologií terénu, rozložením říční sítě, intenzitou rozpukání horninového masivu, orientací puklinových systémů i jejich výplní. Z důvodu absence informací o puklinových systémech horninových masivů v projektové úrovni HÚ jsou všechny dosud zrealizované hydrogeologické modely posuzovaných lokalit založeny na konceptu ekvivalentního pórového kontinua (EPM). Nedostatek dat byl překlenut přijetím shodných vstupních předpokladů hydrogeologických modelů pro všechny lokality.

V nadcházející fázi hodnocení 4 lokalit projdou hydrogeologické a transportní modely kvalitativní změnou. Modelový přístup bude ve všech ohledech adresný k poměrům dané lokality, protože průzkumné práce budou nově zaměřeny i na:

- charakterizaci puklinových systémů posuzovaných horninových masivů;
- zajištění kalibračních dat v souvislosti s:
 - analýzou chemismu a stáří odebraných vzorků podzemní vody;
 - provedením etážových vodních tlakových zkoušek ve všech vrtech dosahujících úroveň HÚ a ve vybraných vrtech s menší hloubkou;

- provedením interferenčních hydraulických testů s cílem testovat konektivitu (propojení) zastižených puklinových systémů v jednotlivých hlubokých vrtech;
- provedením přítokových zkoušek na vybrané skupině vrtů;
- postupným proměřením profilových průtoků ve zvolených úsecích říční sítě jednotlivých lokalit v extrémně suchých, suchých a běžně vodných obdobích;
- hodnocením základního odtoku alespoň ve dvou zvolených povodích každé lokality z nově instalovaného kontinuálního monitoringu průtoků.

Detailní přehled vstupních informací modelů pro nadcházející fázi modelových prací na čtyřech lokalitách poskytl Uhlík et al. (2018).

Zakomponování modelových prací v metodice posuzování bezpečnosti lokalit zůstane obdobné s realizovaným projektem bezpečnostního hodnocení lokality Kraví hora (ZL Bezpečnostní rozbor HÚ v lokalitě Kraví hora; PB-2017-PZ-S3852-034-Transport7). Hydrogeologický a transportní model poskytnou informace o poměrech proudění a transportu radionuklidů v oblasti vzdáleného pole interakcí (od okraje inženýrských bariér hlubinného úložiště po drenážní oblasti). Výstupem numerických modelů bude prostorová informace o velikosti a rychlosti proudění podzemí vody a časoprostorová informace rozložení koncentrací radionuklidů.

Metodické rozdíly aplikace numerických modelů oproti dosavadnímu projektu bezpečnostního hodnocení lokality Kraví hora budou především spočívat:

- v uplatnění nově dostupných dat geologického a hydrogeologického průzkumu pro potřeby zadání a kalibrace numerických modelů;
- v aplikaci DFN modelu pro popis poměrů proudění v prostoru izolační části horninového masivu (mimo vrstvu připovrchového zvětrání);
- komplexním nasazením hydraulického a transportního modelu pro potřeby identifikace lokalit s největší kontaminací dotokem radionuklidů;
- v aplikaci podrobnějších dat přítoku radionuklidů do horninového prostředí přes inženýrské bariéry;
- v aplikaci numerických modelů různých měřítek a typu řídicí rovnice pro komplexní popis migrace radionuklidů geosférou;
- v doplnění analýzy nejistot předkládaných modelových výsledků popisu proudění a transportu geosférou.

Modely založené na principu diskrétní puklinové sítě (DFN) reprezentují v porovnání s modely vycházejícími z konceptu EPM větší přiblížení fyzikální podstatě proudění v rozpuštěném horninovém masivu. Jejich výsledky popisu proudění (rychlostní pole, smáčený obvod, průtoky) je vhodné přijmout jako vstupní data návazných modelů hodnocení bezpečnosti (GoldSim). Specializované softwary umožňují výpočet tenzoru hydraulické vodivosti z existujícího DFN modelu a převedení (scaling) DFN modelu na model EPM z důvodu úspory výpočetních nároků.

Numerické modely reprezentují nejkompaktnější dostupný nástroj pro popis proudění podzemní vody a transportu radionuklidů v horninovém prostředí. Výsledky hydrogeologického a transportního modelu budou využity k identifikaci lokalit s největší drenáží radionuklidů ve vazbě na posuzované bezpečnostní scénáře vývoje HÚ. Hydrogeologický a transportní model bude rovněž využit pro nastavení věrohodného scénáře

v modelu biosféry v souvislosti s uvažovaným jímáním podzemní vody a dosaženou koncentrací radionuklidů ve vodním zdroji.

Uvedená metodika aplikace numerických modelů v rámci bezpečnostního hodnocení lokalit HÚ umožní posuzované lokality rozlišit z hlediska proudění a transportu radionuklidů v závislosti na zjištěných datech geologických a hydrogeologických průzkumů. V návazných krocích bezpečnostního hodnocení budou data hydrogeologických a transportních modelů postupně transformována (GoldSim, biosférické modely) do podoby výpočtu dávky pro reprezentativní osobu.

Analýza a porovnání celkových a dílčích výsledků bezpečnostního hodnocení čtyř lokalit podpoří návazný rozhodovací proces výběru lokality HÚ.

Bezpečnostní výpočty

Základním předpokladem pro realistické bezpečnostní hodnocení je zpracování databáze vlastností, událostí a procesů (VUP), které by byly specifické pro multibariérový koncept HÚ v podmínkách krystalických hornin Českého masivu, a to včetně sekce pro ukládání RAO, neuložitelného do přípovrchových úložišť RAO.

Na základě této databáze a případně i předběžných screeningových výpočtů by měly být definovány scénáře, hlavní a alternativní, včetně jejich odvození a koncepčního pojetí. Pro tyto scénáře bude nutno připravit vstupní data a informace pro vstup do komplexního modelu.

Jednou z možných problematik k řešení je rozvíjení modelování pokročilých modelů transportu sorbujících radionuklidů zohledňujících např. chemismus vybraných typických kationtů a kinetické efekty transportu kationtů a aniontů ve vrstvě kompaktovaného bentonitu. Tato problematika není určitě zásadní pro bezpečnostní analýzu, ale rozvíjení pokročilých modelů je vhodné, možná i nezbytné, pro ukázání úrovně znalosti, kterou je bezpečnostní hodnocení podloženo.

Jedním ze závěrů neurčitostní analýzy bylo, že pro snížení rozptylu hodnot toků by měl být upřesněn popis hodnot neurčitých parametrů vytvořením pravděpodobnostních rozdělání pro neurčitosti hodnot parametrů. Pro vytvoření a kvantifikaci pravděpodobnostních rozdělání na základě expertního odhadu bychom rádi využili připravenou dobře definovanou proceduru, pro následné pravděpodobnostní studie citlivostní analýzu na základě rozkladu rozptylu (Vetešník et al. 2016).

Kalibrace 1D transportního modelu na výsledky 3D transportního modelu odhalila nejistoty spjaté s převodem EPM modelu do modelu jedné pukliny použitým v modelu GoldSim. V EPM modelu dochází k nadhodnocení porozity oproti reálnému prostředí. Pro postihnutí míry všech transportních procesů, jako je i difúze do horninové matrice a sorpce, je vhodné založit 3D transportní modely na DFN přístupu. Bylo by vhodné využít potenciál GoldSimu pro modelování sítě puklin a vytvořili alternativní DFN model v GoldSim. Tím vznikne další alternativa pro popis geosféry.

Citlivostní analýza ukázala vysoký stupeň konzervativnosti biosférického modelu a míru vlivu jednotlivých analyzovaných parametrů. Pro snížení nejistoty/neurčitosti jak modelu, tak jeho parametrů je třeba získat detailnější údaje o lokalitě (hydrologie přípovrchové vrstvy, studie zvyklostí místní komunity – zemědělská praxe, životní zvyklosti atd.) a rovněž řešit nejistoty, které se vztahují k simplifikaci některých procesů, jako jsou např. přestup vody z geosféry do pedosféry, procesy v půdě a nenasycené zóně apod (Trpková et al. 2017b).

4.6.10.5 Výstupy ZL

TRPKOŠOVÁ D., HUSŤÁKOVÁ H., DOBREV D., HAVLOVÁ V., BUKOVSKÁ Z., FRANĚK J., RATAJ J., FEJT F., VETEŠNÍK A., BABOROVÁ L., VOPÁLKA D., POLÁK M., UHLÍK J., GVOŽDÍ L., ČERNÝ M., KRÁLOVCOVÁ J., ŘÍHA J., BŘEZINA J. (2017): Shrnutí modelů a parametrů potřebných pro výpočet transportu radionuklidů na lokalitě Kraví hora. Technická zpráva – MS SÚRAO, Praha.

TRPKOŠOVÁ D., HAVLOVÁ V., BUKOVSKÁ Z., FRANĚK J., RATAJ J., FRÝBORT J., KOBYLKA D., LOSA E., FEJT F., VOPÁLKA D., BABOROVÁ L., ŠTAMBERG K., VETEŠNÍK A., VANĚČEK V., UHLÍK J., GVOŽDÍK L., MILICKÝ M., POLÁK M., KRÁLOVCOVÁ J., ŘÍHA J., MARYŠKA J. (2017): Shrnutí procesních modelů lokality Kraví hora a aktualizace parametrů komplexního modelu. – MS SÚRAO, TZ 200/2017, Praha.

HUSŤÁKOVÁ H. (2018): Biosférický model a parametry pro výpočet transportu radionuklidů na lokalitě Kraví hora. – MS SÚRAO TZ 218/2018, Praha.

HUSŤÁKOVÁ H. (2018): Biosphere model of and the parameters used for the calculation of radionuclides transport at the Kraví Hora site. – MS SÚRAO, TZ 218/2018/EN, Praha.

GONDOLLI J., ČERVINKA R., DOBREV D., HAVLOVÁ V., HUSŤÁKOVÁ H. (2018): Vlastnosti, události a procesy pro bezpečnostní hodnocení hlubinného úložiště. – MS SÚRAO, 330/2018, 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., VOKÁL A. (2018a): Bezpečnostní rozbor dlouhodobé bezpečnosti hlubinného úložiště na lokalitě Kraví hora. – MS SÚRAO, TZ 274/2018, 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. (2018b): Bezpečnostní rozbor dlouhodobé bezpečnosti hlubinného úložiště na lokalitě Kraví hora. Závěrečná zpráva. – MS SÚRAO ZZ 334/2018, 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. (2018c): Long term safety calculation of deep geological repository at the Kraví hora site. – MS SÚRAO ZZ 334/2018/EN, Praha.

Počítačové programy

Komplexní model v programu GoldSim

4.6.11 Transport radionuklidů z úložiště / Testování koncepčních a výpočetních modelů (PB-2017-ZL-S2222-041-Transport 8)

Hlavní autoři: Gvoždík L., Jankovec J., Milický M., Uhlík J. (PROGEO), Bukovská Z., Švagera O. (ČGS), Grecká M., Trpková D. (ÚJV), Kabele P. (FSV ČVUT), Královcová J., Maryška J., Říha J. (TUL), Vetešník A., Zelinková T. (FJFI ČVUT)

4.6.11.1 Cíl ZL

Hlavním cílem dílčího projektu „Transport radionuklidů z hlubinného úložiště/Testování koncepčních a výpočetních modelů“ (Transport 8) bylo modelovat pomocí vhodných softwarových nástrojů proudění a transport radionuklidů v puklinových systémech izolační části horninového masivu od stěny ukládacího vrtu do oblasti napojení na regionální vodivé struktury.

Náplň ZL Transport radionuklidů z hlubinného úložiště/Testování koncepčních a výpočetních modelů:

- rešeršní práce dokumentace Posiva a SKB zaměřená na popis puklinového prostředí a DFN modelování – zpracováno v samostatné zprávě Milický et al. (2019);
- charakterizace puklinových systémů ve vybrané části PVP Bukov – terénní měření, zpracování vstupních dat pro geologické modely – realizováno pracovníky České geologické služby (ČGS);
- příprava detailních geologických modelů (GeoDFN) v programu DFraM – stanovení (kalibrace) parametrů puklinových populací na základě měřených dat, generování GeoDFN modelů – realizováno pracovníky ze Stavební fakulty Českého vysokého učení technického v Praze (FSV);
- zpracování hydrogeologických modelů (HydroDFN) proudění podzemní vody a transportu radionuklidů založených na metodě DFN – simulováno v programech NAPSAC, Flow123d a ADFNE a realizováno pracovníky z PROGEO, Technické univerzity v Liberci (TUL) a Fakulty jaderné a fyzikálně inženýrské Českého vysokého učení technického v Praze (FJFI);
- interakce a převod výsledků hydraulických a transportních modelů do modelu GoldSim umožňujícího propojovat procesy v poli blízkých a vzdálených interakcí – realizováno pracovníky z ÚJV Řež (ÚJV) a FJFI,
- analýza výsledků zpracovaných modelů a hodnocení významu puklin a jejich vzájemné konektivity pro transport radionuklidů v izolační části masivu;
- důležitou součástí byl vývoj a testování postupů a metodik jak v dílčích samostatných fázích projektu, tak při vzájemném propojení výsledků a dat mezi jednotlivými řešiteli (výstupní data z jedné fáze projektu se stávají vstupními daty do navazující etapy).

4.6.11.2 Zhodnocení řešení projektu

Izolační část horninového masivu v rámci tohoto zadání reprezentuje hypotetický blok horninového masivu v okolí HÚ, respektive v okolí ukládacího vrtu. Hranici tohoto bloku vymezují předpokládané nejbližší propustné zlomové zóny nebo významné rozevřené pukliny vzdálené 50 metrů od ukládacího vrtu. Řešený blok izolační části masivu není zcela nepropustný, ale je porušen vzájemně propojenou sítí méně významných puklin.

V první fázi projektu byla zpracována rešerše zahraniční literatury věnovaná problematice puklinových systému v hloubce HÚ. Zároveň bylo realizováno strukturní měření puklin v PVP Bukov, aby byla co nejdříve k dispozici reálná vstupní data pro zpracování geologických modelů. Současně byly zahájeny práce na generování stochastického puklinového GeoDFN modelu verze v0, který byl založen na datech získaných z rešeršních prací. V úvodní fázi projektu byla také diskutována a schválena metodika detailních HydroDFN modelů.

Na základě zpracovaných strukturních dat z PVP Bukov byly v další fázi projektu připraveny GeoDFN modely v rozsahu zájmového bloku horninového masivu. Současně byl realizován HydroDFN model verze v0 a byly vypočteny proudění a advektivní transport, aby mohly být zahájeny práce na transportních modelech v programu GoldSim.

V poslední fázi projektu byly na základě generovaných GeoDFN modelů zpracovány HydroDFN modely verze v1 a v2 a vypočteno proudění a advektivní transport v puklinové síti. Simulace byly realizovány současně ve třech softwarech a průběžně byly porovnávány a prezentovány dosažené výsledky. V modelových verzích v0 a v1 byl proveden také „upscaling“ DFN puklinové sítě do CPM modelu a byly porovnány výsledky pro oba koncepční přístupy. V modelové verzi v2 byl simulován vliv EDZ tunelu na transport stopovače. Současně byly z programu NAPSAC exportovány pro všechny verze modelu detailní výsledky proudění a advektivního transportu, které se staly podkladem pro zpracování transportních simulací v programu GoldSim pro 4 fiktivní stopovače s různými parametry difuze a sorpce v horninové matici.

4.6.11.3 Nejistoty řešení ZL

Hlavní nejistoty zpracovaných GeoDFN, HydroDFN a transportních modelů vyplývají především z krátké doby řešení projektu, při které byl prostor na řešení základní koncepce DFN modelu pouze s jednou realizací puklinové sítě. Stochastický přístup vyžaduje generování většího počtu modelů, současně existuje řada koncepcí, jak jednotlivé parametry puklin definovat.

Nejistota zpracovaných GeoDFN modelů je obecně dána jednak souborem vstupních geologických dat a jejich kvalitou, ale také vlastnostmi a možnostmi softwaru, který je ke konstrukci GeoDFN modelů použit. Nejistoty zpracovaných GeoDFN modelů jsou dány především:

- omezenou velikostí pozorovacích oken, tj. stopy puklin nejsou měřeny v celé délce;
- chybí metodika zohlednění průřezů stop puklin a ukončování puklin v modelu;
- vytvořené GeoDFN modely byly založeny na Poissonově procesu náhodně generovaných puklin v prostoru – existuje ale řada jiných konceptů generování puklin, např. zohledňujících vytváření klastrů puklin v prostoru atd.

Nejistoty HydroDFN modelů proudění podzemní vody jsou dány stejně jako u GeoDFN modelů nedostatkem a nejistotami ve vstupních datech a také možnostmi použitého software:

- nejistoty GeoDFN modelů se přímo přenášejí do HydroDFN modelů;
- absence relevantních hydrogeologických dat pro vytvoření nebo kalibraci HydroDFN modelů, které byly založeny pouze na odhadu parametrů vodivých puklin nebo na datech z rešeršních prací;
- byl řešen základní koncept konstantního rozevření v puklině – existuje řada komplexnějších a složitějších přístupů, např. s variabilním rozevřením atd.;
- nejistoty HydroDFN modelů se přímo přenášejí do modelů transportních.

4.6.11.4 Návrh dalších prací

V následujících bodech jsou shrnuta doporučení pro navazující práce, která vyplynula z řešení ZL Transport radionuklidů z hlubinného úložiště/Testování koncepčních a výpočetních modelů a mají vazbu na problematiku puklinových sítí, sběru a hodnocení dat, DFN modelování a hodnocení bezpečnosti.

Sběr strukturních dat:

- Vhodným rozšířením již pořizované dokumentace bude zakomponování možnosti rozšířit statistický dataset o vrtná 1D data, případně plošná 2D data (viz následující bod), bude muset být vyřešena jejich vhodná provázanost s 3D daty pořizovanými standardní metodou,
- Aktuálně největším limitem mimo dostupnost horninových výchozů je odhad délek jednotlivých poruch. Je zřejmé, že se struktury často propagují dále do HM, ale není často možné jejich skutečnou délku určit. Minimálně pro povrchová data by mohlo být řešením využití metod dálkového průzkumu země a detekce morfolineamentů, či zvodnělých lineárních zón. Ty by v dobře zmapovaném terénu (nebo jeho části) s dostatkem horninových výchozů mohly být korelovatelné pomocí jejich směrové analýzy s měřenými daty z výchozů a umožnily by tak lépe kvantifikovat velikost křehkých poruch a tím umožnit konstrukci DFN s lépe nastavenými okrajovými podmínkami.

DFraM a generování DFN modelů:

- Dokončení vývoje výpočetního nástroje pro primární statistickou analýzu dat ze SG měření (výchozů, tunelů, karotáží).
- Verifikace inovované metodiky pro identifikaci parametrů DFN a implementace podpůrných funkcí do programu DFraM.
- Vývoj a implementace algoritmů pro výpočet transmisivity puklin na základě napjatostního stavu HM.
- Vývoj a implementace metod pro výpočet napjatosti v HM využívajících DFN modelů (i pro aplikaci v EDZ).
- Využití přístupu Grown DFN pro efektivní generování DFN modelů zohledňujících genezi a charakteristiky konektivity puklinových populací (např. ukončování puklin).
- Zohlednění prostorové variability puklinové sítě (např. vlivem hloubky, v blízkosti velkých zlomů nebo v EDZ). Pro tento účel by bylo potřeba získat dodatečné informace SG průzkumem.

Flow123d:

- Rozvoj softwarových nástrojů pro modelování horninového prostředí a transportních jevů – vývoj SW balíků, které umožní jednak na základě strukturně-geologických dat vytvářet stochastické 3D modely diskretních puklinových sítí (DFN) a jednak umožní jakožto nástavba stávajícího SW Flow123d simulovat transportní procesy na těchto sítích včetně retence v přílehlé horninové matici.
- Vyřešení problémů s tvorbou výpočetní sítě a dále rozvinout program pro stanovení a ohodnocení transportních cest do podoby komplexního nástroje, který na základě

známého rychlostního pole (výstup Flow123d) nejen stanoví transportní cestu, ale bude navíc fungovat jako plnohodnotný transportní model.

- Implementace metody MLMC (MultiLevel Monte Carlo), jejímž užitím lze diskretní puklinovou síť zjednodušit na výpočetní síť zahrnující jen nejvýznamnější pukliny s tím, že zbylé pukliny jsou reprezentovány jako ekvivalentní porézní médium, jehož hydraulické a transportní parametry jsou stanoveny metodou MLMC tak, aby výsledky simulací na obou výpočetních sítích byly sobě blízké.

GoldSim:

- Při řešení společných úloh se ukázalo, že objekt *Network Pathway* v programu GoldSim představuje efektivní nástroj pro řešení úlohy transportu v DFN. Jako návrh dalších prací navrhuje vytvořit sadu rutin, která by umožnila propojení mezi NAPSAC a objektem *Network Pathway* v GoldSim.
- Zaměřit se na metodiku kalibrace modelu v GoldSimu – dosažení lepší shody s výsledky HydroDFN modelů (NAPSAC, MODFLOW, Flow123d atd.).
- Optimalizace exportu dat z HydroDFN modelů pro sestavení „Pipe“ modelu.

HydroDFN modelování:

- Z pohledu hydrogeologického modelování považujeme za velmi důležité zaměřit se na DFN modely regionálního měřítká – jsou důležitým podkladem pro modely menších měřítek z důvodů zadání reprezentativních okrajových podmínek, současně pohyb stopovače ve vodivých strukturách regionálního charakteru tvoří podstatnou část transportní cesty.
- Na druhou stranu je potřeba se zaměřit také na detail rozhraní ukládací vrt-puklina – je to důležité pro stanovení rychlosti proudění a velikost zdroje, který vystupuje z inženýrské bariéry (pohyb primárně difuzí) do izolační části horninového masivu (pohyb primárně advekcí v puklinové síti se zahrnutím transportních procesů do horninové matrice).
- V rámci řešení T8 byly s ohledem na dobu trvání projektu zpracovány modely pro omezené množství scénářů – zpravidla pouze základní varianty modelu (jedna realizace stochastické sítě, jeden ukládací vrt, jedna varianta EDZ apod.) – v rámci bezpečnostního hodnocení bude nutné pracovat s daleko širším zadáním a větší variabilitou vstupních dat.
- Zcela zásadní pro tvorbu reprezentativního hydrogeologického modelu jsou měřená data hydrogeologického charakteru (měření propustnosti ve vrtech, vodní tlakové zkoušky, stopovací zkoušky atd.), které lze uplatnit při kalibraci HydroDFN modelu – jakékoliv jiné zadání hydraulických parametrů, např. pouze z geologického mapování je nedostačující.

Ostatní doporučení:

- Oři řešení podobných úloh a projektů doporučujeme paralelní řešení ve více softwarech na více pracovištích – důležité je to zejména ve fázi, kdy je některý ze softwarů průběžně vyvíjen a není tedy plně ověřena jeho funkčnost. Na druhou stranu i komerčně dodávané softwary mají některé z deklarovaných funkcí pouze „na papíře“ a jsou ověřeny pouze na jednoduchých úlohách a při řešení komplexních úloh je nelze bez omezení využít. Důležitá je zde funkční technická podpora daného softwaru. Toto

doporučení se netýká pouze HydroDFN modelování, ale obecně všech fází projektu, kde není předem jasně daná metodika řešení.

- Součástí harmonogramu řešených projektů by měly časové rezervy pro dokončení dílčích etap, optimalizaci a verifikaci navržených postupů a možnosti úpravy harmonogramu dle dosažených výsledků.
- Z hlediska plánovaných prací doporučujeme jednoznačně vymezit softwary, které budou v oblasti DFN modelování (GeoDFN, HydroDFN, bezpečnostní hodnocení atd.) ze strany SÚRAO preferovány – problematika DFN je co se týče softwaru velmi specifická a vyžaduje získání určitých zkušeností, které nelze jednoduše přenést nebo aplikovat na jiný typ softwaru (jiný charakter vstupních a výstupních dat, jiná struktura ovládání, jiné numerické metody, nároky na hardware atd.).
- V rámci projektu T8 byly výpočty proudění a transportu demonstrovány pro každou verzi modelu na jedné realizaci puklinové sítě. Je však nutno zdůraznit, že DFN modely jsou ze své podstaty generovány stochasticky. To znamená, že i při použití stejných hodnot parametrů pravděpodobnostních rozdělení, kterými se řídí vytváření puklin, má každá realizace DFN modelu jinou konektivitu a kritickou transportní cestu. HG simulace by proto měly být prováděny na statisticky smysluplném počtu realizací DFN a výsledky by měly být interpretovány ve statistickém smyslu.

4.6.11.5 Výstupy ZL

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.

GVOŽDÍK L., BUKOVSKÁ Z., GRECKÁ M., JANKOVEC J., KABELE P., KRÁLOVCOVÁ J., KRYL J., MARYŠKA J., MILICKÝ M., ŘÍHA J., ŠVAGERA O., TRPKOŠOVÁ D., UHLÍK J., URBAN P., VETEŠNÍK A., ZELINKOVÁ T. (2019): Transport radionuklidů z hlubinného úložiště/testování koncepčních a výpočetních modelů. Závěrečná zpráva. – MS SÚRAO, ZZ 463/2020, Praha.

GVOŽDÍK L., BUKOVSKÁ Z., GRECKÁ M., JANKOVEC J., KABELE P., KRÁLOVCOVÁ J., KRYL J., MARYŠKA J., MILICKÝ M., ŘÍHA J., ŠVAGERA O., TRPKOŠOVÁ D., UHLÍK J., URBAN P., VETEŠNÍK A., ZELINKOVÁ T. (2020b): Transport of Radionuclides from Deep Geological Repository / Testing of Conceptual and Numeric Models – Final Report. – MS SÚRAO, SÚRAO ZZ 463/2020/EN, Praha.

4.6.12 Benchmarkové studie GRS (PB-2019-ZL-S3620-044-GRS)

Hlavní autoři: Noseck U., Becker D., Schneider A. (GRS Braunschweig), Husťáková H., Havlová V. (ÚJV), Vetešník A. (JFI ČVUT), Uhlík J. (PROGEO)

4.6.12.1 Cíl ZL

Hlavním cílem tohoto projektu je ověření správnosti výsledků dosažených při přípravě bezpečnostního hodnocení hlubinného úložiště radioaktivních odpadů. Toto ověření bude provedeno srovnáním dosažených výsledků s výsledky zahraničního partnera/partnerů s využitím vybraných dat a informací použitých pro bezpečnostní rozbor lokalita Kraví hora

(zejména pro model Biosféry a blízkého pole interakcí) a vybraných dat pro lokalitu Čihadlo (zejména ve vztahu k modelu proudění podzemní vody v oblasti vzdáleného pole interakcí). Zahraničním partnerem pro tuto spolupráci je společnost Gesellschaft für Anlagen-und Reaktorsicherheit (GRS) GmbH na základě smlouvy mezi SÚRAO a GRS o spolupráci (SO2017-072).

4.6.12.2 Zhodnocení řešení projektu

Pro ověření přesnosti výsledků dosažených při přípravě posouzení bezpečnosti hlubinného úložiště byly ve spolupráci s GRS provedeny výpočty, hodnotící bezpečnostní funkce blízkého pole, vzdáleného pole a biosféry.

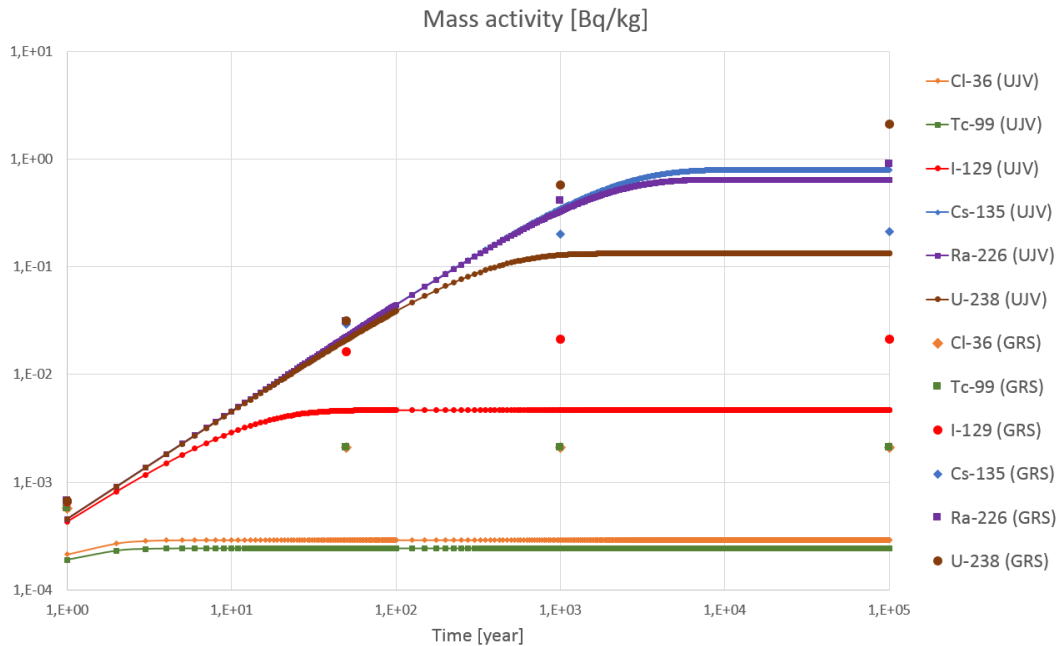
Pro výpočty v poli blízkých interakcí GRS použil program CLAYPOS, FJFI GoldSim. Vzhledem k velmi odlišným konceptům použitých programů pro výpočet v blízkém poli lze srovnatelné výsledky dosáhnout pouze s velmi zjednodušeným modelem. Zatímco CLAYPOS je starý kód, který je omezen na difúzi 1D a je navržen více s ohledem na výpočet rychlosti, GoldSim je moderní, univerzální nástroj pro transport kontaminantů, který umožňuje modelování složitých transportních cest a fyzikálních procesů. Pokud je však nastavení GoldSim přizpůsobeno zjednodušené situaci podle modelu CLAYPOS, výsledky se stanou srovnatelnými a většina z nich se nachází v dostatečné shodě, pouze s výjimkou koncentrací ^{230}Th a ^{226}Ra v pórové vodě, které se zásadně liší. Tento rozdíl však nebyl uspokojivě objasněn bez pokračování dalších výpočetních kroků.

Srovnávací výpočty byly provedeny i pro hydrogeologický model na lokalitě Čihadlo, a to v programu MODFLOW a d3f++. Lze konstatovat, že srovnávané modely lokality Čihadlo vytvořené v softwaru MODFLOW a d3f++ jsou podobné, ale nejsou stejné. S různým rozsahem prvků modelu není možné plně replikovat distribuci hydraulické vodivosti, tedy propustnosti modelu MODFLOW v modelu d3f++. Je to pravděpodobně nejvýznamnější důvod pozorovaných rozdílů výsledků mezi modely.

Němečtí partneři také identifikovali určité obtíže při úspěšné konvergenci regionálního modelu d3f++ se zvodněnou vrstvou v první modelové vrstvě. Toto je pravděpodobně druhý důležitý zdroj rozdílů mezi výsledky modelu.

Některé malé rozdíly mezi výsledky modelu jsou způsobeny některými základními rozdíly mezi numerickými kódy MODFLOW (PROGEO) a d3f++ (GRS). První využívá metodu konečných diferencí, druhá využívá metodu konečných objemů. V MODFLOW jsou volné hladiny počítány pro centroidy modelových buněk, zatímco v d3f++ ve vrcholech prvků modelu. Některé další rozdíly vznikají, když je tok podzemní vody interpretován v modelové doméně. Dostupné údaje o toku podzemní vody z modelu d3f++ představují vektor Darcyho toku v centroidech prvků modelu. Data toku podzemní vody MODFLOW představují tok přes plochy sousedních modelových buněk.

Pro srovnání výsledků biosférického modelu byly použity GoldSim (ÚJV) a d3f++ (GRS). Výsledky výpočtů expozice vnějšího záření podle pobytu na kontaminované zemědělské půdě vypočtené podle českého a německého modelu jsou znázorněny na Obr. 54. U německého modelu nejsou uvedeny žádné dávkové koeficienty pro ^{36}Cl , ^{99}Tc a ^{135}Cs protože jejich příspěvek k vnější radiační dráze je považován za příliš nízký na to, aby ovlivnil celkovou dávku.



Obr. 54 Závislost koncentrace radionuklidů na čase v zemědělské půdě, vypočtené modelem ÚJV a GRS

Obecně platí, že u obou modelů byly obdobné tvarované křivky počítány s počátečním nárůstem a nasycením v určitém časovém bodě. Tento časový okamžik závisí na zpomalení v půdě, tj. čím vyšší je retardační koeficient, dosáhne se pozdější nasycení. Cl-36 a Tc-99 dosáhne nasycení po asi 5 letech a I-129 po asi 50 letech, zatímco u Cs-135 a Ra-226 saturace není dosažena dříve než po 104 letech. Srovnání ukazuje, že mobilnější radionuklidy Cl-36, Tc-99 a I-129 mají výrazně vyšší koncentrace v německém modelu ve srovnání s českým modelem. To platí také pro hodnoty vypočtené po 50 letech (referenční hodnota pro GRS) ve srovnání s hodnotami po 105 letech (referenční hodnota pro ÚJV). U ostatních tří radionuklidů jsou koncentrace po 50 letech v německém modelu nižší než koncentrace po 105 letech v českém modelu.

Srovnávání biosférických modelů ÚJV a GRS bylo pro obě strany velmi užitečné. Přestože toto srovnávání plně nevysvětlilo rozdíly mezi BDCF v modelech ÚJV a GRS, pomohlo nám lépe porozumět transportu radionuklidů biosférou. Také dodatečné ověření obou modelů odhalilo některé nedostatky v modelech nebo způsobech jejich použití, které by pak mohly být vyřešeny. Byly navrženy budoucí kroky procesu srovnávání a doufejme, že budou v rámci postupů QA (ověření modelu) ještě užitečnější.

4.6.12.3 Nejistoty řešení ZL

Většina nejistot, spojených s plněním tohoto ZL je spojená jednak s rozdíly, které jsou dány rozdíly ve vlastních modelech (viz výše kap. 4.6.11.2), jednak rozdíly v koncepčních modelech (zejména u modelu biosféry).

4.6.12.4 Návrh dalších prací

Pro srovnání programů CLAYPOS a GoldSim pro výpočty v poli blízkých interakcí a vysvětlení rozdílů ^{230}Th a ^{226}Ra mezi nimi je nutné provést specificky cílené výpočty s modifikovanými parametry. Tyto výpočty by měly být naplánovány a provedeny v dalším kroku společně s hodnocením složitější situace s počtem kontejnerů.

S ohledem na modelování toku a transportu by se budoucí kroky měly zaměřit na vytvoření modelů představujících úložiště, inženýrské bariéry a okolní hostitelskou horninu v různých měřítcích. Mělo by se praktikovat použití různých modelových přístupů (EPM, DFN, kombinované). Zvýšená pozornost by měla být zaměřena na logiku a důvěryhodnost propojeného popisu blízkého a vzdáleného pole. Měla by být vyzkoušena metodika převodu lomových vodivostí na prvky EPM. Robustní a komplexní modely toku a dopravy by měly být testovány postupně s ohledem na teplotu, průtok, koncentraci a mechanický vývoj prostředí obalů pro likvidaci odpadu. Přispěje to k realistickému popisu zdrojového členu.

Na základě výsledků porovnání modelů biosféry je navrženo pokračovat v tomto měřítku modelu biosféry a rozšířit jej na další transportní cesty. Zejména by mělo být zahrnuto chování radionuklidů v různých rostlinách a v dalších cestách směrem od zavlažování, protože zahrnutím požití živočišných produktů by mělo napomoci získat ucelený obrázek o rozdílech. Pro tuto druhou část cvičení je nutno do modelu GRS přidat nabožení dceřiných nuklidů v půdě. Kromě toho je třeba podrobněji vyhodnotit různé koncepční modely vnějšího vlivu. Ty by měly zahrnovat mezinárodní reference a doporučení. Co se týče dílčích modelů, mělo by se také být provedeno srovnání modelu ^{14}C a BDCF, protože cesta ^{14}C k rostlinám a zvířatům je ve srovnání s jinými radionuklidy ošetřena zcela odlišným způsobem. Nakonec je třeba porovnat příspěvky všech cest k BDCF, což také snižuje relevantnost příslušných cest.

Dalším zajímavým aspektem je, že český model je specifický, aplikovaný doposud na lokalitu Kraví Hora. Bylo by užitečné provést srovnání s obecnějším modelem biosféry, kde se zvažuje například další cesta přes rybníky a potoky / řeky, což nebylo případem zde uváděných referenčních hodnot.

Nakonec tým navrhuje zveřejnit výsledky pro celou referenční hodnotu ve společné publikaci.

4.6.12.5 Výstupy ZL

NOSECK U., BECKER D., SCHNEIDER A., HUSTÁKOVÁ H., HAVLOVÁ V., VETEŠNÍK A., UHLÍK J. (2020): Benchmark studies with GRS. – MS SÚRAO, ZZ 486/2020/ENG, Praha.

4.7 Charakterizace horninového prostředí

4.7.1 Vývoj a ověřování metodik pro charakterizaci horninového prostředí (PB-2014-ZL-S2566-012-Bedřichov)

Hlavní autoři: Hokr M., Rálek P. (TUL), Rowberry M. (ÚMSH), Málek J. (ÚGN), Rukavičková L. (ČGS), Havlová V., Hofmanová, V. (ÚJV), Bárta J. (G Impuls)

4.7.1.1 Cíl ZL

Cílem tohoto dílčího projektu byl vývoj metodik pro hodnocení a monitoring horninového prostředí a jejich ověření pro budoucí potřebu rutinního použití při charakterizaci horninového prostředí kandidátních lokalit. Metodiky zahrnují geofyzikální měření, hydrogeologické měření, měření chemického složení vody, měření posunů horninových masivů, seismická měření či měření transportních vlastností. Pro zmíněný účel je v tomto dílčím projektu využito existující podzemní pracoviště – vodárenský přivaděč v Bedřichově, kde práce navázaly na dřívější geologické výzkumy, mapování, měření a vývoj přístrojů pro monitoring a přenosy dat (Klomínský et al. 2008, Hokr et al. 2014). Přestože lokalita nespadá do oblasti uvažované jako kandidátní pro HÚ, díky přístupu do hloubky přes 100 m v obdobném geologickém prostředí uvažovaného HÚ poskytuje unikátní podmínky pozorování relevantních fyzikálních vlastností a procesů, srovnatelné s podmínkami aplikace metodik měření na jiných zájmových lokalitách.

4.7.1.2 Zhodnocení řešení projektu

Na řešení se podílely kromě partnerů v projektu „Výzkumná podpora bezpečnostního hodnocení hlubinného úložiště“ také subdodavatelé, Ústav struktury a mechaniky hornin AV ČR, Geofyzikální ústav AV ČR, Geologický ústav AV ČR a G-IMPULS, s.r.o. Účast institucí vyplývala z umístění pevně instalovaných přístrojů v jejich správě, dosavadních zkušeností na lokalitě, případně unikátního měření na odebraných vzorcích v minulosti.

Zhodnocení řešení v dalším textu je členěno podle jednotlivých tematických oblastí charakterizace. Podle kontextu je kladen důraz na různé aspekty použití metodiky, např. unikátní nově vyvinuté zařízení, způsob zpracování měřených dat a získávání informací, požadavky a omezení při praktické aplikaci v jiném prostředí, souvislosti mezi různými jevy apod.

Tunel propojuje vodní nádrž Josefův důl s úpravnou vody v Bedřichově, v délce cca 2600 m, s výškovým rozdílem 40 m, prochází granitovým masivem a dosahuje maximální hloubky cca 140 m pod povrchem. Tunelem prochází potrubí pro přívod surové vody z nádrže do úpravný. Terénní práce jsou prováděny v prostorách provozovaných Severočeskými vodovody a kanalizacemi a.s. (SČVK) s jejich souhlasem tak, aby nenarušily provoz zařízení pro vodárenské účely. Detailní popis geologie lokality je proveden ve zprávách Klomínského et al. (2008) – viz Obr. 55.

Pro měření vydatnosti průsaků byly nasazeny standardní metody měření (měrný přeliv v kanále, sklopný člunek) i přístroje či metody navržené řešiteli na základě známých principů (výtok otvorem z nádoby, válec s periodickým napouštěním). Pro měření hladiny byla použita ultrazvuková čidla, tlaková čidla LM307i (BD Sensor) připojená k ústřednám MS6 (Comet Loggers) a integrovaná tlaková čidla s dataloggerem Levelogger (Solinst). Měření

charakterizovalo jak časový vývoj průsaků, tak prostorové rozložení. To umožňuje charakterizovat hydraulické podmínky (tlaky, propustnosti) v okolí tunelu. Pozorování vazby mezi povrchovou infiltrací a vydatností vývěřů do tunelu, jeho souvislost s hloubkou a s typem vývěru má význam dalšího indikátoru charakteru podzemní vody i ve větších hloubkách a pro hodnocení stability podmínek v podzemí bez i s ovlivněním důlním dílem.

Doba zdržení (stáří) podzemní vody byla zjišťována pomocí vybraných přirozených stopovačů: stabilních izotopů ^2H a ^{18}O navazující na dosavadní řady vzorkování a prvně aplikovaný odběr na freony a SF_6 , s využitím dřívějších analýz obsahu tritia a helia (Šanda, 2013). Zjištěné doby zdržení z různých typů stopovačů na sebe navazují, ale některé (zejména freony) poskytují jen velmi široký interval. Doba zdržení v připovrchové zóně do cca 30 m hloubky je v jednotkách let, v hlubších částech jsou to pak první desítky let. Určení distribuce dob zdržení není z dat možné, ale teoreticky by mělo význam pro přesnější odhad míry ředění při migraci radionuklidů z úložiště.

Vzorkování na rozbor iontového složení podzemní vody bylo prováděno jednak jednorázově plošně ve všech vývěřech, jednak pravidelně v měsíčních intervalech ve vybraných třech vývěřech. U většiny složek a parametrů nebyl zjištěn žádný prokazatelný trend vývoje, kromě slabého nárůstu síranů a slabého poklesu hydrogenuhličitanů a celkového obsahu rozpuštěných látek, a to ani v dlouhodobějším měřítku (37 let). Terénní měření měrné elektrické vodivosti se ukázalo jako dobrý indikátor doby zdržení. Složení podzemních vod a jeho vývoj odpovídá relativně homogennímu prostředí jizerského granitu bez výrazných alterací a akcesorických minerálů. Je možné předpokládat, že pokud bude HÚ situováno do obdobného prostředí, stabilita chemického složení vod bude vysoká.

Po dílčích testech komponent monitorovacího systému (geofony, A/D převodníky) se podařilo sestavit a provozem ověřit sestavu splňující potřebné požadavky na monitoring seismicity v podzemí (vývoj ve spolupráci EE&S s.r.o. a ÚSMH). Podstatnou vlastností je vysoká citlivost na velmi slabé jevy (předpokládá se poloha studovaných lokalit v seismicky klidných oblastech), zároveň s odolností při překročení měřicího rozsahu rychlostí, tj. např. vlivem prací v okolí měření. Tunel v Bedřichově umožňuje takto ověřit i případnou jinou přístrojovou sestavu díky tomu, že je zároveň bez silných jevů a zároveň se v něm vyskytují pravidelné slabší jevy. Zpracovaná metodika obsahuje kombinaci obecných doporučení pro seismický monitoring v podzemí a hodnocení a doporučení konkrétního typu seismometru.

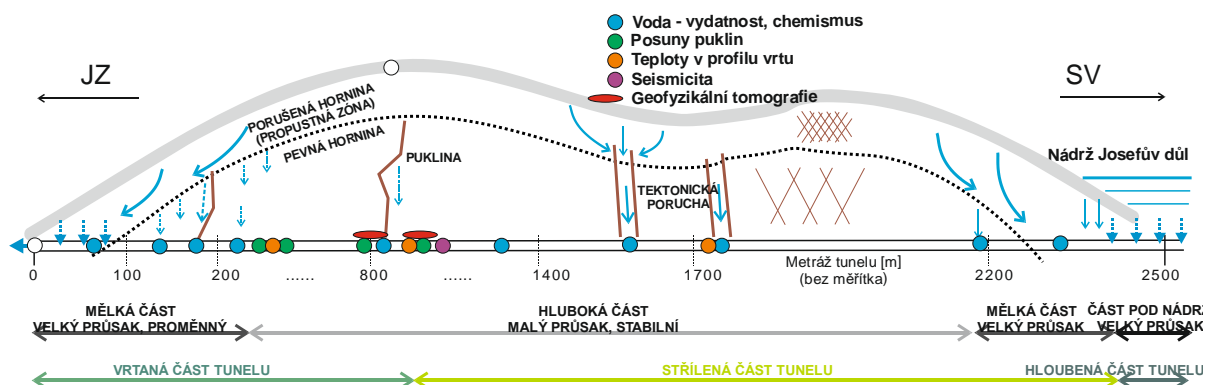
Mechanické chování puklin má pro HÚ význam v tom, že otevírání a zavírání puklin určuje podmínky pro transport látek, zatímco horizontální a vertikální smykové pohyby jsou projevem aktivních tektonických procesů. Pro měření byl použit extenzometr TM-71 vyvinutý na pracovišti ÚSMH (Košťák 1969), umožňující měřit posuny ve třech osách a rotace ve dvou rovinách, instalovaný na 4 stanovištích. Nově byly doplněny moduly automatického sběru dat a inovované hardwarové příslušenství – kamery a podsvícení a také bylo aplikováno automatické softwarové vyhodnocení snímků kamer kódem v Matlabu. Monitoringem nebyly zjištěny tektonické pohyby. Neprokázaly se denní/půldenní periodické pohyby pozorované v některých lokalitách. Sezónní změny probíhaly odlišně na jednotlivých stanovištích, v jednom případě v menší hloubce dokonce zanedbatelné. Korelace s dalšími jevy se prokázaly pouze výjimečně.

Teplotní monitoring probíhal ve vrtech ze stěny tunelu: na jednom do hloubky 3,8 m, na dvou do hloubky cca 2 m, stanoviště reprezentují různou hloubku tunelu pod povrchem a podmínky pevné horniny bez proudění vody proti podmínkám zvodněné zóny. Okrajové podmínky

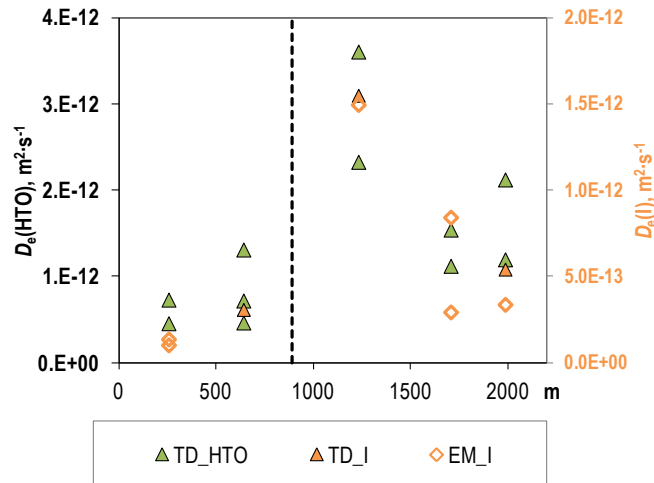
(na povrchu) jsou reprezentovány měřeními teplot půdy v lese a na louce a v různých hloubkách v nádrži Josefův důl. Použity byly ústředny M4016 s převodníky TEP06/S a jednotky Minilog, vše od výrobce FIEDLER AMS s.r.o. Potvrdily se dříve pozorované trendy řízení jevů teplotou potrubí a příspěvek advektivního přenosu tepla v místě s podzemní vodou. Způsob osazení vrtů teplotními čidly se ukázal jako velice spolehlivý a nedocházelo k přenosu tepla mezi jednotlivými čidly mimo horninový masiv. Byl také ověřen způsob kontroly teplotního řetězce bez vyjmutí systému z vrtu.

Pro měření odporové tomografie (ERT) byla použita aparatura ARES II a pro seismické měření aparatura Terraloc Mk-6. Odporová tomografie znovu potvrdila, že měrné odpory se v čase mění. Jediným reálným důvodem mohou být změny obsahu vody (vlhkosti) v puklinovém systému horniny, případně změny mineralizace vody (ty se ale měřeními na vývěrech nepotvrdily). Ze seismického měření byly zjištěny změny v charakteru tvaru některých naměřených hodochron, které vedly k revizi dosud uplatňovaných zásad při charakterizaci seismických vln. Byla formulována hypotéza, že v blízkém okolí výrubu (jednotky až první desítky metrů) v granitovém masivu mohou vznikat odrazné plochy nebo se zde může měnit napjatost prostředí.

Na vybraných vzorcích z tunelu Bedřichov byla provedena stanovení zahrnující ultrazvukové rychlosti (anizotropie), porozitu (více metod), hydraulickou vodivost a efektivní difúzní koeficient pro ^3H a ^{125}I (viz Obr. 56). Vzorky byly získány vrtáním jader z vylámaných bloků, ze dvou stanovišť ve vrtané a pěti stanovišť ve střílené části, v různé hloubce tunelu pod povrchem. Z výsledků migračních testů s tritiovou vodou a jodidem byl patrný vliv velikosti vzorků. Na vzorcích o délce 5 cm byly naměřeny nižší hodnoty efektivního difúzního koeficientu jodidu než u vzorků o délce 1 cm a bylo prokázáno, že nejde o vliv jiné migrační techniky. Příčinou může být nereprezentativní velikost vzorku při hrubých zrnech granitu nebo větší roli porušené krajové zóny vzniklé přípravou vzorků. Vzájemný vztah parametrů a původu vzorků je konzistentní: ze střílené části tunelu byly naměřeny větší hodnoty porozit, hydraulických vodivostí a efektivních koeficientů než z ražené části tunelu. Z ultrazvukového prozařování jádra z 1,5 m dlouhého vrtu byla dobře detekována zóna EDZ poklesem rychlostí u střílené ražby v porovnání s vrtanou.



Obr. 55 Schéma lokality a monitoringu: podélný profil hydrogeologických podmínek tunelu, orientační umístění jednotlivých bodů měření



Obr. 56 Porovnání difúzních koeficientů tritia a jodidu (z dvou různých metod), vynesená v závislosti na poloze vzorků žuly v tunelu

4.7.1.3 Nejistoty řešení ZL

Vyhodnocení vydatnosti vývěřů je omezeno nedostupností údajů o hladině podzemní vody a přímého měření vertikálního rozložení (ve vrtu). Nejistotou je také obtížné odlišení přirozených jevů v měřítku masivu od artefaktů efektu tunelu v malém měřítku (odpařování, zavzdušnění puklin/hadic).

Nejistota určení doby zdržení vyplývá ze známých omezení jednotlivých metod (stopovačů). V případě pohybu výrazně nehomogenní horninou roste nejistota při použití pístového modelu bez znalosti konkrétní distribuce dob zdržení. Dostupnost stopovačů je omezena nemožností vzorkovat velmi slabé vývěry (kapající) bez kontaktu s atmosférou.

Při vyhodnocení posunů puklin se nepodařilo s jistotou určit příčiny. Je také obtížné propojit data z dřívějších ručních snímků a staré verze kamer, kvůli nedostatečné kvalitě pro automatické softwarové vyhodnocení. Nejistotou při měření teplot je drift čidel. Vyhodnocení teplot je limitováno daty v omezené vzdálenosti od stěny tunelu.

Geoelektrická měření mohou být ovlivněna bludnými proudy souvisejícími s chováním kovového vodovodního potrubí jako vodiče. Při povrchu štoly také některé měřicí body ukazují na obrácenou polaritu elektrického pole, což nelze klasickým předpokladem spojitého prostředí vyhodnotit.

4.7.1.4 Návrh dalších prací

Lokalita vodárenského přivaděče Bedřichov je unikátní více než desetiletou monitorovací řadou většiny měření. Dlouhodobé změny v granitu i reakce jevů na neřiditelné přírodní události/procesy (klimatické, seismické) jsou účelné pro porozumění systému, proto je třeba doporučit pokračování monitoringu, minimálně provozu „bezobslužných“ přístrojů a vzorkování vyžadujícího kontinuitu. Řešitelé provozují „minimální“ režim na vlastní náklady do doby dalších jednání.

Jako alternativa k měření teplot pomocí „bodových“ Pt čidel existuje relativně nová technologie monitoringu prostorového rozložení teplot pomocí optického vlákna (DTS).

Lze použít i další geofyzikální metody po vyřešení některých technických omezení a jejich propojení nebo společná interpretace se stávajícími (Metoda přirozených elektrických polí, Vyzvaná polarizace, Pasivní seismika blízkých seismických zdrojů, Geologický radar). Jevy spojené s obrácenou polarizací by mohlo jít vysvětlit pomocí Kirchhoffových zákonů (nespojité vedení elektrickou sítí).

Při stanovování migračních parametrů hornin by bylo vhodné zjistit míru porušení vzorku jeho přípravou a tuto nehomogenitu zahrnout do vyhodnocování, tj. odhadovat migrační parametry pro neporušenou horninu. Dalším východiskem by mohlo být měření migračních parametrů na větších vzorcích, nad rámec současných rutinních postupů.

4.7.1.5 Výstupy ZL

HOKR M., RUKAVIČKOVÁ L, HAVLOVÁ V. A KOLEKTIV (2018): Vývoj a ověřování metodik pro charakterizaci horninového prostředí – výsledky monitoringu v přivaděči Bedřichov. – MS SÚRAO ZZ 289/2018, Praha.

RUKAVIČKOVÁ L, ŘIHOŠEK J. A KOLEKTIV (2018): Metodické poznatky z monitoringu chemického složení podzemních vod v podzemních dílech. Příloha č.4 k TZ 289/2018.

RÁLEK P., HOKR M., RUKAVIČKOVÁ L, HOLEČEK J. (2018): Měření vydatnosti průsaků do podzemního díla – metodické poznatky z aplikace. Příloha č.5 k ZZ 289/2018.

ROWBERRY M., MARTÍ X. (2018): Metodické poznatky z monitoringu posunů puklin, Příloha č.6 k ZZ 289/2018.

MÁLEK J., ŽANDA L. (2018): Metodické poznatky ze seismického monitoringu, Příloha č.7 k ZZ 289/2018.

DĚDEČEK P., ŠAFANDA J. (2018): Metodické poznatky z monitoringu teplot, Příloha č.8 k ZZ 289/2018.

BÁRTA J. A KOLEKTIV (2018): Metodika geofyzikálního monitorování granitového masivu v systému čtvrtletních až ročních časových intervalů. Příloha č.9 k ZZ 289/2018.

BALVÍN A., HOKR M., ŠTEKLOVÁ K., RÁLEK P. (2020): Inverse Modeling of Natural Tracer Transport in Granite Massif with Lumped Parameter and Physically Based Models: Tunnel Case Study. Zasláno do Hydrogeology Journal Topical Collection.

4.7.2 Matematické modelování křehkého porušení horninového prostředí metodou DFN (PB-2016-ZL-S1351-030-DFN)

Hlavní autoři: Kabele P., Nežerka V. (FSv ČVUT), Švagera O. (ČGS)

4.7.2.1 Cíl ZL

Cílem zakázkového listu bylo zkonstruovat DFN (Discret Fracture Network) modely puklinových sítí pro generickou lokalitu, PVP Bukov a pro sedm potenciálních lokalit pro HÚ v České republice, za využití geologických dat získaných terénními pracemi. K tomu bylo třeba vyvinout software, který bude tato terénní data zpracovávat metodou DFN (Discrete Fracture network modelling) a navrhnout metodiku sběru terénních geologických dat tak, aby byla s tímto softwarem kompatibilní a podávala i při malém objemu terénních dat dostatečné informace pro tvorbu matematického modelu.

Jako první byla provedena rozsáhlá rešerše (Somr et al. 2016), která sloužila jako teoretický základ pro navazující práce. Dále byla vytvořena metodika sběru a předzpracování terénních dat, založená na dokumentaci a digitální 3D rekonstrukci výchozů a následném zpracování získaných dat (Švagera et al. 2017).

Za využití tohoto postupu byla získána data obsahující informace o prostorové orientaci a koncových bodech stop jednotlivých puklin na 8 až 21 výchozech na každé lokalitě (mimo lokalitu generickou). Souběžně s terénními pracemi byl vyvíjen software DFraM, který data získaná z terénu využívá jako vstupní informace a následně identifikuje statistické parametry odpovídajících trojrozměrných DFN sítí. Teorie tvorby DFN modelů, jejich identifikace, algoritmizace a implementace kódu programu DFraM je detailně popsána v závěrečné zprávě projektu (Kabele et al. 2018). Program je rovněž možno využít pro generování libovolného množství realizací DFN modelů v uživateli specifikovaném objemu horninového masivu. Zmíněná funkcionalita byla v rámci tohoto ZL využita pro tvorbu DFN modelů na všech lokalitách.

4.7.2.2 Zhodnocení řešení projektu

V rámci tohoto ZL byl vytvořen jednotný systém tvorby realistických modelů puklinových sítí v horninovém prostředí založený na datech získaných terénním strukturně geologickým mapováním. Systém je složen z následujících elementů:

- metodiky sběru, 3D digitalizace, expertního vyhodnocení a přípravy terénních dat pro následné výpočty;
- definování odpovídajícího geometrického popisu jednotlivých puklin a výběr vhodných statistických distribucí, odpovídajících prostorovému umístění, orientaci, hustotě a velikosti těchto puklin;
- metodiky a algoritmizace pro automatickou identifikaci distribučních parametrů zakomponované do programu DFraM (Tab. 25);
- tvorby DFN modelů jako geometrické reprezentace porušeného horninového prostředí za pomoci programu DFraM.

Předložený systém bere v potaz současné omezené podmínky sběru terénních dat na jednotlivých lokalitách, tak že je schopen pracovat i s limitovaným souborem terénních strukturních dat. Systém je nicméně schopen pracovat s daty sebranými na jakékoli ploše horninového masivu, jakými jsou například stěny štol nebo kopané rýhy.

Metody geologického průzkumu byly specificky zaměřeny a upraveny tak, aby bylo možné získat co největší množství kvantitativních informací o prostorové orientaci, velikosti a distribuci křehkých struktur (puklin) ze skalních výchozů. Aktuálně je pro 3D rekonstrukci výchozů využívána metoda fotogrammetrie. Data jsou sbírána pouze pro křehké struktury, které jsou charakteristické pro celé horninové prostředí tedy struktury vzniklé těžbou, odstřely nebo exfoliačními procesy jsou zanedbány. Odborná příprava vstupních dat rovněž zahrnuje eliminaci zanedbatelných struktur nejmenšího měřítko a kategorizaci puklin do populací na základě jejich původu a prostorové orientace.

DFN modelování je založeno na předpokladech, které jsou běžně přijímány v odborných pracích: pukliny jsou popisovány jako polygony vepsané do elips, jejich prostorová distribuce je založena na Poissonově rozdělení, jejich orientace sleduje Fisherovo rozdělení a jejich

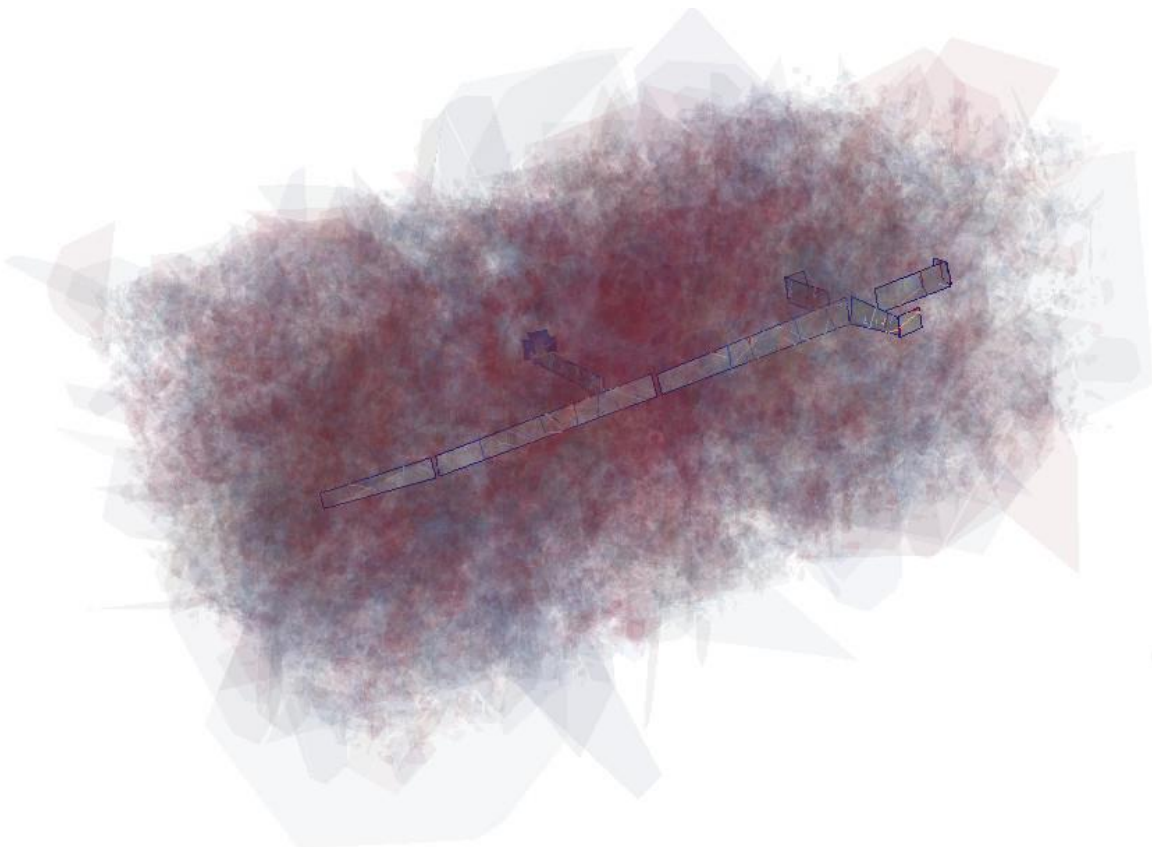
velikost odpovídá power law distribuci. Zatímco kalibrace Fisherova rozdělení využívá zavedené odhady maximální pravděpodobnosti, které mohou být vyhodnoceny přímo z terénních dat, metoda vyplývající ze zde provedeného výzkumu je využita pro identifikaci hustoty puklin v objemu a parametrizaci distribuce puklin na základě jejich velikosti. Metoda využívá optimalizačních úloh, které kvantifikují nesoulad mezi pozorováním v terénu a simulacemi modelu z hlediska pozorovatelných veličin, které lze vyhodnotit na pozorovacích oknech (např. výchozech). Jako pozorované veličiny byly použity plošné hustoty puklin P_{20} nebo počet puklin a jejich průměrná délka vyhodnocená na výchozech. Optimální hodnoty parametrů modelu jsou pak identifikovány minimalizací optimalizační úlohy. Kvůli inherentní náhodnosti DFN modelů, je proces identifikace potenciálně velmi výpočetně náročný. Aby byl tento aspekt zmírněn, byly použity techniky intervalu spolehlivosti pro úsporu průměrování souborů a specializovaný postup optimalizace pro minimalizaci počtu volání optimalizačních funkcí.

Tab. 25 Identifikované parametry DFN sítě pro lokalitu Čertovka

Population	Mean direction					κ (-)	x_{\min} (m)	α (-)	P_{30} (m ⁻³)	JSD (-)
	Strike (°)	Dip (°)	vector μ (-)							
1	196	80	0.947	-	-	6.062	0.539	2.99	0.07305	0.1339
2	156.1	83.3	0.908	0.402	-	8.473	0.666	2.857	0.03806	0.3693
3	282.3	89.5	-	-	-	9.903	0.488	2.988	0.09523	0.1655
4	244.7	75.4	0.413	-	-	13.302	0.132	2.876	0.30653	0.3838
5	78.1	46.4	-	0.149	-	37.04	1.784	2.133	0.00129	0.6791
6	325.9	26.4	-	0.369	-	27.286	0.232	2.295	0.01548	0.3846
7	167	23.8	0.394	0.091	-	19.129	0.451	2.768	0.02279	0.0712

Výše uvedené předpoklady a metody jsou využívány v programu DFraM, jehož vývoj byl zahájen speciálně pro účely tohoto projektu. Program nabízí dvě hlavní funkce: a) identifikaci parametrů modelu DFN pomocí terénních dat; a b) konstrukci modelů DFN za použití známých parametrů. Vzhledem k efektivním algoritmům uvedeným v předchozím odstavci může být velmi náročná identifikace parametrů DFN řešena pro reálné problémy (zahrnující objemy horninového masivu řádově 10³-10⁶ m³) během desítek hodin na stolním počítači. Na druhou stranu, generování modelu DFN s předem určenými parametry je výrazně rychlejší a trvá pouze několik minut.

DFraM byl využit k identifikaci parametrů a vytvoření modelů DFN generické lokality, lokality PVP Bukov (Obr. 57) a sedmi potenciálních lokalit HÚ. Generická lokalita sloužila především jako „sandbox“ pro vyladění metodiky získávání dat v terénu a předběžného zpracování a počátečního vývoje softwaru DFraM. Vzhledem k tomu, že se jednalo pouze o jeden výstup, model DFN nelze považovat za reprezentativní vzhledem k nedostatku vstupních dat. Model lokality PVP Bukov je specifický v tom smyslu, že všechna pole data byla získána v poměrně těsně rozmístěných dokumentačních oknech v rámci stěn tunelu v hloubce cca. 600 m pod povrchem země. Naopak, všechna potenciální místa pro HÚ byla zkoumána výhradně na povrchových výchozech rozestých na velké oblasti. Shrnutí optimalizovaných parametrů DFN je uvedeno ve zprávě Kabele et al. (2018). Generované modely DFN byly ověřeny nezávisle vyvinutým programem DFN_verify, jak je dokumentováno v ověřovacích protokolech připojených k závěrečné zprávě ZL Kabele et al. (2018). Protokoly zahrnují, mimo jiné údaje porovnávající výsledky modelování s daty o prostorové orientaci měřených struktur a distribucemi délek jejich stop získaných z terénního průzkumu. Toto srovnání do jisté míry umožňuje ověřit přístup k modelování. Vzhledem k tomu, že prezentované modely jsou výsledkem vlastní výzkumné práce, doporučujeme je podrobit dalšímu nezávislému odbornému přezkumu.



Obr. 57 Vizualizace DFN modelu PVP Bukov z výstupního souboru *vtk v programu ParaView

4.7.2.3 Nejistoty řešení ZL

Navzdory systematickému přístupu, který byl v tomto projektu přijat, je třeba si uvědomit následující omezení a při interpretaci a dalším využití prezentovaných výsledků postupovat opatrně:

- Terénní data pro každou z potenciálních lokalit HÚ byla získána z několika (8 až 21) výchozů rozložených na ploše desítek km² na povrchu Země. Z výchozů, jejichž celková plocha činí řádově stovky m², bylo nutné charakterizovat objem řádově desítek km³. Jelikož výchozy byly v prostoru rozesety velmi řídky, identifikované parametry DFN vykazují vysokou míru nejistoty.
- Geologické a geomechanické jevy, které mohly ovlivnit prostorovou distribuci a orientaci modelovaných křehkých struktur, byly brány v úvahu pouze ve fázi terénního průzkumu a předzpracování dat (např. vyloučením struktur způsobených exfoliačními procesy). Kromě toho jsou modely čistě statistické. Zejména nebyla brána v úvahu žádná možná změna hustoty puklin, jejich velikosti nebo orientace s hloubkou.
- Statistické modely DFN zahrnují pouze distribuované pukliny, jejichž ekvivalentní průměr byl omezen na ~ 40 m. V modelech nejsou zahrnuty žádné větší, obvykle lokalizované tektonické jevy, např. zlomy a jejich doprovodné jevy. V případě nutnosti by tyto měly být popsány deterministicky jako odlišné geometrické prvky a vloženy přes statistické DFN.

Zde prezentovaný modelovací přístup systematicky navazuje na pravděpodobnostní rámec, ve kterém jsou všechny modelované parametry DFN sítí zároveň parametry vhodných pravděpodobnostních rozdělení. Proto jakákoli interpretace výsledků tohoto identifikačního postupu nebo následné numerické simulace musí zahrnovat reprezentativní soubor realizací DFN.

4.7.2.4 Návrh dalších prací

I když byly dokončeny všechny cíle tohoto ZL, další potenciál pro rozvoj modelování DFN lokalit HÚ se nachází zejména v následujících směrech:

- Pokud by existovala další kampaň pro sběr dat za účelem modelování DFN, bylo by vhodné zaměřit se na menší oblasti, kde je terénní situace dobře zdokumentována a poskytuje nejlepší příležitost k rozšíření stávajícího souboru dat. Zaznamenaná data by měla také obsahovat informace o rozevření a výplních puklin, které jsou nezbytné pro následné hydrogeologické modelování. Kromě sběru dat z terénu ze stávajících výchozů by informace získané průzkumnými vrty nebo kopanými rýhami významně přispěly k dalšímu pochopení distribuce křehkého porušení horninového masivu na zkoumaných lokalitách a zdokonalení DFN modelování.
- Metodika DFN modelování a identifikace a její implementace do softwaru DFraM může být rozšířena zejména v následujících oblastech:
 - implementací dalších statistických rozdělení pro zjištění velikosti puklin ke stávajícímu power law (např. log-normální nebo gamma distribuce)
 - zkoumáním dalších způsobů optimalizace, které by přísněji sledovali podobnost simulovaných a z terénních dat získaných distribucí pozorovatelných proměnných (např. na základě Jensen-Shannon divergence);
 - schopnosti pracovat s lineárními dataseťmi získanými například vrtným průzkumem;
 - možností vkládat do statistických DFN modelů deterministické prvky jakými jsou například přesně lokalizované struktury velkého rozsahu (zlomy).

- Pro účely následných hydrogeologických simulací musí být generované DFN dále upraveny. Zejména musí být identifikovány vzájemně propojené vodivé pukliny, které mají dominantní vliv na proudění kapalin, zatímco malé izolované pukliny musí být z modelu odstraněny. Tento krok značně sníží velikost modelu a usnadní jeho diskretizaci. Je rovněž žádoucí vylepšit model DFN možnostmi propojit hydraulické parametry (jako je rozevření) s každou puklinou. Formát výstupních dat musí být přizpůsoben specifickým požadavkům simulačních softwarů využívaných pro hydrogeologické modelování.
- S ohledem na geometrickou složitost a velké objemy dat DFN modelů doporučujeme jejich použití pro hydrogeologické výpočty v lokálním měřítku, které představují objemy horninového masivu řádově 10^3 - 10^6 m³.

Unikátní synergie terénního průzkumu a matematického modelování, která vznikla během tohoto projektu, poskytuje širokou paletu informací, které by měly být dále zkoumány a vyhodnocovány z geologického a statistického hlediska a integrovány do dalších aspektů hodnocení bezpečnosti.

4.7.2.5 Výstupy ZL

SOMR M., NEŽERKA V., KABELE P., ŠVAGERA O. (2016): Review of discrete fracture network modeling. – MS SÚRAO. TZ 74/2016, Prague.

ŠVAGERA O., BUKOVSKÁ Z., FRANĚK J., JELÍNEK J., SOEJONO I. (2017): Metodika dokumentace výchozových partií pro účely DFN modelování. – MS SÚRAO. Technická zpráva, Praha.

KABELE P., ŠVAGERA O., SOMR M., NEŽERKA V., ZEMAN J., BUKOVSKÁ Z., FRANĚK J., JELÍNEK J., SOEJONO I. (2018): Mathematical modeling of brittle fractures in rock mass by the mean of DFN method. – MS SÚRAO. TZ 286/2018. SÚRAO.

Program DFraM sestávající z jednotlivých skriptů v jazyce python a který je na vyžádání přístupný v rámci GPLv3 licence.

XLS databáze terénních měření a geologicky předzpracovaných informací pro následné DFN modelování.

Generické a lokalizované DFN modely a modely výchozů.

4.7.3 Předběžné hodnocení lokalit z hlediska dlouhodobé bezpečnosti (PB-2016-ZL-S2058-032-Hodnocení lokalit)

4.7.4 Charakterizace horninového prostředí / Předběžné hodnocení lokalit EDU–západ a ETE–jih z hlediska dlouhodobé bezpečnosti (PB-2017-ZL-S4076-039-HodnoceniEDU_ETE)

Oba zadávací listy byly řešeny v úzké návaznosti a budou tedy vyhodnoceny společně.

Hlavní autoři: Havlová V., Červinka R. (ÚJV), Polák M., Milický M., Uhlík J., Baier J., Gvoždík L. (PROGEO), Říha J. (TUL), Bukovská Z., Mixa P., Pertoldová J., Hroch T., Štědrá V. (ČGS)

4.7.4.1 Cíl ZL

Výběr lokalit pro umístění hlubinného úložiště je třeba v souladu s doporučeními IAEA a směrnicí Rady EU pro nakládání s VJP a RAO provádět postupnými kroky směřujícími ke snížení počtu a rozsahu lokalit se zvyšujícím se rozsahem znalostí o lokalitách. Charakteristiky a vlastnosti lokalit vybraných v první etapě prací by měly indikovat, že mohou být na vybraných lokalitách splněny všechny požadavky na HÚ a že jejich splnění může být důvěryhodně prokázáno.

Oba výše uvedené ZL byly řešeny společně. Důvodem oddělení bylo připojení lokalit EDU-západ a ETE-jih k 7 dříve vybraným lokalitám (Březový potok, Čertovka, Čihadlo, Horka, Hrádek, Kraví hora, Magdaléna).

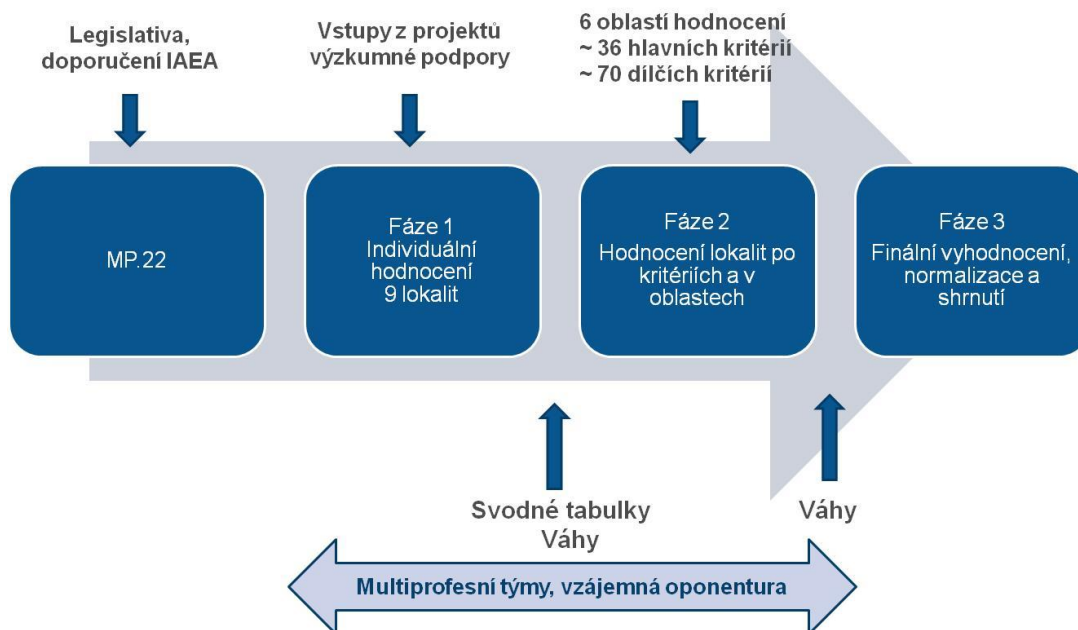
Cílem propojených zadávacích listů byla příprava a zpracování metodických postupů pro pilotní vyhodnocení lokalit z hlediska kritérií, ovlivňujících dlouhodobou bezpečnost, a to ve dvou fázích. V první fázi měla být shrnuta dostupná data z lokalit a vyvíjena metodika pilotního hodnocení. Ve druhé fázi měly být lokality hodnoceny dle kritérií odvozenými pracovníky SÚRAO z požadavků SÚJB (nová vyhláška o umístování jaderných zařízení) a IAEA (NS-R-3 rev.1 Site Evaluation for Nuclear Installations Safety Requirements, 2016; SSG-14 Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste, 2011) na vlastnosti lokality, které mají vliv na dlouhodobou bezpečnost HÚ (Vokál et al. 2017). Lokality byly hodnoceny podle následujících kategorií kritérií:

- 1) Popsatelnost a predikovatelnost geologických vlastností lokalit
- 2) Hydrogeologické vlastnosti lokalit
- 3) Stabilita lokalit (seismická, klimatická, vertikální pohyby, postvulkanické jevy)
- 4) Pravděpodobnost intruze (neúmyslného vzniku člověka do úložiště)
- 5) Slučitelnost vlastnosti horninového masivu s inženýrskými bariérami
- 6) Transportní vlastnosti lokalit

Cílem tedy bylo vyhodnotit lokality Březový potok, Čertovka, Čihadlo, Horka, Hrádek, Kraví hora, Magdaléna (ZL Předběžné hodnocení lokalit z hlediska dlouhodobé bezpečnosti) a Dukovany (EDU-Z) a Temelín-jih (ETE-J; Předběžné hodnocení lokalit EDU-západ a ETE-jih z hlediska dlouhodobé bezpečnosti).

4.7.4.2 Zhodnocení řešení projektu

Pilotní hodnocení všech lokalit bylo provedeno dle postupu, uvedeného v Havlová et al. (2018a) v následujících fázích (viz Obr. 58). Způsob hodnocení, včetně přiřazení a hodnot vah jednotlivých kategorií kritérií byly diskutovány a odsouhlaseny expertním týmem na workshopu Hodnocení lokalit ve dnech 23.-25.5. 2018 v Rohanově u Vacova.



Obr. 58 Postup hodnocení lokalit z hlediska vhodnosti pro umístění HÚ z hlediska dlouhodobé bezpečnosti

Fáze 1 Hodnocení jednotlivých lokalit


Každá lokalita je vyhodnocena dvojstupňově v individuální zprávě (Havlová et al. 2018 b-l). První stupeň představuje vyhodnocení ve vztahu k legislativním požadavkům na vhodnost lokality pro umístění HÚ dle vyhlášky č. 378/2016 Sb., kdy jsou zodpovězeny následující otázky pro každou lokalitu:

- 1) Zjištěné informace o posuzované vlastnosti lokality spíše vedou k závěru, že požadavek bude splněn (příležitost převažuje nad rizikem), tj. nebyla zjištěna vlastnost lokality, při jejímž překročení je umístění úložiště zakázáno.
- 2) Zjištěné informace o posuzované vlastnosti indikují překážku či problém ke splnění požadavku či možné problémy s jeho prokázáním (riziko převažuje nad příležitostí). Zde bude posouzena možnost odstranění překážky či problému pomocí technického či administrativního opatření a náročnost provedení tohoto opatření.

Ačkoli skutečnosti, uvedené ve zprávách Havlová et al. (2018a-l) indikují potenciální překážky ke splnění požadavků pro umístění HÚ (hluboké vrtné práce, poddolovaná území, výskyt drobných vodních zdrojů), žádná z těchto překážek se explicitně nevyskytuje na pozemku, na němž je uvažováno umístění HÚ, či se ze své podstaty jeví jako málo významné (krasové jevy) či technicky překonatelné (málo významné zdroje pitné vody). I poddolovaná území či vrtné práce se nacházejí v širším území, hodnoceném pro umístění HÚ, nikoli na pozemku potenciálního jaderného zařízení (HÚ). Z tohoto důvodu výše uvedené skutečnosti nepředstavují vylučující kritérium a je možno dle názoru expertního kolektivu HÚ na daná hodnocení území umístit.

Fáze 2 Hodnocení lokalit dle jednotlivých kategorií kritérií

Druhý stupeň představuje vyhodnocení podle indikátorů vhodnosti pro umístění HÚ z hlediska dlouhodobé bezpečnosti.

 SÚRAO	Závěrečná zpráva projektu Výzkumná podpora pro bezpečnostní hodnocení HÚ	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 462/2020

Výsledky individuálního hodnocení lokalit byly shrnuty do svodných tabulek, kvantifikovány a vyhodnoceny v jednotlivých kategoriích kritérií ve vztahu k hodnocení dlouhodobé bezpečnosti (Havlová et al 2018l).

Jednotlivá kritéria v rámci hodnocení lokalit nemají stejný význam pro dlouhodobou bezpečnost HÚ. Tento rozdíl byl vyrovnán použitím vah.

Výsledkem hodnocení je pak součet vážených hodnot interních vah, které odrážejí význam a vliv jednotlivých kategorií kritérií pro hodnocení bezpečnosti v rámci jednotlivých kategorií hodnocení. Výsledky vyhodnocení lokalit v jednotlivých kategoriích kritérií jsou uvedeny v Havlová et al. (2018l).

Fáze 3 Komplexní hodnocení všech lokalit

Lokality, které nemají vlastnosti, které by vylučovaly umístění úložiště, jsou vzájemně porovnány na základě vybraných charakteristik lokalit, které umožňují indikovat větší či menší vhodnost lokality pro umístění hlubinného úložiště, a to opět se zavedením vah a součtu vážených hodnot. Ten pak umožňuje vzájemné porovnání lokalit.

Výsledek výchozího hodnocení pomocí kvantitativní škály (Havlová et al. 2018l) ukázal, že použití škály „známek“ (jako ve škole) je poněkud zavádějící (1 nejlepší – 5 nejméně vhodná) a že bez normalizace hodnocení je rovněž problematické řadit a srovnávat vedle sebe diametrálně odlišná a jinak nepoměřitelná kritéria.

Z tohoto důvodu bylo SÚRAO zadáno dodatečné doplnění výchozího hodnocení Havlová et al. (2018l) nadstavbovým hodnocením, které by použilo jednak bodový systém 5 (nejvhodnější) – 1 (nejméně vhodné) pro hodnocené charakteristiky kritérií a dále by do hodnocení zavedlo normalizaci, která umožní porovnání jednotlivých kategorií kritérií mezi sebou.

Svodné tabulky výsledků hodnocených kategorií kritérií byly přejety ze zprávy Havlová et al. (2018l).

Pro normalizované hodnocení byly použity stanovené váhy jednotlivých kritérií v rámci jednotlivých kategorií i kategorií jako takových. Váhy byly zachovány a jsou základním východiskem pro zpracování svodné tabulky dat pro všechny lokality a všechny kategorie kritérií (Havlová et al. 2018a,l). Jeho výsledky pak představovaly další podklady pro aktualizované hodnocení lokalit v ZL Aktualizace hodnocení lokalit z hlediska dlouhodobé bezpečnosti (viz kap. 4.7.6).

4.7.4.3 Nejistoty řešení ZL

V dané fázi hodnocení je jednoznačné, že nedostatek informací o geologické stavbě, hydrogeologické situaci či o vlastnostech hornin či vod z hloubky, odpovídající hloubce HÚ, bude zatěžovat hodnocení značnou dávkou nejistoty. Bude podléhat možnému zkreslení z aproximace malého množství informací, a to zejména z povrchového výzkumu, a je mnohdy založen na expertním odhadu, zkušenostech řešitelského kolektivu a archivních datech.

Při zpracování hodnocení byly identifikovány nejistoty v možnosti dostatečným způsobem popsat geologickou stavbu a zejména zlomové struktury. Tento závěr vedl k vytvoření nového ZL Geologická interpretace terénních geofyzikálních dat pro aktualizaci 3D strukturně-

geologických modelů potenciálních lokalit HÚ (PB-2017-ZL-S2196-037-Geofyzika; viz kap. 4.7.5), jehož cílem bylo zpřesnění znalosti horninového prostředí do hloubky a následná aktualizace stávajících 3D geologických modelů. Tyto pak představovaly základní vstup pro aktualizované hodnocení lokalit v ZL Aktualizace hodnocení lokalit z hlediska dlouhodobé bezpečnosti (viz kap. 4.7.6).

V etapě invazivního průzkumu mohou být výsledky tohoto hodnocení překonány.

4.7.4.4 Návrh dalších prací

Objektivně porovnatelných parametrů pro jednotlivá kritéria bychom docílili pouze při stejné úrovni poznání devíti lokalit. Je tedy jasné, že další postup prací bude založen na informacích z dalších pokročilých výzkumných a průzkumných prací na lokalitě, které budou v nejlepším možném případě podpořeny invazivními pracemi, jako jsou zhotovení hlubokých vrtů, kopané rýhy a sondy, či hloubkovou geofyzikou atd. Jak bylo zmíněno výše, při zpracování hodnocení byly identifikovány neurčitosti v dostupných datech popisujících geologickou stavbu a zejména zlomové struktury. Tento závěr vedl k vytvoření nového ZL Geologická interpretace terénních geofyzikálních dat pro aktualizaci 3D strukturně-geologických modelů potenciálních lokalit HÚ (PB-2017-ZL-S2196-037-Geofyzika; 4.7.5), jehož cílem bylo zpřesnění znalosti horninového prostředí do hloubky a následná aktualizace stávajících 3D geologických modelů. Nicméně povrchové geofyzikální práce nemohou kompletně nahradit detailní průzkumné práce s použitím intruzivních technik (vrty, sondy apod.).

Metodiku hodnocení je možno buď zachovat či přehodnotit ve vztahu např. ke zkušenostem ze zahraničí či ke zkušenostem s jinými postupy (a to i ve vztahu k oficiálním podkladovým dokumentům, jako je směrnice SÚRAO Vokál et al. (2017) a legislativě), nicméně se domníváme, že bude vždy vhodné vyhodnotit váhu (vliv) jednotlivých kategorií kritérií na dlouhodobou bezpečnost a jejich případné přehodnocení ve vztahu k současnému stavu vědění.

4.7.4.5 Výstupy ZL

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

HAVLOVÁ V., PERTOLDOVÁ J., BUKOVSKÁ Z., HROCH T., ŠTĚDRÁ V., ČERNÝ M., ŘÍHA J., ČERVINKA R. (2018c): Hodnocení vhodnosti lokality pro umístění úložiště VJP a RAO z hlediska dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Čertovka. – MS SÚRAO TZ 277/2018, Praha.

HAVLOVÁ V., PERTOLDOVÁ J., POLÁK M., HROCH T., ŠTĚDRÁ V., ŘÍHA J., ČERVINKA R., BUKOVSKÁ Z. (2018d): Hodnocení vhodnosti lokality pro umístění úložiště VJP a RAO z hlediska dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Čihadlo. – MS SÚRAO TZ 278/2018, Praha.

HAVLOVÁ V., PERTOLDOVÁ J., BUKOVSKÁ Z., HROCH T., ŠTĚDRÁ V., JANKOVEC J., ŘÍHA J., ČERVINKA R. (2018e): Hodnocení vhodnosti lokality pro umístění úložiště VJP a RAO z hlediska dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Dukovany-západ (EDU-Z). – MS SÚRAO TZ 279/2018, Praha.

- HAVLOVÁ V., PERTOLDOVÁ J., BUKOVSKÁ Z., UHLÍK J., HROCH T., ŠTĚDRÁ V., ŘÍHA J., ČERVINKA R. (2018f): Hodnocení vhodnosti lokality pro umístění úložiště VJP a RAO z hlediska dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Horka. – MS SÚRAO TZ 280/2018, Praha.
- HAVLOVÁ V., PERTOLDOVÁ J., BUKOVSKÁ Z., BAIER J., HROCH T., ŠTĚDRÁ V., ŘÍHA J., ČERVINKA R. (2018g): Hodnocení vhodnosti lokality pro umístění úložiště VJP a RAO z hlediska dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Hrádek. – MS SÚRAO TZ 281/2018, Praha.
- HAVLOVÁ V., PERTOLDOVÁ J., BUKOVSKÁ Z., HROCH T., ŠTĚDRÁ V., UHLÍK J., ŘÍHA J., ČERVINKA R. (2018h): Hodnocení vhodnosti lokality pro umístění úložiště VJP a RAO z hlediska dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Kraví hora. – MS SÚRAO TZ 282/2018, Praha.
- HAVLOVÁ V., PERTOLDOVÁ J., BUKOVSKÁ Z., ČERNÝ M., HROCH T., ŠTĚDRÁ V., ŘÍHA J., ČERVINKA R. (2018i): Hodnocení vhodnosti lokality pro umístění úložiště VJP a RAO z hlediska dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Magdaléna. – MS SÚRAO TZ 283/2018, Praha.
- HAVLOVÁ V., PERTOLDOVÁ J., HROCH T., ŠTĚDRÁ V., JANKOVEC J., ŘÍHA J., ČERVINKA R. (2018j): Hodnocení vhodnosti lokality pro umístění úložiště VJP a RAO z hlediska dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Temelín-jih (ETE-J). – MS SÚRAO TZ 284/2018, Praha.
- HAVLOVÁ V., PERTOLDOVÁ J., BUKOVSKÝ Z., MIXA P., MILICKÝ M., ŘÍHA J., HROCH T., ŠTĚDRÁ V., ČERVINKA R. (2018k): Hodnocení vhodnosti lokalit pro umístění hlubinného úložiště VJP a RAO z hlediska dlouhodobé bezpečnosti. – MS SÚRAO TZ 313/2018. Praha.
- HAVLOVÁ V., TRTÍLEK R., RATAJ J. (2018l): Normalizované vyhodnocení vhodnosti lokalit pro umístění hlubinného úložiště VJP a RAO z hlediska dlouhodobé bezpečnosti. – MS SÚRAO TZ 327/2018. 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.

4.7.5 Geologická interpretace terénních geofyzikálních dat pro aktualizaci 3D strukturně-geologických modelů potenciálních lokalit HÚ (PB-2017-ZL-S2196-037-Geofyzika)

Hlavní autoři: Mixa P., Franěk J., Skácelová Z., Švagera O., Kolejka V., Zemková M., Kučera R., Bukovská Z., Buriánek D., Pertoldová J., Soejono I., Hanžl P., Dudíková Schulmanová B. (ČGS)

4.7.5.1 Cíl ZL

Hlavním účelem ZL byla aktualizace 3D geologických modelů lokalit HÚ s cílem poskytnout data pro upřesnění hodnocení vhodnosti lokalit pro umístění HÚ z hlediska dlouhodobé bezpečnosti. Ke splnění hlavního cíle byly definovány následující cíle:

- identifikace významných geologických rozhraní, konceptuální příprava profilů pro geofyzikální práce s reflektováním potřeb 3D geologických a hydrogeologických modelů a jiných existujících indikací vhodných pro popis geologické stavby;
- geologické a hydrogeologické podrobné mapování v liniích studovaných profilů, dokumentace relevantních dat pro geologickou interpretaci geofyzikálních měření, databázové zpracování a metodický dozor při zpracování primárních geof. dat;

- geologická expertíza při vyhodnocení geofyzikálních anomálií za účelem ověření struktur duktilní a křehké tektoniky a litologie a homogenity horninových bloků, ukládání a rozřídění geofyzikálních dat a výstupů do relevantních databází;
- geologická a hydrogeologická interpretace výsledků geologických a geofyzikálních výzkumů za účelem ověření zejména přítomnosti a charakteru tektoniky, struktur křehkého porušení, směru a sklonu významných litologických hranic a rozsahu horninových těles do hloubky.

4.7.5.2 Zhodnocení řešení projektu

Práce v průběhu řešení zadávacího listu proběhly ve shodě s metodikou popsanou v ZL ve třech fázích.

Fáze 1. Během 2. poloviny r. 2017 byly zpracovány rešerše studovaných území a v závislosti na geologické stavbě lokalit byly vytýčeny profily pro geofyzikální, geologické a hydrogeologické dokumentace Mixa et al. (2017 a–i). Na profilech v závislosti na geologické stavbě a studovaných fenoménech byly navrženy komplexy geofyzikálních metod nejlépe dokumentující studované jevy (tektonika, litologie, pokryv, aj.).

Fáze 2. V letech 2018–2019 proběhla většina terénních prací dle schválené metodiky prací. Byly geologicky a hydrogeologicky zmapovány studované profily v měřítku 1:10 000, veškeré dokumentační body byly dle schválené syntaxe zaneseny do databáze dokumentačních bodů, byly provedeny geologické interpretace geofyzikálních měření do geologické stavby. Veškerá tato data byla podkladem pro konstrukci geologických řezů do hloubky -500 m od nejnižšího bodu profilu a pro sestavení účelových tektonických map devíti lokalit. Všech 192 geologických map profilů a geologických řezů těmito profily a devíti účelových tektonických map bylo posouzeno oponentním řízením Oponentní radou České geologické služby a následně opraveno ve smyslu oponentních připomínek. Zároveň během terénních prací byly odebrány vzorky hornin na výbrusy a chemické analýzy pro zpřesnění litologických a geochemických charakteristik hornin a vzorky vody pro zpřesnění chemismu podzemních vod. Výsledky výzkumů této fáze byly shrnuty v mimořádné technické zprávě Mixa a Skácelová et al. (2019), která se stala základním podkladem pro hodnocení dlouhodobé bezpečnosti lokalit, kritérií K3 stupeň křehkého porušení – zlomy, pukliny, duktilní deformace a K4 prostorová a petrologická variabilita. Zároveň se výstupy ze zprávy Mixa a Skácelová et al. (2019) staly podkladem pro aktualizovanou lokalizaci perspektivních území pro geologické charakterizační práce a geologické projektové práce Pertoldová a Mixa et al. (2019). Během fáze 2 bylo shromážděno mimořádné množství nových primárních dat (viz tabulka Tab. 26), kterážto data významným způsobem rozšířila poznání geologické stavby lokalit v 3D dimenzi a stala se zásadním vstupem pro třetí fázi – aktualizaci prostorových strukturně-geologických modelů lokalit.

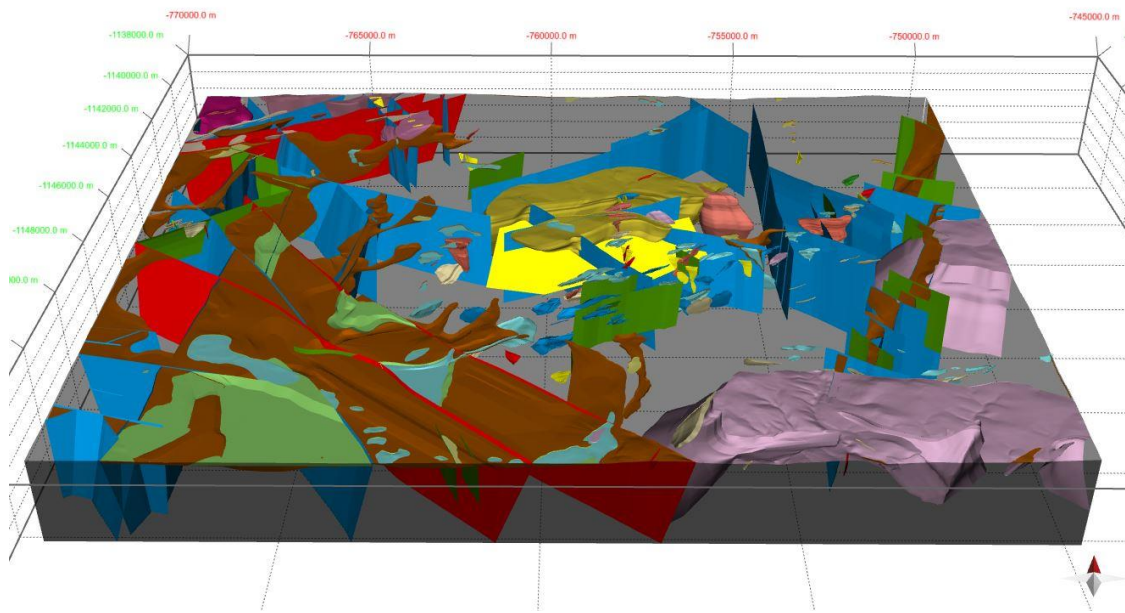
Tab. 26 Celkový přehled provedených prací na 9 lokalitách

Délka geologicky zmapovaných profilů v km	730
Počet geologických dokumentačních bodů	11 113
Počet hydrogeologických dokumentačních bodů	1 157
Počet gamaspektrometricky proměřených bodů	3 366
Výbrusy	176

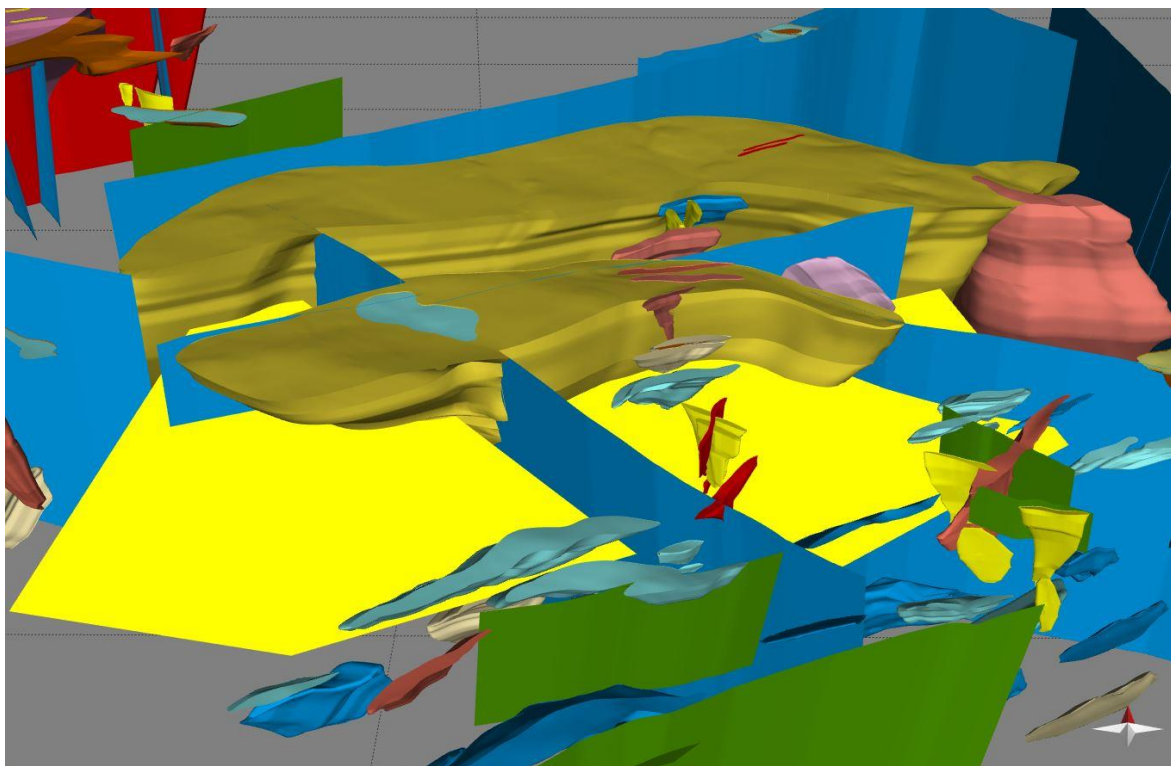
Fáze 3. V období X/2019 – IV/2020 byly zkresleny aktualizované geologické mapy lokalit v měřítku 1: 25 000 s využitím detailních geologických map profilů 1: 10 000 a aproximace stavby do okolí v kombinaci s účelovými tektonickými mapami a archivními mapovými podklady z ploch mimo profilové mapování. Z kombinace zpřesněných geologických map 1: 25 000 a geologických řezů 1: 10 000 byly zkonstruovány aktualizované 3D strukturně geologické modely devíti studovaných lokalit (příklady na

Obr. 59 a

Obr. 60).



Obr. 59 3D strukturně geologický model lokality ETE - Temelín



 SÚRAO	Závěrečná zpráva projektu Výzkumná podpora pro bezpečnostní hodnocení HÚ	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 462/2020

Obr. 60 Detail strukturně geologického modelu lokality ETE – Temelín

4.7.5.3 Nejistoty řešení ZL

V dané fázi hodnocení geologické stavby území HÚ a tvorby 3D strukturně geologických modelů je patrný výrazný rozdíl mezi velkým množstvím vstupních dat z povrchu a snižujícím se objemem vstupních veličin směrem do hloubky. Z povrchu jsou pro konstrukci 3D strukturně-geologických modelů k dispozici archivní mapy 1:50 000, geologické mapy 1:25 000 reambulované podle výsledků profilového mapování provedeného v rámci ZL a detailní geologické mapy profilů v měřítku 1:10 000 dokumentované geologickým, hydrogeologickým a komplexním geofyzikálním výzkumem. Směrem do hloubky klesá citlivost lehkých geofyzikálních metod, takže s podstatně vyšší mírou jistoty můžeme hodnotit tektonické a litologické prvky v prvních desítkách metrů (míněny jsou zejména směry, sklony a mocnosti zlomů, příp. puklinových tahů, litologická rozhraní a jejich charakter a přítomnost reologicky odlišných žilných a vložkových těles). V rozmezí hloubek cca 150-200 metrů pak v závislosti na citlivosti jednotlivých geofyzikálních metod významně klesá přesnost a množství informací o geologické prostorové stavbě a pod hranicí cca 200 m se vstupy omezují jen na vybrané hlubinné geofyzikální metody (vibrovanou seismiku, elektromagnetické profilování, plošné gravimetrie) a nepřímé důkazy (teplota a chemismus podzemních vod aj.). Je tedy nutno akceptovat, že v provedených aktualizovaných modelech roste směrem do hloubky skokově lokalizační klam narůstající ve vazbě na prostorovou heterogenitu lokality a nezbytnou expertní aproximaci zejména povrchových dat do hloubky. Nejistotu zmíněného typu je možno snížit nasazením hlubinných geofyzikálních metod v pravidelné síti a realizací invazivního průzkumu (vrty).

4.7.5.4 Návrh dalších prací

Podrobný komplex dalších prací plánovaných na zúženém počtu lokalit je podrobně popsán ve zprávě „Aktualizace a konkretizace projektu průzkumných prací na hypotetické lokalitě“ Mixa a Franěk et al. (2019). Jedná se o široké spektrum prací geologických, hydrogeologických, geochemických, geofyzikálních, transportních, geotechnických, vrtných, kopných a modelovacích, jejichž cílem je poskytnout dostatečné množství relevantních dat pro odborné posouzení lokalit, které bude nutné pro výběr finální a záložní lokality HÚ.

Práce proběhnou ve 3 měřítcích podrobnosti (data pro vyhodnocení seismického hazardu, data pro zhodnocení hydrogeologického režimu a data pro vyhodnocení geologické stavby). Data získaná během těchto prací umožní provést návazné modelovací práce a odborné posouzení lokalit, které budou nutné pro výběr finální a záložní lokality HÚ.

Navržený postup a rozsah prací, který umožní výběr finální a záložní lokality, má za cíl sestavení zejména následujících popisných modelů:

- Geologický, popisující základní vztahy horninových celků a jejich porušení zlomy, zahrnuje i horninové bloky pro podzemní a nadzemní část úložiště;
- Discret Fracture Network (DFN) modely popisující křehké porušení horninového prostředí strukturami nižšího řádu;
- Hydrogeologický (hydraulický), který vizualizuje směr a rychlost proudění podzemní vody;
- Transportní, který popisuje směr, dráhu, délku a čas transportu radionuklidů;

- Geomechanický, který zahrnuje mechanické parametry hornin a který hodnotí ovlivnění horninového prostředí podzemním dílem;
- Geochemický model oblasti, který hodnotí vývoj chemizmu podzemních vod a chemizmus horninového prostředí;
- Seismo-tektonický, který hodnotí (pravděpodobnostním přístupem) seismické ohrožení lokality.

Metodiky prací odpovídající současnému stavu poznání, a dále rozsah prací v oblastech geologických charakterizačních prací představuje zejména:

- geomorfologická analýza, dálkový průzkum Země;
- geologické mapování v měřítku 1:25 000 a 1:10 000;
- strukturní charakterizace a popis křehkého porušení hornin, interpretace zlomové stavby;
- hydrogeologické mapování a hydrogeologický průzkum;
- seismický, hydrogeologický a stabilitní monitoring;
- geotechnická charakterizace a IG průzkum;
- geofyzikální měření plošná a profilová s mělkým a hloubkovým dosahem;
- vrtné práce a karotáž, rámcové umístění vrtů;
- testy ve vrtech (hydraulické, mechanické, monitorovací);
- kopné práce a jejich dokumentace.

4.7.5.5 Výstupy ZL

BUKOVSKÁ Z., ŠVAGERA O., RUKAVIČKOVÁ L., MIXA P., SKÁCELOVÁ Z. (2019): Účelová tektonická mapa 1:25 000 lokality Hrádek se zobrazením zlomů I. a II. kategorie pro potřeby hodnocení potenciálního území hlubinného úložiště RAO. – MS SÚRAO Praha.

BURIÁNEK D., GRUNDLOCH J., MIXA P., SKÁCELOVÁ Z. (2019): Účelová tektonická mapa 1 : 25 000 lokality Horka se zobrazením zlomů I. a II. kategorie pro potřeby hodnocení potenciálního území hlubinného úložiště RAO. – MS SÚRAO Praha.

DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ B., PERTOLDOVÁ J., RUKAVIČKOVÁ L., MIXA P., SKÁCELOVÁ Z., ŽÁČKOVÁ E. (2019): Účelová tektonická mapa 1 : 25 000 lokality Čihadlo se zobrazením zlomů I. a II. kategorie pro potřeby hodnocení potenciálního území hlubinného úložiště RAO. Mapy potenciálních úložišť RAO. – MS SÚRAO, Praha.

FRANĚK J., ŠVAGERA O., PACHEROVÁ P., MIXA P., SKÁCELOVÁ Z. (2019): Účelová tektonická mapa 1 : 25 000 lokality Magdalena se zobrazením zlomů I. a II. kategorie pro potřeby hodnocení potenciálního území hlubinného úložiště RAO. – MS SÚRAO, Praha.

HRDLIČKOVÁ K., HANŽL P., KRYŠTOFOVÁ E., MACEČEK L., MIXA P., SKÁCELOVÁ Z., ŽÁČKOVÁ E., (2019): Účelová tektonická mapa 1 : 25 000 lokality EDU-Z se zobrazením zlomů I., a II., kategorie pro potřeby hodnocení potenciálního území hlubinného úložiště RAO. – MS SÚRAO, Praha.

MIXA P., SOEJONO I., SKÁCELOVÁ Z., NAHODILOVÁ R., KOLEJKA V., ZEMKOVÁ M., KUČERA R. (2017a): Lokalita Březový potok - geologická stavba a technická specifikace geofyzikálních prací., 28 s. – MS SÚRAO TZ 173/2017, Praha.

MIXA P., ŽÁČEK V., SKÁCELOVÁ Z., JELÍNEK J., KOLEJKA V., ZEMKOVÁ M., KUČERA R. (2017b): Lokalita Čertovka - geologická stavba a technická specifikace geofyzikálních prací., 30 s., – MS SÚRAO TZ 133/2017, Praha.

- MIXA P., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ B., SKÁCELOVÁ Z., PERTOLDOVÁ J., KOLEJKA V., ZEMKOVÁ M., KUČERA R. (2017c): Lokalita Čihadlo – geologická stavba a technická specifikace geofyzikálních prací., 29 s. – MS SÚRAO TZ 174/2017, Praha.
- MIXA P., ŠTĚDRÁ V., SKÁCELOVÁ Z., SOEJONO I., KOLEJKA V., ZEMKOVÁ M., KUČERA R. (2017d): Lokalita ETE-jih - geologická stavba a technická specifikace geofyzikálních prací., 33 s. – MS SÚRAO TZ 180/2017, Praha.
- MIXA P., BURIÁNEK D., SKÁCELOVÁ Z., HRDLIČKOVÁ K., KOLEJKA V., ZEMKOVÁ M., KUČERA R. (2017e): Lokalita Horka – geologická stavba a technická specifikace geofyzikálních prací., 32 s. – MS SÚRAO TZ 176/2017, Praha.
- MIXA P., BUKOVSKÁ Z., SKÁCELOVÁ Z., ŠVAGERA O., KOLEJKA V., ZEMKOVÁ M., KUČERA R. (2017f): Lokalita Hrádek – geologická stavba a technická specifikace geofyzikálních prací., 30 s. – MS SÚRAO TZ 175/2017, Praha.
- MIXA P., VERNER K., SKÁCELOVÁ Z., BURIÁNEK D., KOLEJKA V., ZEMKOVÁ M., KUČERA R. (2017g): Lokalita Kraví hora - geologická stavba a technická specifikace geofyzikálních prací., 28 s. – MS SÚRAO TZ 178/2017, Praha.
- MIXA P., FRANĚK J., SKÁCELOVÁ Z., ŠVAGERA O., KOLEJKA V., ZEMKOVÁ M., KUČERA R. (2017h): Lokalita Magdaléna - geologická stavba a technická specifikace geofyzikálních prací., 33 s. – MS SÚRAO TZ 177/2017, Praha.
- MIXA P., HANŽL P., SKÁCELOVÁ Z., HRDLIČKOVÁ K., KOLEJKA V., ZEMKOVÁ M., KUČERA R. (2017i): Lokalita EDU-západ – geologická stavba a technická specifikace geofyzikálních prací., 30 s. – MS SÚRAO TZ 179/2017, Praha.
- MIXA P., SKÁCELOVÁ Z., ŽÁČEK V., JELÍNEK J., ŠTĚDRÁ V., HANŽL P., VERNER K., BUKOVSKÁ Z., KOLEJKA V., ZEMKOVÁ M., KUČERA R. (2017j): Geofyzikální výzkum hlubokých struktur a geometrie horninového masivu – geologická stavba a technická specifikace geofyzikálních prací, 41 s. – MS SÚRAO TZ 182/2017, Praha.
- MIXA P., SKÁCELOVÁ Z., PERTOLDOVÁ J., BUKOVSKÁ Z., BURIÁNEK D., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ B., FRANĚK J., HRDLIČKOVÁ K., NAHODILOVÁ R., SOEJONO I., VERNER K., ŽÁČEK V., PETYNIÁK O., RUKAVIČKOVÁ L., JELÍNEK J., KRYŠTOFOVÁ E., KŮRKOVÁ I., HOLEČEK J., ŘIHOŠEK J., GRUNDLOCH J., PACHEROVÁ P., KOLEJKA V., HUDEČKOVÁ E., JELÉNEK J., PECINA V., KRYL J., ŠVAGERA O., GILÍKOVÁ H., LOJKA R., PEŘESTÝ V., VOREL T., KNOTEK J., HEJTMÁNKOVÁ P., KUNCEOVÁ E., MULLEROVÁ P., KUČERA R., HECKELOVÁ M., ZEMKOVÁ M. (2019): Shrnutí výsledků geologických a geofyzikálních výzkumných prací provedených v období 9/2017–6/2019 pro aktualizaci hodnocení potenciálních lokalit hlubinného úložiště RAO., 431 stran. – MS SÚRAO TZ 412/2019, Praha.
- MIXA P., SKÁCELOVÁ Z., PERTOLDOVÁ J., BUKOVSKÁ Z., BURIÁNEK D., DUDÍKOVÁ B., FRANĚK J., HRDLIČKOVÁ K., NAHODILOVÁ R., SOEJONO I., VERNER K., ŽÁČEK V., JELÍNEK J., PETYNIÁK O., RUKAVIČKOVÁ L., KRYŠTOFOVÁ E., KŮRKOVÁ I., HOLEČEK J., ŘIHOŠEK J., GRUNDLOCH J., PACHEROVÁ P., KOLEJKA V., HUDEČKOVÁ E., JELÉNEK J., PECINA V., KRYL J., ŠVAGERA O., GILÍKOVÁ H., LOJKA R., PEŘESTÝ V., VOREL T., KNOTEK J., MÜLLEROVÁ P., HEJTMÁNKOVÁ P., KUNCEOVÁ E., ZEMKOVÁ M., KARENOVÁ J., FIFERNOVÁ M., AMBROZEK V., HÁJEK T., ŽÁČKOVÁ E., ZELINKOVÁ T., KUČERA R. (2020): Aktualizace 3D strukturně geologických modelů potenciálních lokalit hlubinného úložiště radioaktivních odpadů. Verze 1.2., 841 s., – MS SÚRAO ZZ 500/2020, Praha.
- MIXA P., SKÁCELOVÁ Z., BUKOVSKÁ Z., BURIÁNEK D., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ B., FRANĚK J., HANŽL P., PERTOLDOVÁ J., SOEJONO I., VERNER K., ŽÁČEK V., KOLEJKA V., PETYNIÁK O., RUKAVIČKOVÁ L., HOLEČEK J., PECINA V., KRYL J., KŮRKOVÁ I., VOREL T., LOJKA R., KRYŠTOFOVÁ E., HLÁVKA D., PEŘESTÝ V., ŘIHOŠEK J., KNOTEK O., ŠVAGERA O., HRDLIČKOVÁ K., GRUNDLOCH J., ZAVŘELOVÁ A., HECKLOVÁ M. (2018): Geologická interpretace terénních

geofyzikálních dat pro aktualizaci 3D strukturně-geologických modelů potenciálních lokalit HÚ Geofyzika roční zpráva za období 2018., 110 s. – MS SÚRAO TZ 359/2019, Praha.

NAHODILOVÁ R., JELÍNEK J., MIXA P., PERTOLDOVÁ J., SKÁCELOVÁ Z. (2019): Účelová tektonická mapa 1 : 25 000 lokality ETE-jih se zobrazením zlomů I., a II., kategorie pro potřeby hodnocení potenciálního území hlubinného úložiště RAO., – MS SÚRAO, Praha.

SOEJONO I., KRYL J., HOLEČEK J., MIXA P., SKÁCELOVÁ Z. (2019): Účelová tektonická mapa 1:25 000 lokality Březový potok se zobrazením zlomů I., a II., kategorie pro potřeby hodnocení potenciálního území hlubinného úložiště RAO., – MS SÚRAO, Praha.

VERNER K., PEŘESTÝ V., KRYŠTOFOVÁ E., MIXA P., SKÁCELOVÁ Z., ŽÁČKOVÁ E. (2019): Účelová tektonická mapa 1:25 000 lokality Kraví hora se zobrazením zlomů I., a II., kategorie pro potřeby hodnocení potenciálního území hlubinného úložiště RAO., – MS SÚRAO, Praha.

ŽÁČEK V., PECINA V., JELÍNEK J., VOREL T., MIXA P., SKÁCELOVÁ Z. (2019): Účelová tektonická mapa 1:25 000 lokality Čertovka se zobrazením zlomů I., a II., kategorie pro potřeby hodnocení potenciálního území hlubinného úložiště RAO., – MS SÚRAO, Praha.

4.7.6 Aktualizace hodnocení lokalit z hlediska dlouhodobé bezpečnosti (PB-2019-ZL-U3183-043-Hodnoceni2)

Hlavní autoři: Havlová V., Trtílek R. (ÚJV), Milický M., Polák M., Uhlík J., Baier J., Gvoždík L. (PROGEO), Mixa P., Pertoldová J., Hroch T., Štědrá V. (ČGS)

4.7.6.1 Cíl ZL

Cílem tohoto dílčího projektu byla aktualizace hodnocení kandidátních lokalit z hlediska dlouhodobé bezpečnosti na základě výsledků geofyzikálního výzkumu lokalit, které proběhlo v letech 2017 až 2019.

Předmětem projektu bylo:

- Odhad velikosti všech potenciálně homogenních bloků vhodných pro umístění obalových souborů s odpady na lokalitách na základě shrnutí všech získaných výsledků. Odhad bloků bude zahrnovat průzkumné území.
- Aktualizace devíti popisných zpráv a zprávy hodnocení vhodnosti lokalit (zprávy SÚRAO 276/2018 až 284/2018) na základě nově získaných poznatků včetně návrhu váhového hodnocení a aktualizace bodového hodnocení dle metodiky aplikace kritérií.
- Revize zdůvodnění kritérií a indikátorů pro hodnocení dlouhodobé bezpečnosti kandidátních lokalit ve formě přehledné tabulky včetně analýzy kritérií ze skupiny proveditelnost a environmentální charakteristiky z hlediska překryvů, doporučení klíčových indikátorů.

Spolupráce se SÚRAO při oponentních řízeních a jednání expertního panelu.

4.7.6.2 Zhodnocení řešení projektu

Vzhledem k tomu, že v rámci pilotního hodnocení potenciálních lokalit (viz kap. 4.7.3 a 4.7.4) byly identifikovány nejistoty v geologické stavbě, umístění zlomů, případně i nejistoty vztahující se na potenciální území pro budoucí projektové práce, bylo přistoupeno k vypsání ZL

Geologická interpretace terénních geofyzikálních dat pro aktualizaci 3D strukturně-geologických modelů potenciálních lokalit HÚ (viz kap. 4.7.5), v jehož rámci byla zpracována data z geofyzikálního průzkumu potenciálních lokalit, využita následně k aktualizaci pilotního hodnocení lokalit z hlediska dlouhodobé z kap. 4.7.3 a 4.7.4.

Primární aktualizace vycházela ze zprávy Mixa et al. (2019), ve které byla zpracována data z geofyzikálního povrchového výzkumu a následně byla zpracována především do podoby aktualizovaných tektonických schémat na každé lokalitě. Na základě těchto informací byla následně vytyčena aktualizovaná průzkumná území pro budoucí geologické charakterizační práce a průzkumná území pro projektové práce (Pertoldová et al. 2019).

Současně probíhaly ve spolupráci se zástupci Zadavatele příprava a zpracování metodických postupů (Vondrovic et al. 2019). Jako v pilotním hodnocení byly lokality hodnoceny dvojstupňově.

První stupeň představuje vyhodnocení ve vztahu k legislativním požadavkům na vhodnost lokality pro umístění HÚ dle vyhlášky vyhláška č. 378/2016 Sb., kdy jsou zodpovězeny následující otázky pro každou lokalitu:

- 1) Zjištěné informace o posuzované vlastnosti lokality spíše vedou k závěru, že požadavek bude splněn (příležitost převažuje nad rizikem), tj. nebyla zjištěna vlastnost lokality, při jejímž překročení je umístění úložiště zakázáno.
- 2) Zjištěné informace o posuzované vlastnosti indikují překážku či problém ke splnění požadavku či možné problémy s jeho prokázáním (riziko převažuje nad příležitostí). Zde bude posouzena možnost odstranění překážky či problému pomocí technického či administrativního opatření a náročnost provedení tohoto opatření.
- 3) Není dostatek informací.

Pokud lokalita splňuje požadavky na umístění HÚ a nebyla tedy zjištěna vlastnost, kdy by bylo umístění HÚ zakázáno, pak je možno přistoupit k hodnocení dle vybraných indikátorů. Zkušeností ze zahraničí i ze zpracování pilotního hodnocení vedly k detailní analýze kritérií hodnocení, a to zejména ve vztahu k jejich propojení, potenciálnímu překryvu či přímé závislosti či nejistotám s nimi spojenými, a to i ve vztahu k hodnocení projektového řešení a dopadů na životní prostředí. Na základě této analýzy bylo vybráno 8 klíčových kritérií s 28 indikátory, které byly následně hodnoceny pro všechny potenciální lokality (Vondrovic et al. 2019; Havlová et al. 2000j). Přehled klíčových kritérií a indikátorů je uveden v následující tabulce Tab. 27.

Tab. 27 Kritéria a jejich indikátory významné z hlediska dlouhodobé bezpečnosti, hodnocená pro danou lokalitu s cílem vyhodnocení lokalit pro umístění HÚ (Vondrovic et al. 2019)

ID	Kritérium	id	Indikátor	Charakter požadavku
K3	Popsatelnost a predikovatelnost horninových bloků	3a	Stupeň křehkého porušení masivu – zlomové struktury	Vylučující/porovnávací
		3b	Stupeň křehkého porušení masivu – puklinové systémy	Vylučující/porovnávací
		3c	Stupeň duktilní deformace	Vylučující/porovnávací
K4	Variabilita geologických vlastností	4a	Prostorová variabilita horninového prostředí	Vylučující/porovnávací

ID	Kritérium	id	Indikátor	Charakter požadavku
		4b	Petrologická variabilita hornin	Vylučující/porovnávací
K5	Charakteristika proudění vody v okolí úložiště a transportní charakteristiky	5a	Doba dotoku z HÚ k oblasti drenáže (roky)	Porovnávací
		5b	Rychlost proudění v úrovni úložiště (m rok ⁻¹)	Porovnávací
		5c	Propustnost v prostoru HÚ (m s ⁻¹)	Porovnávací
		5d	Sestupná vertikální složka proudění (% plochy HÚ)	Porovnávací
		5e	Maximální propustnost zón do 500 m od hranice HÚ (m s ⁻¹)	Porovnávací
		5f	Specifický průtok v prostoru HÚ (l s ⁻¹ km ⁻²)	Porovnávací
		5g	Poměr ředění (%)	Porovnávací
K6	Identifikace a umístění drenážních bází	6a	Počet drenážních toků	Porovnávací
		6b	Zastoupení drenáže z plochy HÚ v jediném toku (%)	Porovnávací
		6c	Zastoupení drenáže z plochy HÚ v jediném povodí (%)	Porovnávací
		6d	Horizontální vzdálenost HÚ od drenáže (m)	Porovnávací
K7	Seismická a geodynamická stabilita	7a	Hodnota maximálního horizontálního zrychlení (m s ⁻²)	Porovnávací
		7b	Výškový gradient (m)	Porovnávací
		7c	Procentuální podíl plochy reliéfu postiženého a přetvořeného mladými cykly zpětné eroze a svahovými deformacemi	Porovnávací
		7d	Výskyt vulkanických hornin paleogenního až holocenního stáří a kyselek	Porovnávací
K8	Charakteristiky, které by mohly vést k narušení úložiště budoucími aktivitami člověka	8a	Ložiskové poměry na lokalitě a poddolování	Vylučující/Porovnávací

Pro každou z lokalit byla zpracována průvodní zpráva, která poskytovala přehledně informace o charakteristikách či kvantitách daných indikátorů (Havlová et al. 2000a-i). Pro účel aktualizace hydrogeologických modelů, která byla založena na aktuálních výsledcích výzkumu zlomové sítě a jejich implementace do vytyčení potenciálních území pro projektové práce byly

 SÚRAO	Závěrečná zpráva projektu Výzkumná podpora pro bezpečnostní hodnocení HÚ	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 462/2020

zpracovány i aktualizované detailní hydrogeologické modely pro každou z lokalit (Baier et al. 2000a, b; Černý et al. 2000a, b; Jankovec et al. 2000a, b; Polák et al. 2000; Uhlík et al. 2000a, b).

Výsledky individuálního hodnocení lokalit byly shrnuty do svodných tabulek, kvantifikovány a vyhodnoceny v jednotlivých kategoriích kritérií ve vztahu k hodnocení dlouhodobé bezpečnosti (Vondrovic et al. 2000).

Výsledné hodnocení lokalit z hlediska dlouhodobé bezpečnosti je jedním z podkladů pro návrh zúžení počtu lokalit pro umístění HÚ z 9 na 4, který bude předložen po projednání panelem expertů vlády ČR v průběhu roku 2020.

4.7.6.3 Nejistoty řešení ZL

V dané fázi hodnocení je jednoznačné, že nedostatek informací o geologické stavbě, hydrogeologické situaci či o vlastnostech hornin či vod z hloubky, odpovídající hloubce HU, zatěžují hodnocení značnou dávkou nejistoty. Ani informace z povrchového geofyzikálního průzkumu nemohou přinést tak rozsáhlé a přesné informace jako invazivní průzkumné techniky.

V etapě invazivního průzkumu mohou být výsledky tohoto hodnocení překonány.

4.7.6.4 Návrh dalších prací

Jak už je zmíněno výše, hodnocení lokalit z hlediska dlouhodobé bezpečnosti bude jedním z podkladů pro návrh zúžení počtu lokalit pro umístění HÚ z 9 na 4, směřujíc k finálnímu výběru hlavní a záložní lokality. Je jednoznačné, že s postupem procesu výběru s nárůstem znalostí o lokalitách se budou limity či požadavky kritérií měnit. Současně se také předpokládá, že i význam kritérií se na základě rozsahu znalostí může měnit (IAEA 2011b).

Dalšími kroky tedy budou především

- Detailní průzkumné práce na vybraných lokalitách, včetně invazivních metod (vrty, sondy, hloubková geofyzika apod.)
- Aktualizace charakterizace lokalit na základě detailních průzkumných prací (3D strukturně geologické modely, HG a transportní modely pro reálné prostředí lokalit, geochemie lokalit, včetně geochemie podzemní vody z úrovně HÚ apod.)
- Vývoj metodiky hodnocení s ohledem na danou fázi vývoje HÚ (stále převažují především geovědní oblasti, ale na základě informací z hloubkové úrovně HÚ se do popředí dostane více i projektové řešení a socio-ekonomické aspekty), tedy aktualizace a výběr kritérií hodnocení, metodika hodnocení apod.

4.7.6.5 Výstupy ZL

PERTOLDOVÁ J., MIXA P., BUKOVSKÁ Z., BURIÁNEK D., DUDÍKOVÁ B., FRANĚK J., HRDLIČKOVÁ K., NAHODILOVÁ R., SOEJONO I., VERNER K., ŽÁČEK V., PETYNIÁK O., KUČERA R., ŽÁČKOVÁ E., FIFEROVÁ M., ZEMKOVÁ M. (2019): Lokalizace perspektivních území po geologické charakterizační práci a perspektivních území pro projektové práce HÚ. Důvodová zpráva. – MS SÚRAO, TZ 446/2020, Praha.

- VONDROVIC L., AUGUSTA J., VOKÁL A., HAVLOVÁ V., KONOPÁČOVÁ K., LAHODOVÁ Z., POPELOVÁ E., URÍK J., BUKOVSKÁ Z., BUTOVIČ A., FRANĚK J., HROCH T., JELÍNEK J., KOBYLKA D., KRAJÍČEK J., MILICKÝ M., MIXA P., PERTOLDOVÁ J., SKOŘEPA Z., ŠTĚDRÁ V., ŠVAGERA J., UHLÍK J., ZAHRADNÍK O. (2019): Metodika zúžení počtu lokalit pro hlubinné úložiště v ČR v letech 2019–2020. – MS SÚRAO, TZ 423/2019, 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., JANKOVEC J., JELÉNEK 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, Praha.
- HAVLOVÁ V., PERTOLDOVÁ J., MIXA P., HROCH T., ŠTĚDRÁ V., ČERNÝ M., POLÁK M., MILICKÝ M., BAIER J., DUŠEK K., FIFERNOVÁ M., FRANĚK J., GVOŽDÍK L., HOLEČEK J., JANKOVEC J., JELÉNEK J., JELÍNEK J., KACHLÍKOVÁ R., KUČERA R., KÚRKOVÁ I., PETYNIÁK O., RAPPRIČH V., RUKAVIČKOVÁ L., ŠVAGERA O., UHLÍK J., VOJTĚCHOVÁ H., ŽÁČEK V., ŽÁČKOVÁ E. (2020b): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Čertovka. – MS SÚRAO, TZ 448/2020, Praha.
- HAVLOVÁ V., PERTOLDOVÁ J., MIXA P., POLÁK M., ČERNÝ M., MILICKÝ M., HROCH T., ŠTĚDRÁ V., BAIER J., DUDÍKOVÁ B., H., DUŠEK K., FRANĚK J., GVOŽDÍK L., HEJTMÁNKOVÁ P., HOLEČEK J., JANKOVEC J., JELÉNEK J., JELÍNEK J., KACHLÍKOVÁ R., KUČERA R., KUNCEOVÁ E., NÝVL D., PETYNIÁK O., RAPPRIČH V., RUKAVIČKOVÁ L., ŠVAGERA O., UHLÍK J., VERNER K., VOJTĚCHOVÁ H., (2020c): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Čihadlo. – MS SÚRAO, TZ 449/2020, Praha.
- HAVLOVÁ V., PERTOLDOVÁ J., MIXA I., HROCH T., ŠTĚDRÁ V., JANKOVEC J., MILICKÝ M., BAIER J., BUKOVSKÁ Z., DUŠEK K., FRANĚK J., HANŽL P., HOLEČEK J., HRDLIČKOVÁ K., JELÉNEK J., JELÍNEK J., KACHLÍKOVÁ R., KRYŠTOFOVÁ E., KUČERA R., KUNCEOVÁ E., PETYNIÁK O., RUKAVIČKOVÁ L., SEDLÁČKOVÁ I., SOEJONO I., ŠÍR P., ŠVAGERA O., ŽÁČKOVÁ E., VOJTĚCHOVÁ H., UHLÍK J., GVOŽDÍK L. (2020d): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita EDU-západ. – MS SÚRAO, TZ 450/2020, Praha.
- 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 POLÁK M., V., RAPPRIČH V., ŘIHOŠEK J., RUKAVIČKOVÁ L., ŠVAGERA O., VOJTĚCHOVÁ H., ŽÁČKOVÁ E. (2020e): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita ETE-jih. – MS SÚRAO, TZ 449/2020, Praha.
- HAVLOVÁ V., PERTOLDOVÁ J., MIXA P., HROCH T., ŠTĚDRÁ V., UHLÍK J., JANKOVEC J., MILICKÝ M., BAIER J., BURIÁNEK D., DUDÍKOVÁ B., DUŠEK K., FRANĚK J., GVOŽDÍK L., HEJTMÁNKOVÁ P., HOLEČEK J., JELÉNEK J., JELÍNEK J., KACHLÍKOVÁ R., KUČERA R., KUNCEOVÁ E., PETYNIÁK O., POLÁK M., RAPPRIČH V., RUKAVIČKOVÁ L., ŠVAGERA O., VERNER K., VOJTĚCHOVÁ H. (2020f): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Horka. – MS SÚRAO, TZ 452/2020, Praha.
- HAVLOVÁ V., PERTOLDOVÁ J., MIXA P., HROCH T., ŠTĚDRÁ V., BAIER J., MILICKÝ M., BUKOVSKÁ Z., ČERNÝ M., DUDÍKOVÁ B., DUŠEK K., FRANĚK J., GVOŽDÍK L., HOLEČEK J., JANKOVEC J., JELÍNEK J., KACHLÍKOVÁ R., KUČERA R., KUNCEOVÁ E., PETYNIÁK O., POLLÁK M., RAPPRIČH V., RUKAVIČKOVÁ L., ŠVAGERA O., UHLÍK J., VOJTĚCHOVÁ H., ŽÁČKOVÁ E. (2020g): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Hrádek. – MS SÚRAO, TZ 453/2020, Praha.

- HAVLOVÁ V., PERTOLDOVÁ J., MIXA P., HROCH T., ŠTĚDRÁ V., UHLÍK J., JANKOVEC J., MILICKÝ M., BURIÁNEK D., BUKOVSKÁ Z., DUŠEK K., FRANĚK J., HOLEČEK J., JELÍNEK J., KACHLÍKOVÁ R., KRYŠTOFOVÁ E., KUČERA K., KUNCEOVÁ E., PEŘESTÝ V., PETYNIÁK O., RAPPRIČH V., RUKAVIČKOVÁ L., ŠVAGERA O., VOJTĚCHOVÁ H. (2020h): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Kraví hora. – MS SÚRAO, TZ 455/2020, Praha.
- HAVLOVÁ V., PERTOLDOVÁ J., MIXA P., ČERNÝ M., POLÁK M., MILICKÝ M., HROCH T., ŠTĚDRÁ V., BAIER J., BUKOVSKÁ Z., DUDÍKOVÁ B., DUDKOVÁ I., DUŠEK K., FRANĚK J., GVOŽDÍK L., HOLEČEK J., JANKOVEC J., JELÍNEK J., JELÍNEK J., KACHLÍKOVÁ R., KUČERA R., KUNCEOVÁ E., PACHEROVÁ P., PETYNIÁK O., RAPPRIČH V., RUKAVIČKOVÁ L., ŠÍR P., ŠVAGERA O., UHLÍK J., VOJTĚCHOVÁ H. (2020i): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Magdaléna. – MS SÚRAO, TZ 455/2020, Praha.
- HAVLOVÁ V., PERTOLDOVÁ J., MIXA P., MILICKÝ M., BUTOVIČ A. (2020j): Konkretizace kritérií pro hodnocení lokalit pro umístění HÚ – MS SÚRAO, TZ 492/2020, Praha.
- BAIER J., JANKOVEC J., ČERNÝ M., GVOŽDÍK L., MILICKÝ M., POLÁK M., UHLÍK J. (2020a): Pasport aktualizovaného detailního hydraulického modelu, Lokalita Březový potok. – MS SÚRAO, TZ 470/2020, Praha.
- BAIER J., JANKOVEC J., ČERNÝ M., GVOŽDÍK L., MILICKÝ M., POLÁK M., UHLÍK J. (2020b): Pasport aktualizovaného detailního hydraulického modelu, Lokalita Hrádek. – MS SÚRAO, TZ 469/2020, Praha.
- ČERNÝ M., UHLÍK J., MILICKÝ M., GVOŽDÍK L. (2020a): Pasport aktualizovaného detailního hydraulického modelu, Lokalita Magdaléna. – MS SÚRAO, TZ 471/2020, Praha.
- ČERNÝ M., UHLÍK J., MILICKÝ M., GVOŽDÍK L. (2020b): Pasport aktualizovaného detailního hydraulického modelu. Lokalita Čertovka. – MS SÚRAO, TZ 472/2020, Praha.
- JANKOVEC J., MILICKÝ M., GVOŽDÍK L., POLÁK M., UHLÍK J., ČERNÝ M., ZEMAN O., BAIER J. (2020): Pasport aktualizovaného detailního hydraulického modelu. Lokalita Na Skalním. – MS SÚRAO, TZ 473/2020, Praha.
- JANKOVEC, J., UHLÍK J., ČERNÝ, M. (2020): Pasport aktualizovaného detailního hydraulického modelu. Lokalita ETE-jih. – MS SÚRAO, TZ 474/2020, Praha.
- POLÁK M., GVOŽDÍK L., MILICKÝ M., UHLÍK J. (2020): Pasport aktualizovaného detailního hydraulického modelu. Lokalita Čihadlo. – MS SÚRAO, TZ 475/2020, Praha.
- 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.
- UHLÍK J., JANKOVEC J., GVOŽDÍK L., MILICKÝ M. (2020a): Pasport aktualizovaného detailního hydraulického modelu. Lokalita Horka. – MS SÚRAO, TZ 476/2020, Praha.
- UHLÍK J., JANKOVEC J., GVOŽDÍK L., MILICKÝ M. (2020b): Pasport aktualizovaného detailního hydraulického modelu, Lokalita Kraví hora. – MS SÚRAO, TZ 477/2020, Praha.
- DĚDEČEK P., UXA T., HOLEČEK J. (2020): Geotermické zhodnocení potenciálních lokalit HÚ na základě dostupných údajů. – MS SÚRAO, TZ 486/2020, Praha.

5 Komplexní vyhodnocení projektu

Projekt bezpečného uložení vyhořelého jaderného paliva v hlubinném úložišti je založen na multibariérovém bezpečnostním konceptu, jehož první bariérou je vlastní forma odpadu, druhou bariérou vícevrstvý, korozivzdorný ocelový obalový soubor, třetí bariérou nepropustné bentonitové materiály a čtvrtou bariérou stabilní hostitelské prostředí. Základním předpokladem je kompatibilita horninového prostředí s použitými inženýrskými bariérami.

Vhodnost lokalit pro hlubinné úložiště musí být potvrzena bezpečnostní studií indikující, že úložiště v lokalitě může být dlouhodobě bezpečné a proveditelné. Tento požadavek není možné splnit bez potřebného porozumění procesům probíhajících v úložném systému, na jehož základě budou vytvořeny zjednodušené modely popisující úložný systém a procesy, které v něm probíhají. Bezpečnostní hodnocení musí zahrnovat jak přírodní, tak i inženýrské bariéry jako jeden celek a musí prokázat, že úložný systém je možno popsat a umožnit tak zhodnocení dlouhodobé bezpečnosti.

Základním cílem projektu bylo tedy získat nástroje, modely a data pro hodnocení dlouhodobé bezpečnosti po uzavření HÚ, a to v dlouhodobých časových horizontech až po 1 mil let. V rámci projektu v dané fázi vývoje HÚ byly jako potenciální pro umístění HÚ zkoumány následující lokality: Březový potok, Čertovka, Čihadlo, EDU – západ (Na Skalním), ETE – jih (Janoch), Horka, Hrádek, Kraví hora, Magdaléna.

Prokázání bezpečnosti úložiště vyžaduje multidisciplinární tým tvořený odborníky z mnoha oblastí vědy a techniky, který se na těchto činnostech bude podílet a zajistí kontinuitu prací. V rámci projektu se řešení vedle hlavního řešitele účastnil tým 7 hlavních dodavatelů a jejich poddodavatelů, dohromady 13 organizací a více než 230 odborníků z různých oblastí.

Celkově Zadavatel SÚRAO inicioval následující počet Zakázkových listů v jednotlivých oblastech podpory:

1. Chování VJP a forem RAO, nepřijatelných do přípovrchových úložišť, v prostředí hlubinného úložiště – 3 ZL;
2. Chování ukládacích obalových souborů (UOS) VJP a RAO v prostředí hlubinného úložiště – 4 ZL;
3. Chování tlumících, výplňových a dalších konstrukčních materiálů v prostředí hlubinného úložiště – 3 ZL;
4. Řešení úložných vrtů a jejich vliv na vlastnosti obklopujícího horninového prostředí – 1 ZL (Bukov EDZ);
5. Chování horninového prostředí – 11 ZL;
6. Transport radionuklidů z úložiště – 9 ZL;
7. Charakterizace horninového prostředí – 6 ZL.

Dále byly vydány 2 ZL listy, které byly zaměřeny na řízení projektu (Koordinace a management) a zpracování závěrečné zprávy (Závěrečná zpráva).

Přehled všech ZL je uveden v Příloze 1.

Ačkoli zadání projektu dělilo ZL do jednotlivých oblastí, celým projektem se komplexně prolínala vzájemná propojenost jednotlivých ZL, které buď navzájem tvořily návazný systém

vstup – výstup, či tvořily clustery, skládající plnění cílů projektu, a to v následujících základních oblastech:

- Hodnocení bezpečnosti, a to včetně popisu vlastností a procesů bariér HÚ;
- Hodnocení lokalit;
- Vývoj/hodnocení modelových nástrojů;
- Vývoj metod, směřujících k popisu vlastností geologického prostředí.

Zhodnocení bezpečnosti úložiště radioaktivních odpadů jak před jeho uzavřením, tak i po jeho uzavření musí vycházet z rozboru scénářů definovaných na základě identifikace a analýzy vlastností, událostí a procesů, které mohou ovlivnit jeho bezpečnost. Je třeba identifikovat jak vlastnosti, procesy a události normálního vývoje úložiště, tak i vlastnosti, události a procesy, které mohou narušit normální vývoj úložiště včetně odhadu pravděpodobnosti jejich výskytu (například zemětřesení nebo permafrost). Tento požadavek není možné splnit bez potřebného poznání lokality, kde by mělo být úložiště umístěno, bez porozumění procesům probíhajícím v úložném systému a vytvoření koncepčních, matematických a výpočetních modelů popisujících a predikujících vývoj úložného systému, zahrnujícího jak přírodní, tak i inženýrské bariéry. Všechny tyto modely navíc musí projít procesem validace a verifikace. Vybraná lokalita bude v oblasti bezpečnosti splňovat s rezervou všechny legislativní požadavky a mezinárodní závazky ČR, které jsou na hlubinné úložiště kladeny. Vhodnost lokalit pro hlubinné úložiště musí být potvrzena bezpečnostními studiemi v rozsahu zadávací bezpečnostní zprávy v souladu s platnými právními předpisy, zejména pak atomového zákona (č. 263/2016 Sb.).

Vzájemný vztah řešených dílčích projektů (zadávacích listů) v rámci projektu je zobrazen na Obr. 2.

5.1 Hodnocení bezpečnosti

Strategie SÚRAO pro dosažení dlouhodobé bezpečnosti hlubinného úložiště vychází z následujících bezpečnostních principů, formulovaných v dokumentech IAEA (2011a, b) a IAEA (2012):

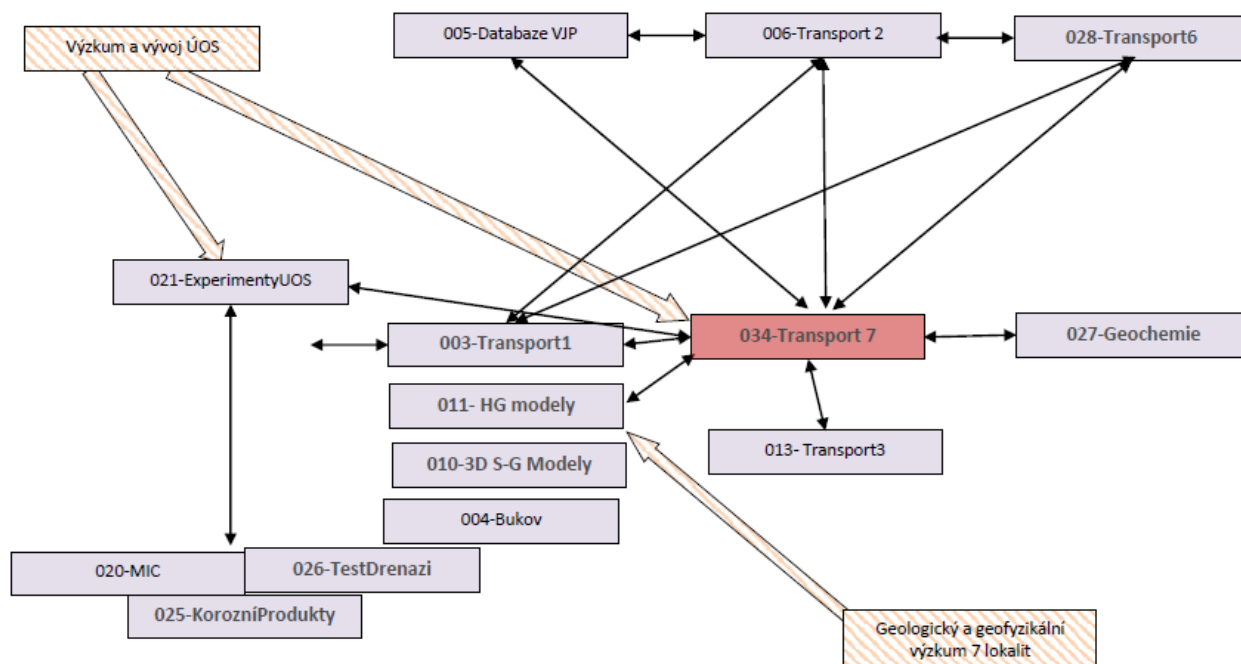
- a) Zadržet odpad v úložišti do doby pominutí jeho významné nebezpečnosti.
- b) Izolovat odpad od přístupného životního prostředí a snížit pravděpodobnost kontaktu člověka s odpadem.
- c) Zpomalit a snížit migraci radionuklidů do životního prostředí.
- d) Zajistit, aby množství radionuklidů, které se dostane do životního prostředí, bylo v každé době před i po uzavření úložiště přijatelně malé.

Pro výchozí popis systému HÚ v projektu byly použity následující komponenty (viz Trpkošová et al. 2018a) a vstupní data, čerpající z dále uvedených částí projektu či z navazujících projektů:

1. **zdrojový člen** (viz kap. 4.1);
2. **ukládací obalové soubory s VJP** (zejména projekt Výzkum a vývoj ukládacího obalového souboru pro hlubinné ukládání vyhořelého jaderného paliva do stádia realizace vzorku, ev.č. 354200 ve VVZ);

3. **inženýrské bariéry** (všechny inženýrské prvky úložiště kromě UOS s VJP):
 - 3.1. design úložiště (projekt Výzkumná podpora pro projektové řešení HÚ, ev.č. 354206);
 - 3.2. tlumící bariéra (buffer) – (viz kap. 4.6.5);
 - 3.3. výplňový materiál v úložných tunelech (backfill) (aproximován z kap. 4.6.5);
 - 3.4. podzemní prostory včetně EDZ (projekt Výzkumná podpora pro projektové řešení HÚ, ev.č. 354206 ve VVZ);
 - 3.5. těsnění šachet a vrtů a dalších volných prostor včetně zátek (closure; viz 4.6.5);
 - 3.6. ostatní konstrukční materiály (v daném případě neuvažováno);
4. **horninové prostředí** (viz kap. 4.5.5, 4.5.6 a 4.6.1);
 - 4.1. izolační část horninového prostředí bez poruchových zón (izolační část);
 - 4.2. obklopující horninové bloky s poruchovými zónami (transportní část);
5. **Biosféra** (vývoj modelu v Hustáková (2018); viz kap. 4.6.10).

Roční efektivní dávku na reprezentativní osobu je možno kvantifikovat výpočtem transportu radionuklidů z úložiště s uvážením různých scénářů vývoje hlubinného úložiště. Pro provedení pilotního výpočtu byla vybrána lokalita Kraví hora, pro kterou je v současnosti k dispozici nejvíce dat (Trpková et al. 2017). Jako nutný předpoklad pro provedení, byť i pilotních, výpočtů, bylo nutno kvantifikovat vlastnosti a procesy bariér HÚ, které vstupují do bezpečnostního výpočtu jako vstupní data. Výstupy ze ZL Databáze VJP pro bezpečnostní rozbor (PB-2014-ZL-S2565-005-DatabazeVJP; viz kap. 4.1.1), Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov (PB-2014-ZL-S2304-004-Bukov; viz kap. 4.5.2), 3D strukturně-geologické modely horninového prostředí pro HÚ (PB-2014-ZL-S2304-010-3DStrukturneGeoModely; viz kap. 4.5.5), HG modely horninového prostředí pro HÚ (PB-2014-ZL-S2393-011-HGModely; viz kap. 4.5.6), Vstupní parametry a procesní modely pro hodnocení transportu RN v horninovém prostředí (PB-2014-ZL-S2300-003-Transport1; viz kap. 4.6.3), Vstupní parametry a procesní modely pro hodnocení transportu radionuklidů přes inženýrské bariéry (PB-2014-ZL-S2565-013-Transport3; viz kap. 4.6.5), případně i navazujících samostatných projektů (např. projekt Výzkum a vývoj ukládacího obalového souboru pro hlubinné ukládání vyhořelého jaderného paliva do stádia realizace vzorku; evidenční číslo 354200 ve VVZ; či projekt Výzkumná podpora pro projektové řešení HÚ, ev.č. 354206 ve VVZ) tak poskytovaly vstupní podklady k provedení vlastních bezpečnostní výpočtů v rámci zadávacího listu Bezpečnostní rozbor HÚ v lokalitě Kraví hora (PB-2017-ZL-S3852-034-Transport7; viz kap. 4.6.10).



Obr. 61 Schéma návaznosti jednotlivých ZL pro provedení bezpečnostního výpočtu v rámci ZL Bezpečnostní rozbor HÚ v lokalitě Kraví hor (PB-2017-PZ-S3852-034-Transport7)

5.1.1 Zdrojový člen

Základní vstupní informací pro popis dějů v hlubinném úložišti VJP a RAO je kvalifikovaný odhad množství, formy a izotopického složení budoucího ukládaného odpadu. Jde o spočtení dlouhodobých inventářů ukládaných jednotek a forem odpadu a pořízení detailních informací o obsahu specifických izotopů. Stanovení inventáře pro VJP z dostupných údajů proběhlo v rámci ZL Databáze VJP pro bezpečnostní rozbor (PB-2014-ZL-S2565-005-DatabázeVJP) pro existující české JE a potenciální nové jaderné zdroje. Při výpočtech bylo třeba zvládnout zadání všech designů a typů paliva z jaderných reaktorů v zemi v současnosti provozovaných i perspektivně uvažovaných nových jaderných zdrojů, pro které se podobné výpočty dosud v ČR neprováděly. Pro účely dosažení cílů tohoto dílčího projektu byl připraven seznam palivových souborů a jejich výsledných vyhoření. Jedná se o konstrukčně různé palivové soubory pro reaktory typu VVER-440 a dva typy palivových souborů pro VVER-1000: VVANTAGE-6 a TVSA-T. Ve vyhořelém palivu byly sledovány pouze nuklidy, které jsou důležité z hlediska nakládání s vyhořelým jaderným palivem a pro ně byla určena jejich výsledná hmotnost a aktivita. Zajímavým zjištěním byl fakt, že příměs dusíku v palivu je zcela zásadní pro tvorbu radioaktivního ^{14}C , který je významným radionuklidem přispívajícím k celkové dávce při hodnocení dlouhodobé bezpečnosti HÚ (ZL Databáze VJP pro bezpečnostní rozbor – viz kap.4.1.1; Rataj et al. 2015).

Během řešení ZL bylo opakovaně diskutováno, zda je výběr radionuklidů uvedený v zadávacím listu projektu dostatečný (či naopak není příliš široký). Nicméně nebylo dosaženo v tomto ohledu jednoznačných závěrů. V neposlední řadě bude vhodné počítat výsledky pro reálné historické provozní podmínky s následným srovnáním výsledků s

odhady/měřeními/výsledky provozovatele elektrárny, tedy rovněž užší propojení s ČEZ (Rataj et al. 2015).

Znalost reálných provozních podmínek provozu JE se poměrně významně projevila také při porovnání izotopického zastoupení ^{14}C , ^{36}Cl a ^{41}Ca v betonu biologického stínění vyřazené jaderné elektrárny Greifswald (ZL Charakterizace RAO nepřijatelného do přípovrchového úložiště z vyřazování jaderné elektrárny – biologické stínění reaktoru, PB-2016-ZL-S4289-0035-Biologické stínění; Svoboda et al. 2017; viz kap. 4.1.34.1.3). Klíčovým problémem u provedených výpočtů bylo stanovení přesného složení serpentinitového betonu. Složení betonu se může lišit především množstvím kontaminantů (Cl, Cd a Eu), které jsou pro tento typ betonu typické, a také obsahem vodíku. Složení je určeno přírodními materiály, z nichž byl beton vyroben a také postupy použitými při jeho výrobě. Složení betonu má vliv nejen na radionuklidy vznikající následkem reakce s neutrony, ale i na změnu spektra neutronů. Oba problémy jsou navíc vzájemně závislé. Výsledné naměřené a modelově vypočtené hodnoty aktivit vybraných radionuklidů byly ve vzájemném rozporu, který v případě některých radionuklidů dosahuje až násobků jednoho řádu. Z analýzy získaných dat vyplývá, že hlavní neurčitost spočívá v nepřesném popisu složení betonu a nepřesností v informacích o reálných provozních podmínkách JE Greifswald.


Inventář pro ostatní odpady, neuložitelné do přípovrchových úložišť, které budou představovat především odpady z vyřazování JE, odpad navrácený po zpracování VJP z experimentálního reaktoru z Ruska a ostatní odpady, byl spočten v ZL Vlastnosti RAO nepřijatelných do přípovrchových úložišť (PB-2015-ZL-S0945-018-Charakterizace RAO; viz 4.1.2).

Určení množství odpadů neuložitelných do přípovrchových úložišť, pocházejících z vyřazování JE a NJZ, i jejich izotopového složení, bylo založeno na informacích z návrhů způsobu vyřazování a na expertním odhadu, neboť údaje nebyly vždy dostatečně dostupné či byly nejednotné.

Na základě inventarizace odpadů a analýz jeho složení, a to jak materiálového, tak izotopického, lze pro uložení v HÚ předpokládat následující hlavní materiály radioaktivních odpadů, jiných než VJP (Touš et al. 2018):

- uhlíková ocel;
- nerezová ocel;
- materiály Al;
- slitina BeO;
- betonový materiál (beton, těžký beton, serpentinitový beton);
- vitrifikát – sodno-hlinité fosfátové sklo (Al_2O_3 - Na_2O - P_2O_5);
- solidifikované vysokoaktivní kapaliny nebo kaly v betonové zálivce;
- ostatní radioaktivní odpady (URZ jako hladinoměry, terapeutické ozařovače, průmyslové ozařovače, ionizační hlásiče požáru, vlastní RAO bez zpevnění pro případné další využití pro přepracování ad.).

Na základě analýz složení těchto materiálů byly identifikovány i radionuklidy, které by mohly tvořit zdrojový člen pro hodnocení bezpečnosti HÚ v případě ukládání výše uvedených RAO do separátní sekce HÚ. Jedná se o radionuklidy, které mohou nejvíce ovlivnit bezpečnost HÚ, přičemž kritériem výběru byla jejich mobilita, poločas rozpadu, a i jejich dlouhodobý negativní účinek na lidský organismus. Jedná se o následující radionuklidy: ^{10}Be , ^{14}C , ^{36}Cl , ^{41}Ca , ^{55}Fe ,

 SÚRAO	Závěrečná zpráva projektu Výzkumná podpora pro bezpečnostní hodnocení HÚ	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 462/2020

^{59}Ni , ^{63}Ni , ^{90}Sr , ^{93}Mo , ^{93}Zr , ^{99}T , ^{94}Nb , ^{129}I , ^{135}Cs , ^{137}Cs , ^{133}Ba , ^{237}Np , ^{252}Cf a izotopy Am, Pu a Cm (Touš et al. 2018).

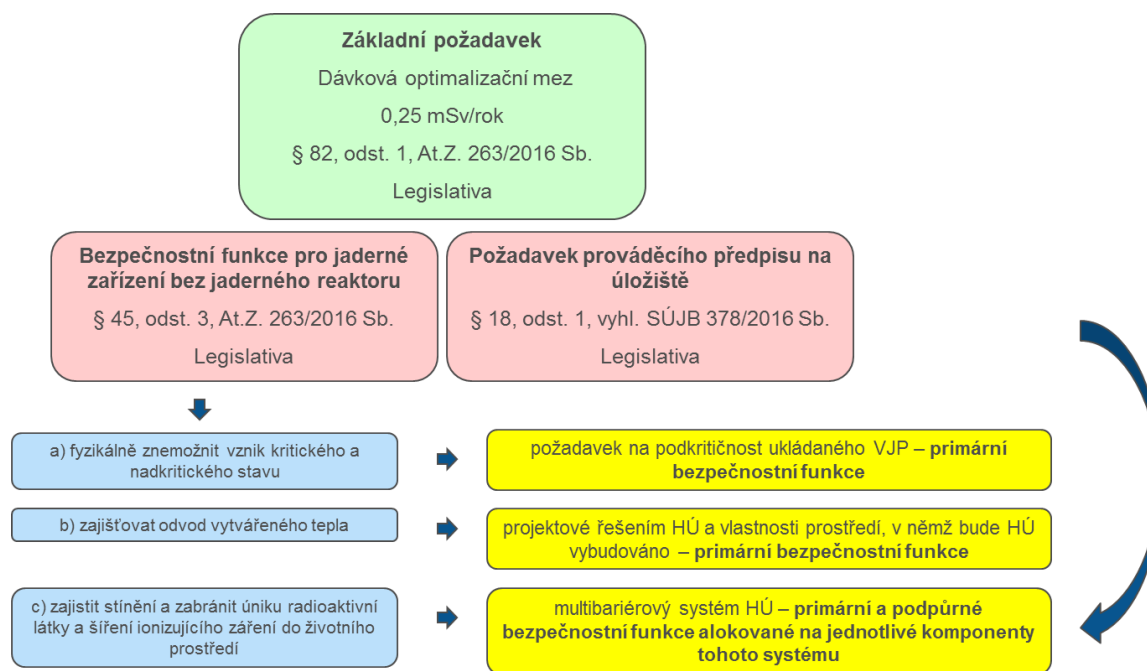
Analýzou objemu vyřazovaných materiálů bylo propočteno, že RAO vzniklé při vyřazování (v případě okamžitého vyřazování) z provozu stávajících jaderných zařízení (JE Temelín, JE Dukovany a výzkumný reaktor LVR-15) by bylo nutné uložit do 2 627 betonových ukládacích kontejnerů. Tyto kontejnery představují celkový objem 11 401 m³. Podstatnou část z tohoto množství RAO tvoří serpentinitový a konstrukční beton z JE Dukovany. Je zřejmé, že vhodnou optimalizací vyřazovacího procesu lze toto množství, a tím i požadavek na ukládací prostor v HÚ, významně snížit.

Pro uložení těchto odpadů se jako principálně vhodný jeví především materiál na bázi cementu, se kterým se v dané oblasti dlouhodobě pracuje a autoři studie Touš et al. (2018) nenarazili prakticky na žádný jiný další použitelný materiál.

5.1.2 Porozumění procesům a vlastnostem bariér HÚ

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., aby izolační a zádržné vlastnosti horninového prostředí v kombinaci s uměle vytvořenými překážkami zajistily, že uložený radioaktivní odpad nezpůsobí při očekávaném vývoji hlubinného úložiště větší ozáření reprezentativní osoby, než je dáno dávkovou optimalizační mezí. Tato dávková optimalizační mez je v současnosti stanovena v § 82, odst. 1 zákona č. 263/2016 Sb. na hodnotu 0,25 mSv rok⁻¹ (Gondolli et al. 2018a).

Na následujícím Obr. 62 jsou prezentovány požadavky na úložiště dané aktuálně platnou legislativou a odvozeny vztahy mezi bezpečnostními funkcemi podle § 45 odst. 3 zákona č. 263/2016 Sb. a primárními a podpůrnými bezpečnostními funkcemi definovanými pro hodnocení bezpečnosti hlubinného úložiště (Gondolli et al 2018a).



Obr. 62 Požadavky na úložiště dané aktuálně platnou legislativou a vztah mezi bezpečnostními funkcemi (Gondolli et al. 2018a)

Multibariérový systém hlubinného úložiště se v současném uvažovaném referenčním konceptu HÚ skládá z následujících dílčích systémů (odvozeno z ARP 2011):

- **obalový soubor** s odpadem (např. ukládací obalový soubor s VJP);
- **tlumicí bariéra** (tlumicí a výplňový materiál, např. bentonitové bloky v úložném vrtu);
- **horninové prostředí** (např. granitový masiv, v němž bude HÚ vybudováno);
- **biosféra** (vnější systém, pro nějž se provádí bezpečnostní hodnocení);

Volba bariér, u nichž je předpokládáno splnění bezpečnostních funkcí bariér, a už jsou definovány v ARP (2011) či v Gondolli et al. (2018a), je dána dostatečně podrobným poznáním vlastností a procesů v nich probíhajících.

Výzkum procesů ovlivňujících dlouhodobé fungování ukládacího obalového souboru se zaměřil především na ty oblasti, které nebyly pokryty v paralelně probíhajícím pilotním projektu Výzkum a vývoj ukládacího obalového souboru pro hlubinné ukládání vyhořelého jaderného paliva do stádia realizace vzorku (projekt ev. č. 354200 ve VVZ). Vstupy (data, porozumění procesům) z tohoto paralelního projektu vstupovaly zejména do bezpečnostních výpočtů v ZL Bezpečnostní rozbor HÚ v lokalitě Kraví hora (kap. 4.6.10).

V projektu Výzkumná podpora bezpečnostnímu hodnocení HÚ se práce, směřující k popisu procesů, ovlivňujících dlouhodobou životnost UOS, zaměřily především na:

- implementaci laboratorního experimentálního programu zaměřeného na mikrobiální korozi materiálů obalových souborů (ZL Mikrobiální koroze; PB-2015-ZL-S1411-020-MIC, kap. 4.2.1);

- studium korozních produktů vznikajících při korozi uhlíkové oceli, stanovení jejich množství a jejich vlivu na procesy probíhající v poli blízkých interakcí včetně vlivu na rychlosti koroze (ZL Korozní produkty; PB-2016-ZL-S0145-025-Korozni Produkty; viz kap. 4.2.2);
- vliv saturace tlumících materiálů na bodovou korozi materiálu ukládacího obalového souboru (Test omezení koroze UOS využitím drenážní vrstvy v úložných vrtech; PB-2016-ZL-S0578-026-TestDrenazi; viz kap. 4.2.4);
- prvotní ověření korozního chování materiálu vnějšího obalu UOS v alternativních těsnících materiálech (Experimenty s materiály UOS pro bezpečnostní rozbor; PB-2015-ZL-S1392-021-ExperimentyUOS; kap. 4.2.3).

Výsledky těchto ZL z velké části představovaly vývoj a implementaci nových, dosud neaplikovaných postupů či studium nových materiálů, a nevstupovaly přímo do bezpečnostních výpočtů, provedených v rámci tohoto projektu (kap. 4.6.10).

Výzkumy v rámci ZL Mikrobiální koroze (kap. 4.2.1) prokázaly přítomnost bakterií, které mají schopnost výrazně ovlivnit bezpečnost hlubinného úložiště, na přírodních podzemních lokalitách, kde lze předpokládat prostředí obdobné prostředí HÚ (podzemní pracoviště štola Josef a PVP Bukov, vrty na lokalitě Melechov; hloubky 60-500 m pod povrchem). Šlo především o síran-redukující (SRB), síru-oxidující, železo-redukující a železo oxidující bakterie (Černík et al. 2019). Nicméně při anaerobních laboratorních experimentech, sledujících limitní faktory rozvoje mikrobiální komunity v prostředí kompaktního bentonitu se ukazuje, že mikrobiální komunita vyskytující se v prostředí vodou nasyceného bentonitu je určena spíše bakteriemi přirozeně se vyskytujícími v bentonitu, nikoliv bakteriemi dodanými z vnějšího prostředí. Při experimentu studujícím vliv pH došlo pouze při použití nejvyšší studované hodnoty (pH 10) k omezení růstu mikroorganismů. Jako nejlepší způsob vedoucí k omezení mikrobiální aktivity bylo na základě provedených experimentů stanoveno použití vysoce kompaktních bentonitů. Bylo zjištěno, že čím je vyšší použitá suchá objemová hmotnost, tím menší mikrobiální aktivita (Černík et al. 2019; viz kap. 4.2.1).

Korozní experimenty s inokulací mikroorganismy poukázaly především na vliv dusičnanů. Koroze oceli je výrazně ovlivněna hlavně denitrifikačními bakteriemi, a pokud v prostředí není vysoké množství dusičnanů, je vliv na korozi bezvýznamný. Prostedí bentonitového pórového roztoku bylo nutričně chudé a nedovoluje v krátkodobém horizontu významné změny v prostředí způsobené metabolismem mikroorganismů, nebo vznik masivního biofilmu na povrchu kovu (Černík et al. 2019; kap. 4.2.1).

Experimenty simulující větší produkci korozních produktů použitím Fe prášku v rámci ZL Korozní produkty (kap. 4.2.2) poukázaly na potenciální ovlivnění vlastností tlumících materiálů (bentonitu). Došlo k výraznému poklesu kationtové výměnné kapacity (CEC) ve srovnání s výchozím bentonitem, nicméně není možné odlišit, zda je tento pokles způsoben alterací montmorillonitu nebo přítomností novotvořených korozních produktů či alteračních produktů s velmi nízkou CEC (viz kap. 4.2.2; Gondolli et al. 2018b). Výsledky modelování napovídají, že (i) bentonitová bariéra bude podléhat degradaci v podobě transformace montmorillonitu na fylosilikátové minerály, jako jsou např. chamosit a greenalit (negativní efekt), (ii) vytvářený korozní produkt magnetit může vyplňovat prostor na rozhraní železo-bentonit a snížit tak rychlost reakce železa (pozitivní efekt). Časové měřítko a míra těchto procesů je však předmětem značné nejistoty, jelikož pro mnoho důležitých parametrů byly v modelování použity pouze orientační/odhadované hodnoty (Gondolli et al. 2018b).

Pozitivní vliv na pasivaci povrchu uhlíkové oceli, která je uvažována v současném konceptu vývoje HÚ pro konstrukci ukládacího obalového souboru (např. ARP 2011; Trpkošová et al. 2017b), může mít použití těsnícího materiálu na bázi směsi bentonit – cement. Tato směs by mohla umožnit samovolnou pasivaci povrchu uhlíkové oceli, a tím i snížení korozní rychlosti. Korozní experimenty v prostředí tohoto materiálu proběhly v ZL Experimenty s materiály UOS pro bezpečnostní rozbor (viz kap. 4.2.3; Dobrev et al. 2019). Pokud bychom uvážili rovnoměrnou korozní rychlost pro srovnání s korozními zkouškami v bentonitu (stanovené např. v projektu SÚRAO Výzkum a vývoj ukládacího obalového souboru do stádia realizace vzorku, ev. č. 354200 ve VVZ), tak jsou hodnoty ve 2% směsi obdobné jako v čistém bentonitu. Naproti tomu jsou hodnoty korozní rychlosti ve zbylých směsích a čistém cementu výrazně nižší, což představuje pozitivní výsledek, nicméně korozní napadení není rovnoměrné. Lokalizace napadení je výraznější v 10% a 50% směsi, a to za jak anaerobních, tak aerobních podmínek. Elektrochemické zkoušky prokázaly samovolný přechod do pasivního stavu při hodnotách pH okolo 11,5, nicméně pasivní vrstva není příliš stabilní. Proto bude důležitá dlouhodobá stabilita alternativních materiálů, resp. stabilita podmínek při povrchu UOS. Provedené korozní zkoušky s alternativními těsnícími materiály prokázaly jejich potenciál i nevýhody v případě úvah o jejich použití v HÚ (viz kap. 4.2.3; Dobrev et al. 2019). Získané informace by měly sloužit především jako návrh pro budoucí práce s ohledem na nejistoty vyplývající z těchto prvotních prací.

Na potenciální lokální korozi materiálu ukládacího obalového souboru vlivem rovnoměrného/nerovnoměrného sycení kompaktovaného bentonitu za anaerobních podmínek se zaměřil ZL Test omezení koroze UOS využitím drenážní vrstvy v úložných vrtech (PB-2016-ZL-S0578-026-TestDrenazi, viz kap. 4.2.4; Dobrev et al. 2016), a to zavedením drenážní, více propustné vrstvy s křemičitým pískem, pro jeden typ experimentů. V rámci těchto laboratorních experimentů nebyl pozorován jednoznačně prokazatelný efekt rovnoměrného, resp. nerovnoměrného sycení bentonitu na korozní napadení uhlíkové oceli. Nicméně je potřeba vzít v úvahu krátkodobost experimentů a rozměr aparatury. Experimenty poskytly především úvodní informace, směřující k možnému provedení experimentu v reálném měřítku *in-situ* (např. v PVP Bukov; Dobrev et al. 2016).

Sledování vlastností inženýrských bariér, ve smyslu popisu fyzikálních, chemických a transportních vlastností bylo soustředěno jednak do oblasti podpory Chování tlumících, výplňových a dalších konstrukčních materiálů v prostředí hlubinného úložiště (ZL Verifikace metodiky pro stanovení kationtové výměnné kapacity bentonitu, metoda Cu-trien, PB-2015-ZL-S1307-019-CECBentonit; viz kap. 4.3.1; ZL Experimentální hodnocení plynopropustnosti inženýrských bariér hlubinného úložiště, PB-2017-ZL-U3831-036-Plynopropustnost; viz 4.3.2 a ZL Provedení předběžného výpočtu tlaku na UOS PB-2017-ZL-S1937-Tlak_kontejneru; viz 4.3.3), jednak do oblasti podpory Transport radionuklidů (ZL Vstupní parametry a procesní modelu pro hodnocení transportu radionuklidů přes inženýrské bariéry, PB-2015-ZL-S2565-013-Transport3, viz kap. 4.6.5; a ZL Transport radionuklidů přes materiály na bázi cementu, PB-2015-ZL-S2368-024-Transport5, viz kap. 4.6.7).

Zatímco ZL, zahrnuté přímo do oblasti Chování tlumících, výplňových a dalších konstrukčních materiálů v prostředí hlubinného úložiště (kap. 4.3.1, 4.3.2 a 4.3.3), sledovaly spíše testování metodik pro charakterizaci materiálů a studium procesů, které zatím nevstupují do bezpečnostních výpočtů (např. plynopropustnost), ZL Vstupní parametry a procesní modely pro hodnocení transportu radionuklidů přes inženýrské bariéry (PB-2015-ZL-S2565-013-Transport3; viz kap. 4.6.5) shromáždil na základě laboratorních experimentů významnou

sestavu dat, přímo využitelnou přímo pro bezpečnostní hodnocení HÚ, a to jak data geochemická, tak geotechnická a dále data popisující migraci radionuklidů ve zvolených typech bentonitů – BaM_2014 (komerčními produkty firmy Keramost, a. s., zpracovávané standardními metodami v provozu Obrnice – „Bentonit a Montmorillonit“) a BCV_2017 („Bentonit Černý vrch“) – Hofmanová et al. (2019).

Pro oba typy Ca-Mg bentonitů české provenience byly popsány velmi podobné geochemické a geotechnické vlastnosti (Hofmanová et al. 2019). Klíčové geotechnické parametry byly také stanoveny na formách připravených z bentonitu BCV (Na-, Ca- a směsné Na/Ca; Vašíček et al. 2019). Od objemové hmotnosti $\sim 1500 \text{ kg m}^{-3}$ nebyl pozorován žádný významný vliv složení iontovýměnného komplexu v mezivrstvi jílu ze skupiny smektitu na geotechnické chování.

Migrační vlastnosti byly sledovány pro materiál BaM a pro vybrané stopovače – HTO, I, Sr, Cs, Ra, Na a Ba, které reprezentovaly různé typy stopovačů (nesorbující se, slabě se sorbující a silně se sorbující). Ze srovnatelných hodnot zdánlivých difúzních koeficientů HTO, I, Na a Sr na sodné a vápenaté formě bentonitu byl odvozen závěr, že charakter dominantního vyměnitelného kationtu neovlivňuje významněji geometrické uspořádání pórového prostoru. Tyto výsledky tvoří protipól tzv. multiporozitního konceptu, v němž se předpokládá měnící se tloušťka difúzní dvojvrstvy a míra retardace se změnou iontové síly roztoku, a ukazují, že složení bentonitové pórové vody není výrazně ovlivněno roztokem použitým k nasycení vzorku (Hofmanová et al. 2019; kap. 4.6.5).

V rámci řešení projektu byly kationtově-výměnné reakce identifikovány jako jeden z dominantních procesů, který bude ovlivňovat transport radionuklidů přes inženýrskou bariéru bentonitu a rozhraní s ostatními bariérovými materiály. Na další nedostatky v současném popisu a porozumění difúze nasyceným kompaktovaným bentonitem poukázaly výsledky průnikových difúzních experimentů pro I, Sr i Cs. Proto bylo přikročeno k zavedení úpravy používaného difúzního modelu realizovaného v programovém prostředí GoldSim ve smyslu povrchové difúze, pomocí kterého byly průnikové difúzní experimenty se stronciem a cesiem vyhodnoceny.

Ze souboru dat, použitých následně pro aktualizaci sorpčních a difúzních parametrů radionuklidů pro bezpečnostní výpočet (viz kap. 4.6.5 a Hofmanová et al. 2019), lze za nejvýznamnější považovat srovnání migračního chování analogů radia (stroncía a barya) s vlastním radiem, které se běžně v literatuře používá (např. Vilks a Yang 2018). Radium bylo nejméně mobilní, což bylo ve shodě s výsledky sorpčních experimentů, kde bylo radium nejvíce zadržovaným kationtem, na rozdíl od nejmobilnějšího Sr. Přímé použití stroncía a barya jako analogů k rádiu se proto nejeví jako vhodné.

V souladu s výsledky studie vlivu vyměnitelného kationtu na difúzní chování nebyly pozorovány významné změny ani v hodnotách zdánlivých difúzních koeficientů HTO a jodidu v bentonitu nasyceném podzemními vodami o různém složení (Ca-Cl, Ca-HCO₃ a Na-HCO₃), simulujícímu děje na rozhraní bentonit – hornina.

V rozhraní korozní produkty-bentonit a bentonit-cementové materiály byly pozorovány změny v transportních vlastnostech bentonitu. Velmi tenká vrstva korozních produktů (pravděpodobně \sim první desítky μm) ovlivnila průběh difúze jodidu přes studované rozhraní tím výrazněji, čím byla nižší objemová hmotnost bentonitu (Rosendorf et al. 2018).

Výsledky všech sorpčních a difúzních experimentů z tohoto projektu byly zadány do databáze transportních parametrů, vytvořené programu MS Access, čítající přes 500 záznamů. Stále však tato data tvoří jen část dat, která jsou potřebná k provedení bezpečnostního výpočtu, a to specificky pro bentonity o daném složení. Vzájemný transfer dat z jiných konceptů (pro bentonity jiného složení) naráží na ovlivnění hodnot efektivního difúzního koeficientu externím prostředím. Experimentální výsledky v rámci tohoto ZL ukázaly, že hodnota zdánlivého difúzního koeficientu není na externích podmínkách významně závislá. Jedním z vhodných přístupů se proto jeví normalizace zdánlivých difúzních koeficientů na objemovou hmotnost bentonitu. S proměnlivostí efektivního difúzního koeficientu v závislosti na podmínkách v úložišti se při stávajících metodách bezpečnostního hodnocení úložiště (zatím) nepočítá (viz kap. 4.6.5, Hofmanová et al. 2019).

V pilotním bezpečnostním výpočtu (viz kap. Transport radionuklidů z úložiště / Bezpečnostní rozbor HÚ v lokalitě Kraví hora (PB-2017-PZ-S3852-034-Transport7) je pro první přiblížení uvažováno pouze ukládání vyhořelého jaderného paliva (Trpkošová et al. 2017, viz kap. 4.6.10). Pro detailní bezpečnostní rozbor na jednotlivých lokalitách, které budou v budoucnu použity pro výběr finální a záložní lokality, bude nutno do výpočtu zahrnout i část úložiště, do něhož budou ukládány ostatní odpady, neuložitelné do přípovrchových úložišť nízko a středně aktivních odpadů (viz kap. 4.1.2). Podle ARP (2011) se předpokládá, že tyto odpady budou ukládány v betonkontejnerech dle návrhu uvedeného v tomto dokumentu. V rámci rešerše, sledující způsoby ukládání těchto odpadů, nebyla zatím zjištěna jiná potenciální výplňová matrice než cementová (Touš et al. 2018; viz kap. 4.1.2). Cementové materiály se budou v HÚ vyskytovat rovněž jako součásti stavebních konstrukcí. Při kontaktu cementových materiálů s vodou dochází vlivem loužení jejich složek k výraznému zvýšení pH vodního prostředí a změně jeho chemického složení. To může v důsledku znamenat negativní ovlivnění jak vlastností bentonitové bariéry, tak transportních vlastností (sorpce, difúze) radionuklidů uvolněných z ukládacích souborů, ve kterých bude uložen radioaktivní odpad (Večerník et al. 2019).

Z toho důvodu byla pozornost věnována i cementovým materiálům, jejich vlastnostem a procesům, které se v rámci jejich dlouhodobého fungování v rámci multibariérového systému HÚ budou vyskytovat, a to v ZL Transport radionuklidů přes materiály na bázi cementu (PB-2015-ZL-S2368-024-Transport5, Večerník et al. 2019, viz kap. 4.6.7.). Rozpustnost radionuklidů pro prostředí referenční cementové vody pro U, Ra, Sr, Ca, Co, Cs, Ni byla vypočtena pro teploty 15 a 25 °C (Večerník et al. 2019).

V rámci provedených prací bylo studováno široké portfolio materiálů, jako jsou cementy typu CEM I, CEM II/A-S a CEM III/B, beton používaný k solidifikaci odpadů, ukládaných do úložiště Richard, a beton, používaný k solidifikaci odpadů v ÚJV Řež, a.s. Byl pro ně shromážděn významný soubor dat, které je možno použít přímo jako vstupy pro bezpečnostní hodnocení (porozita, BET, CEC, sorpční a difúzní charakteristiky pro ^3H , ^{125}I a ^{14}C , Ra, Sr a U – Večerník et al. 2019), a to jak HÚ, tak přípovrchových úložišť nízko a středně aktivních odpadů. Dále byly testovány i tzv. alternativní tlumící materiály, směsi bentonitů s přísadkou cementu, jejímž účelem bylo sledovat, jaké budou vlastnosti tohoto materiálu v případě uvážení použití pro posílení potenciálního vlivu směrem k lepšímu koroznímu prostředí (viz kap. 4.2.3) (Večerník et al. 2017b, 2019a, 2019b).

Sorpční experimenty byly prováděny pro doplnění k vybraným difúzním experimentům (se stopovači ^{14}C a ^{125}I) a jako samostatné experimenty se stopovači radiem, stronciem a uranem. Sorpce je obecně limitována rozpustností těchto radionuklidů v prostředí cementových výluhů.

Jako nejpodstatnější výsledek se jeví záchyt I⁻ v cementových materiálech, který se na jiné materiály prakticky nesorbuje (viz např. kap. 4.6.1; Večerník et al. 2019b). Záchyt jódu jako jednoho z nejvýznamnějších radionuklidů, přispívajících k výsledné bezpečnostní dávce na reprezentativní osobu (viz kap. 4.6.10), je významný pro zajištění primární bezpečnostní funkce HÚ, tj. zadržet a izolovat radioaktivní odpad v úložišti v multibariérovém systému inženýrských a přírodních bariér, aby uložený radioaktivní odpad nezpůsobil při očekávaném vývoji hlubinného úložiště větší ozáření reprezentativní osoby, než je dáno dávkovou optimalizační mezí 0,25 mSv rok⁻¹ (Atomový zákon č. 263/2016 Sb.). Tento fakt se jeví zajímavý, a to i ve vztahu k možnostem použití směsi bentonitu a cementu jako alternativního výplňového materiálu (tzv. ABM materiál), který by kromě potenciálu zlepšení pasivace uhlíkové oceli ukládacího obalového souboru (viz kap. 4.2.3) mohl představovat i potenciál lepší retenčních charakteristik pro jinak se nesorbující jodid I⁻. Jejich použití jako bariérové materiály je však nutno zkoumat v detailnějším záběru, než dovolovala náplň tohoto projektu.

Vzhledem k tomu, že i horninové prostředí jako poslední bariéra multi bariérového konceptu HÚ plní primární bezpečnostní funkci – *Omezit transport radionuklidů do biosféry nízkou hydraulickou vodivostí horninového masivu oproti jiným horninovým masivům* (Gondolli et al. 2018a) – i jeho vlastnosti a charakteristiky vstupují do bezpečnostního hodnocení HÚ. Vstupují do něj jednak vlastními charakteristikami lokálního geologického prostředí lokality Kraví hora, včetně hydrogeologické situace na dané lokalitě (ZL 3D strukturně-geologické modely horninového prostředí pro HÚ; viz kap. 4.5.5, Franěk et al. 2018; ZL HG modely horninového prostředí pro HÚ; viz kap. 4.5.6, Uhlík et al. 2018), jednak popisem migračních vlastností radionuklidů v daném horninovém prostředí (viz ZL Vstupní parametry a procesní modely pro hodnocení transportu RN v horninovém prostředí; viz kap. 4.6.1; Havlová et al. 2017; Klajmon et al. 2017, Havlová et al. 2019a,b). Modely popisující transport radionuklidů byly zpracovány s použitím 3 programů, a to dvou komerčních (MODFLOW a FEFLOW) a jednoho vyvíjeného (FLoW123d) v prostředí potenciálních lokalit, vycházejících ze zpracovaných HG modelů (viz kap. 4.5.6, Uhlík et al. 2018) ve zprávě Říha et al. (2018).

Pro popis migrace radionuklidů v horninovém prostředí směrem od HÚ RAO k biosféře jsou významné následující procesy:

- **rozpustnost radionuklidu;**
- **difúze do horninové matrice;**
- **sorpce na horninovou matici.**

Pro prostředí horninových masivů, reprezentujících potenciální lokality HÚ, jsou charakteristiky, popisující tyto procesy prezentovány ve zprávách Klajmon et al. (2017) a Havlová et al. (2017). Základním předpokladem bylo zahrnout do experimentálních prací jak reálné radionuklidy, tak vzorky horninové matrice i reprezentativních puklinových výplní. První experimenty na těchto materiálech, které mají obecně vyšší sorpční schopnosti než neporušená hornina, ukazují, že jejich přítomnost může výrazně napomoci zvýšení záchytu radionuklidů při jejich migraci do biosféry, a tedy i zvýšení bezpečnostní funkce horninového prostředí (*Omezit radionuklidy...* viz výše). Hodnoty retardačních koeficientů se pohybovaly nejméně o řád výše než pro neporušenou horninu (viz Havlová et al. 2019c). Vyhodnocení sorpčních vlastností puklinových materiálů tak může přispět ke snížení konzervatismu doposud používaných přístupů (např. i v ZL Bezpečnostní rozbor lokality Kraví hora – viz kap. 4.6.10; Trpkošová et al. 2018) a přiblížení se reálným podmínkám v horninovém prostředí.

Je jednoznačné, že vzhledem k nerealizaci průzkumných geologických prací na lokalitách je portfolio vzorků, reprezentující horninové prostředí potenciálních lokalit nedostatečné, a to včetně vzorků puklinových výplní. Pro kategorizaci charakteristik transportních cest pro bezpečností model je tak další rozšíření experimentální prací s použitím vzorků z reálného prostředí nevyhnutelné.

5.1.3 Bezpečnostní výpočet

Při rozhodování o lokalitách pro umístění hlubinného úložiště je třeba posoudit, zda lokality splní požadavky SÚJB na dlouhodobou bezpečnost systému HÚ. Jedním ze základních kritérií je dávka 0,25 mSv (optimalizační dávka), kterou může obdržet reprezentativní osoba v jednom kalendářním roce žijící v blízkosti hlubinného úložiště. Tuto dávku je možno získat na základě výpočtu transportu radionuklidů z úložiště s uvážením různých scénářů vývoje hlubinného úložiště. Pro provedení pilotních výpočtů tohoto typu byla vybrána lokalita Kraví hora, kde v současnosti je k dispozici nejvíce dat tak, aby naplněna osnova bezpečnostního rozboru dlouhodobé bezpečnosti hlubinného úložiště umístěného v krystalinické hornině v konceptu modifikovaného švédského konceptu KBS 3 (Trpkošová et al. 2018b; viz kap. 4.6.10).

Vývoj komplexního výpočetního modelu a navazující činnosti (hodnocení nejistot) probíhaly i v ZL Aktualizace integrovaného, transportního modelu pro hodnocení dlouhodobé bezpečnosti (PB-2014-ZL-S2303-006-Transport2; viz kap. 4.6.4) a ZL Hodnocení nejistot transportu radionuklidů z hlubinného úložiště (PB-2016-ZL-S0744-028-Transport6; viz 4.6.8). Vyvinuté výpočetní modely (Trpkošová et al. 2018a) byly propojeny do komplexního modelu v programovém prostředí GoldSim.

Tato řešení bylo zapojeno do vývoje komplexního modelu v prostředí GoldSim v centrálním ZL Bezpečnostní rozbor lokality Kraví hora; PB-2017-ZL-S3852-034-Transport 7; viz kap. 4.6.10). S použitím komplexního modelu transportu radionuklidů z HÚ do životního prostředí byl proveden výsledný deterministický výpočet. S ohledem na uvažovaný scénář byl výpočet proveden pro dva časové intervaly hodnocení 0 - 10 250 let a 0 - 1 milion let (Trpkošová et al. 2018a, b). Model je významně konzervativní – uvažuje transport radionuklidů puklinovým prostředím bez uvažování přítomnosti puklinových výplní a tedy nezohledňuje jejich vyšší retardační schopnosti, jež byla prokázána např. ve výsledcích sorpčních experimentů se sekundárními minerály v ZL Vstupní parametry a procesní modely pro hodnocení transportu RN v horninovém prostředí; viz kap. 4.6.1; Havlová et al. 2019a, b).

Z bezpečnostního výpočtu vyplývá, že pro zvolený centrální scénář ani v jednom z obou časových intervalů hodnocení nedojde k překročení stanovené dávkové optimalizační meze 0,25 mSv rok⁻¹. Maximum vypočtené roční efektivní dávky na reprezentativní osobu dosáhla hodnoty 0,136 mSv rok⁻¹ (54,4% dávkové optimalizační meze) v roce 10 020 (20 let po náhlém poškození 10 UOS současně v jednom roce. V časovém intervalu hodnocení 0 – 10 250 let k výsledné roční efektivní dávce nejvíce přispívají radionuklidy s vysokou hodnotou IRF (¹²⁹I, ³⁶Cl a ¹⁴C; Trpkošová et al. 2018b; viz kap. 4.6.10).

Postupná degradace 60 UOS po skončení jejich minimální životnosti v období od cca 140 000 až 220 000 má za následek zvýšení roční efektivní dávky z hodnoty 0,0020 mSv rok⁻¹ v roce 140 000 na hodnotu 0,0117 mSv rok⁻¹ (8,6 % dávkové optimalizační meze) v období od roku cca 774 600 do 937 000. Dominantní cestou ozáření reprezentativní osoby i v tomto období je příjem radionuklidů požitím (ingesce), která přispívá k celkové hodnotě roční efektivní dávky téměř ze 100 % (Trpkošová et al. 2018b; viz kap. 4.6.10).

V rámci neurčitostní a citlivostní analýzy byla provedena srovnávací studie, ve které byl vytvořený komplexní model v GoldSim co nejvíce přiblížen k modelu použitým v Posiva (1996). Srovnání hodnot toků z pole blízkých interakcí a geosféry potvrdilo správnost implementace komplexního modelu. Dále byly provedeny citlivostní a neurčitostní analýzy toků sedmi kritických radionuklidů ^{14}C , ^{36}Cl , ^{79}Se , ^{129}I (nesorbující se radionuklidy přispívající významnou měrou k výsledné dávce), ^{226}Ra , ^{234}U , a ^{238}U (silně se sorbující aktinidy) pro scénář jednoho UOS a byly identifikovány parametry, které nejvíce ovlivňují nejistoty v hodnotách maxim těchto toků (Trpková et al. 2018a), a to:

- **Tok z pole blízkých interakcí**
 - parametry IRF zdrojového členu a vstupní objemový tok do modelu geosféry – pro ^{14}C , ^{36}Cl , ^{79}Se , ^{129}I
 - distribuční koeficient bentonitu ($K_{d-\text{bent}}$) a geometrický faktor ($G(-)$; - pro ^{226}Ra , ^{234}U , a ^{238}U)
- **Tok z geosféry**
 - průtočná plocha a délka modelu pukliny – pro ^{14}C , ^{36}Cl , ^{79}Se , ^{129}I
 - smáčený obvod modelu pukliny, efektivní difúzní koeficient horninové matrice ($D_{e-\text{granit}}$) a distribuční koeficient horninové matrice ($K_{d-\text{granit}}$) – pro ^{226}Ra , ^{234}U , a ^{238}U

Citlivostní analýza ukázala, že v modelu biosféry je hlavním zdrojem nejistot rozhraní geosféra-biosféra, kde hraje významnou roli uvažování vztahu měrné aktivity radionuklidů v podzemní vodě a měrné aktivity radionuklidů ve vodě ve studni (Husťáková et al. 2018).

Pilotní bezpečnostní výpočet pro lokalitu Kraví hora představuje první ucelený soubor kroků, vedoucích k vyhodnocení dlouhodobého fungování HÚ v časovém horizontu až 1 milionu roků, pro který byla použita data z reálné lokality, uvažované pro umístění HÚ (viz kap. 0). Prokázal, že v řešitelském kolektivu existují nástroje, znalosti a data, které bude možno využít pro provedení bezpečnostních výpočtů pro umístění HÚ na potenciálních lokalitách v dalších krocích umístění HÚ, nebo je bude možno dále rozvíjet a doplňovat v dalších etapách vývoje programu HÚ.

5.2 Hodnocení lokalit s cílem posouzení vhodnosti pro umístění HÚ

Projekt Výzkumná podpora bezpečnostního hodnocení HÚ poskytl nepominutelnou podporu procesu zúžení počtu lokalit.

Pro uvažovaných 9 lokalit (Čertovka (Lubenec, Blatno - Ústecký kraj), Březový potok (Pačejov, Chanovice - Plzeňský kraj), Magdaléna (Jistebnice, Vlksice - Jihočeský kraj), Čihadlo (Pluhův Žďár, Lodhéřov - Jihočeský kraj), Hrádek (Nový Rychnov, Rohozná – Kraj Vysočina) a Horka (Budišov, Oslavička - Kraj Vysočina), Kraví hora (Kraj Vysočina), Na Skalním (Kraj Vysočina), Janoch (Jihočeský kraj) byly v rámci projektu zhotoveny 3D strukturně geologické modely regionální i detailní (ZL 3D strukturně-geologické modely horninového prostředí pro HÚ; PB-2014-ZL-S2379; viz kap. 4.5.5). Tyto 3D modely byly následně na základě definovaných nejistot updatovány na recentní stupeň znalostí, založeném na výsledcích geofyzikálních měření na lokalitách v rámci ZL Geologická interpretace terénních geofyzikálních dat pro aktualizaci 3D strukturně-geologických modelů potenciálních lokalit HÚ (PB-2017-ZL-S2196-037-Geofyzika; viz kap. 4.7.5) tak, aby odrážely nově získané informace zejména o průběhu zlomových linií na jednotlivých lokalitách.

Ze 3D strukturně geologických modelů vychází hydrogeologické modely, řešené v regionálním i detailním měřítku na všech lokalitách v ZL HG modely horninového prostředí pro HÚ (PB-2014-ZL-S2393-011-HG modely; viz kap. 4.5.6). Tyto modely byly opět revidovány na současný stav vědění o zlomových strukturách na základě výsledků ZL Geologická interpretace terénních geofyzikálních dat pro aktualizaci 3D strukturně-geologických modelů potenciálních lokalit HÚ (PB-2017-ZL-S2196-037-Geofyzika; viz kap. 4.7.5; Mixa et al. 2020) a byly nově dokumentovány v rámci ZL Aktualizace hodnocení lokalit z hlediska dlouhodobé bezpečnosti (PB-2019-ZL-S3183-043-Hodnocení 2; viz kap. 4.7.6).

Kromě toho byly v ZL Vstupní parametry a procesní modely pro hodnocení transportu RN v horninovém prostředí (PB-2014-ZL-S300-003-Transport1; viz kap. 4.6.5) vytvořeny transportní modely nesorbujících se radionuklidů v horninovém prostředí pro 7 lokalit (kromě ETE-jih a EDU-západ - tyto modely byly vytvořeny v ZL Předběžné hodnocení lokalit EDU-západ a ETE-jih z hlediska dlouhodobé bezpečnosti; PB-2017-ZL-S4076-039-Hodnocení ETE_EDU; viz kap. 4.7.4).

Do hodnocení lokalit kromě exaktních výsledků 3D strukturně geologických modelů a hydrogeologických modelů vstoupily i studie, které studovaly charakteristiky lokalit, související s jejich dlouhodobou stabilitou. Zabývaly se klimatickou stabilitou lokality v dlouhodobém výhledu nejméně 100 tis let (ZL Expertní odhady dlouhodobé stability horninového prostředí / Klimatická stabilita území; PB-2014-ZL-S2382-008-KlimatickaStabilita; viz kap. 4.5.4; Nývlt a Pačes, 2015), neboť klima a jeho změny výrazně ovlivňují hydrogeologické poměry území, zejména hlubinný oběh podzemní vody a její chemizmus. Dále byly využity výsledky vyhodnocení erozní/geodynamické stability v ZL Expertní odhady dlouhodobé stability horninového prostředí / Erozní stabilita území (PB-2014-ZL-S2380-007-ErozniStabilita; viz kap. 4.5.3), s uvážením skutečnosti, že povrch území je složitý dynamický systém, který je formován mnoha vnitřními a vnějšími faktory (vertikální pohyby zemské kůry, charakter hornin, klimatické vlivy, exogenní geodynamické jevy, vegetace apod.). Vlivem eroze povrchu území s vybudovaným HÚ bude docházet v dlouhodobém horizontu k změnám hloubky úložiště (pozitivní nebo negativní). Změny morfologie v příštích 100 000 let mohou v konečném

důsledku vyvolat změny režimu a oběhu podzemní vody v regionálním měřítku, změny erozní báze apod. (Hroch et al. 2015). Významnou charakteristikou, která hraje roli v posouzení umístění jak povrchového, tak podzemního areálu HÚ, je seismická stabilita (ZL Expertní odhady dlouhodobé stability horninového prostředí / Seismická stabilita území; PB-2014-ZL-S2379-009-SeismickáStabilita; viz kap. 4.5.4.6). Seismická stabilita je důležitý požadavek dlouhodobé stability pro území s vybudovaným HÚ RAO. Český masiv jako geologická struktura je relativně stabilní, přičemž nevykazuje známky zvýšené seismicity. Území ČR je monitorováno na seizmické otřesy, přičemž naměřené hodnoty lokální magnitudy jsou dlouhodobě pod limitní hodnotou pro kritérium vhodnosti (Kaláb et al. 2015).

Podpůrné vstupní podklady pro porovnání charakteristik lokalit byly shromážděny rovněž v ZL Vstupní parametry a procesní modely pro hodnocení transportu RN v horninovém prostředí (PB-2014-ZL-S2300-003-Transport1; viz kap. 4.6.1; Havlová et al. 2019), a jednak data hodnocení migračních vlastností hornin a puklinových výplní lokalit (Havlová et al. 2020; Havlová et al. 2018), jednak speciace a rozpustnost radionuklidů v podzemních vodách lokalit (Klajmon et al. 2017). Výpočet pro vybrané radionuklidy byl sice limitován omezenými informacemi o složení podzemních vod na lokalitách, nicméně poskytl první rozsáhlejší představu o potenciálních migračních vlastnostech hornin na potenciálních lokalitách (Havlová et al. 2019).

Souborné vyhodnocení proběhlo ve výstupech Havlová et al. (2018a-l). Na základě této analýzy však byly identifikovány nejistoty, spojené s lokalizací zlomových struktur na lokalitách. Pro získání věrohodnějšího obrazu o tektonické stavbě a ověření existujících zlomových indikací (z geologického mapování, reinterpretace archivního geofyzikálního měření, indikací pomocí DPZ apod.) bylo nutné provést povrchová geofyzikální měření. V návazných pracích, probíhajících v rámci ZL Geologická interpretace terénních geofyzikálních dat pro aktualizaci 3D strukturně-geologických modelů potenciálních lokalit HÚ (Mixa et al. 2019 a 2020; viz kap. 4.7.5) bylo cílem získaným geofyzikálním anomáliím přiřadit geologický význam a zahrnout interpretované parametry (např. mocnost, úklon apod.) do strukturně-geologických modelů lokalit. Vlastní geofyzikální práce proběhly v rámci samostatného projektu mimo ZL. Práce směřovaly jednak k aktualizaci 3D strukturně-geologických modelů (viz kap. 4.7.5; Mixa et al. 2019; Mixa et al. 2020), jednak k aktualizaci lokalizace perspektivních území pro budoucí geologické charakterizační práce a projektové práce (Pertoldová et al. 2019). A konečně byly také zdrojem informací pro zpracování podkladových zpráv pro hodnocení lokalit pro potenciální umístění HÚ (Havlová et al. 2020 a–i) v rámci ZL Aktualizaci hodnocení lokalit z hlediska dlouhodobé bezpečnosti (PB-2019-ZL-S3183-043-Hodnocení2; viz kap.4.7.6).

Zprávy Havlová et al. (2020a-i) jsou jedním ze základních vstupů pro vyhodnocení lokalit z hlediska umístění jaderného zařízení a zúžení počtu lokalit z 9 hodnocených na 4 v souladu s aktualizovanou verzí Konceptu nakládání s RAO a VJP v ČR z roku 2019, které proběhlo v první polovině roku 2020. Po vlastním hodnocení a po vyjádření Poradního panelu expertů k předloženému hodnocení byl návrh preferovaných lokalit pro další etapu prací SÚRAO (Vondrovic et al. 2020) předán nadřízenému ministerstvu (Ministerstvu průmyslu a obchodu). Po mezirezortním připomínkovém řízení bude návrh preferovaných lokalit postoupen vládě ČR k odsouhlasení (Vondrovic et al. 2020). V další fázi přípravy HÚ v ČR budou další práce pokračovat jen na vybraných 4 lokalitách.

5.3 Vývoj/hodnocení transportních modelů pro hodnocení migrace stopovačů v horninovém prostředí

Jedním z požadovaných kritérií při posuzování vhodnosti horninového masivu pro situování HÚ je absence regionálních vodivých zón v izolační části úložiště. Není však možné vyloučit přítomnost menších vodivých zón, které mohou tvořit část preferenčních cest z prostor HÚ do biosféry. Vzniká tak potřeba testovat transport radionuklidů přes puklinové systémy procházející prostorem UOS do návazných puklinových systémů s napojením do biosféry.

Stávající geologické modely, vyhotovené v rámci existujících zadávacích listů zohlednily pouze geologické fenomény mapového měřítka. Pro jejich větší věrohodnost a kalibraci dalších návazných modelů bylo tedy nutné přistoupit k modelování geologických fenoménů detailnějšího měřítka, tak aby kritické fenomény, které mohou ovlivnit funkcionalitu úložiště, byly ve stávající fázi výběru lokality věrohodně popsány. Mezi tyto fenomény patří křehké struktury nižších řádů (zlomy, puklinové systémy a pukliny), které nelze věrohodně predikovat jiným způsobem než matematickým modelováním. V rámci ZL Matematické modelování křehkého porušení horninového prostředí metodou DFN (PB-2016-ZL-S1351-030-DFN ; viz kap. 4.7.2) byly provedeny kroky ke generování puklinových sítí metodou DFN (discrete fracture network modelling). K tomu bylo třeba vyvinout softwareDFraM, který data získaná z terénu využívá jako vstupní informace a následně identifikuje statistické parametry odpovídajících trojrozměrných DFN sítí (Kabele et al. 2018). Program je rovněž možno využít pro generování libovolného množství realizací DFN modelů v uživatelsky specifikovaném objemu horninového masivu. Zmíněná funkcionalita byla v rámci tohoto ZL využita pro tvorbu DFN modelů na všech lokalitách (Kabele et al. 2018).

S potenciální přítomností menších vodivých zón, které mohou tvořit část preferenčních cest z prostor HÚ do biosféry, pracoval navazující ZL Transport radionuklidů z úložiště / Testování koncepčních a výpočetních modelů (PB-2017-ZL-S2222-041-Transport 8; viz kap. 4.6.11). V rámci tohoto ZL byly připraveny detailní numerické modely proudění podzemní vody a transportu v horninovém prostředí, které byly založeny na metodě DFN, případně na kombinaci DFN a CPM přístupu. Na základě zpracovaných strukturních dat z PVP Bukov byly v další fázi projektu připraveny GeoDFN modely v rozsahu zájmového bloku horninového masivu. Současně byl realizován HydroDFN model a byly vypočteny proudění a advektivní transport, aby mohly být zahájeny práce na transportních modelech v programu GoldSim. V poslední fázi projektu byly na základě generovaných GeoDFN modelů zpracovány HydroDFN modely verze v1 a v2 a vypočteno proudění a advektivní transport v puklinové síti. Simulace byly realizovány současně ve třech softwarech a průběžně byly porovnávány a prezentovány dosažené výsledky. Nicméně vzhledem k omezenému termínu zpracování ZL bylo identifikováno velké množství nejistot a možností k dalšímu rozšíření a pokračování zpracování strukturních, hydrogeologických a transportních modelů (viz kap. 4.6.11, Gvoždík et al. 2019).

Významnou součástí zajištění kvality řešení a výsledku simulací systému bariér HÚ je i verifikace modelů, tj. kontrola, zda simulační model odpovídá abstraktnímu modelu, který představuje předpokládaný systém či proces. K vytváření simulací v rámci řešení projektu byly použity jak modely (kódy) komerční (MODFLOW, FEFLOW, GoldSim), tak modely tzv. in-house, tj. vytvářené samotnými institucemi (Flow123d).

V kontextu počítačových simulací je ověření modelu procesem potvrzení, že je správně implementován s ohledem na koncepční model (odpovídá specifikacím a předpokladům považovaným za přijatelné pro daný účel aplikace). Během ověřování je model testován, aby mohly být nalezeny a opraveny chyby při implementaci modelu. Jednou z možností, kterou je možno uplatnit pro verifikaci modelů je benchmarking, tj. řešení úlohy jednoho zadání pomocí několika kódů, analýza výsledků tohoto výpočtu a odlišností výsledků jednotlivých kódů a následně implementace potenciálních úprav do původních modelů. Tento princip byl uplatněn i v rámci řešení projektu Výzkumná podpora, a to v několika simulačních fórech:

- **ZL Testování transportních modelů s využitím *in-situ* zahraničních experimentů** (PB-2015-ZL-S1900-022-Transport4; viz kap. 4.6.6); cílem tohoto dílčího projektu bylo validovat koncepční a počítačové modely transportu radionuklidů, vytvořené v prostředí GoldSim, Flow123d a MODFLOW v rámci SKB Ground Water Flow and Transport of Solutes (GWFTS) s daty experimentů WPDE (Water Phase Diffusion Experiment), LTDE-SD (Long Term Sorption Diffusion Experiment) v podzemní laboratoři Äspö ve Švédsku a TDE (Through-Diffusion Experiment) v podzemní laboratoři ONKALO ve Finsku (Hokr et al. 2020).
- **ZL Vývoj a ověřování metodik modelování THMC procesů v rámci mezinárodního projektu** (PB-2016-ZL-S0870-029-Decovalex; viz kap. 4.6.9). Cílem tohoto dílčího projektu bylo porovnání modelových řešení pro vyhodnocení vybraných termo-hydro-mechano-chemických (THMC) jevů v horninovém prostředí, souvisejících s transportem radionuklidů. K tomu byla využita platforma DECOVALEX („Development of Coupled Models and their Validation against Experiments“), a to na základě úloh zaměřených na zatápění úseku rozrážky v podzemní laboratoře Mizunami (Japonsko) jako analogu obnovení hydraulického a chemického stavu podzemní vody po uzavření úložiště (řešeno ve Flow123d), na hydro-mechanický proces saturace bentonitových bloků a pelet a jejich homogenizaci v experimentu EB v laboratoři Mont Terri (COMSOL Multiphysics) a na ověření proveditelnosti, spolehlivosti a relevanci *in-situ* měření hydraulické vodivosti horninové matrice a transmisivity puklin (COMSOL Multiphysics; Maryška et al. 2019).
- **ZL Benchmarkové studie s GRS** (PB-2019-ZL-S3620-044-GRS; viz kap. 4.6.12), jehož cílem bylo ověření správnosti výsledků dosažených při přípravě bezpečnostního hodnocení hlubinného úložiště radioaktivních odpadů, a to především při řešení modelu pole blízkých interakcí (kód GoldSim), při hydrogeologickém modelování lokality Čihadlo (program MODFLOW) a při řešení modelu biosféry (program GoldSim; Hustáková et al. 2018). V rámci benchmarku se podařilo nalézt mezery ve výpočtu v modelu biosféry v programu GoldSim a opravit model, který byl připraven v rámci Bezpečnostního rozboru HÚ v lokalitě Kraví hora (Noseck et al. 2020).

Platformy GWFTS a DECOVALEX pokračují v řešení úloh i za horizont tohoto projektu. Při řešení byly úspěšně verifikovány modely mezi sebou, z experimentálních dat pak byly v mnoha případech zpřesněny popisy jevů či odhaleny nedostatky měření, ale ne vždy bylo dosaženo jednoznačného konsenzu řešitelů v hodnocení příčin odlišnosti modelu a experimentu. U ZL Benchmarkové studie s GRS obě řešitelské strany projeví výrazný zájem o pokračování spolupráce.

5.4 Vývoj metod, směřujících k popisu vlastností horninového prostředí

Pro charakterizaci, hodnocení a monitoring horninového prostředí pro účely hodnocení bezpečnosti je třeba využívat řadu geologických metod a nástrojů, které je třeba ověřit ještě před jejich rutinním použitím pro charakterizaci horninového prostředí kandidátních lokalit. Pro tyto účely sloužila dvě podzemní pracoviště, a to podzemní výzkumné pracoviště (PVP) Bukov v prostoru uzavřeného dolu Rožná (SÚRAO; <https://www.pvpbukov.cz/o-pvp-bukov/>), a vodárenský přivaděč Bedřichov (TUL).

V rámci ZL Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov (PB-2014-ZL-S2304-004-Bukov; viz kap. 4.5.2) bylo provedeno komplexní zhodnocení geologického prostředí připravované podzemní laboratoře. Nová geologická data a zpracované 3D modely pracoviště a jeho širšího okolí směřovaly k efektivnímu využití laboratoře pro experimentální činnost. Provedený výzkum byl zaměřen na analýzu petrologického a geochemického složení hornin včetně charakteristiky minerálních výplní tektonických (alteračních) zón, odhadu teplotně-tlakových podmínek metamorfního vývoje, zhodnocení základních petrofyzikálních vlastností hornin, spektrální analýzu vybraných částí vrtných jader a radiometrické datování hlavních etap geologických procesů. Dále byla provedena komplexní strukturní analýza prvků duktilní a křehké tektoniky včetně aplikace metody anizotropie magnetické susceptibility (AMS). Na základě souboru archivních geologických dat a nového geologického mapování povrchové části zájmového území podzemního výzkumného pracoviště (PVP) Bukov byla dále vytvořena základní geologická mapa v měřítku 1 : 10 000 (Bukovská a Verner eds. 2017). Výzkumné práce poskytly ucelený soubor poznatků nezbytných pro následnou realizaci experimentů zaměřených na dlouhodobou bezpečnost a technickou proveditelnost budoucího hlubinného úložiště. Navíc tyto práce umožnily získat cenná data, která byla využita i v bezpečnostním výpočtu v rámci kap. 4.6.10, a to jak geologické a strukturní podklady, tak i data o migračních charakteristikách hornin v tomto podzemním díle (Bukovská a Verner eds. 2017).

Podzemní výzkumné pracoviště Bukov, lokalizované v hloubce 600 m pod povrchem (PVP Bukov), slouží jako testovací lokalita pro hodnocení chování hornin kandidátních lokalit v hloubce odpovídající předpokládané hloubce hlubinnému úložišti do doby, než bude vybrána finální lokalita a vybudována konfirmační podzemní laboratoř v této lokalitě. S přihlédnutím k výsledkům komplexní geologické charakterizace byly následně revidovány a navrženy nové experimenty pro PVP Bukov – ZL Příprava experimentů v PVP Bukov (PB-2015-ZL-S0655-016-BukovExperimenty; viz kap. 4.5.7; Havlová et al. 2015a) a ZL Plán experimentů PVP Bukov pro podporu bezpečnostního rozboru lokality Kraví hora (PB-2016-ZL-U2686-033-PřipravaBukov; viz kap. 4.5.8; Havlová et al. 2015b). Některé z těchto experimentů nebo ty, které jimi byly inspirovány, již byly zahájeny v době ukončení projektu (např. Fyzikálně interakční experiment <https://www.pvpbukov.cz/projekt/?pid=4>; Hydrologický a hydrochemický monitoring <https://www.pvpbukov.cz/projekt/?pid=2> ad.).

Dalším výzkumným podzemním pracovištěm, kde byly rozvíjeny a testovány metody pro charakterizace horninového prostředí je tunel, propojující vodní nádrž Josefův důl s úpravnou vody v Bedřichově, v délce cca 2600 m, s výškovým rozdílem 40 m. Tento tunel prochází granitovým masivem a dosahuje maximální hloubky cca 140 m pod povrchem. Metodiky, uplatněné v ZL Vývoj a ověřování metodik pro charakterizaci horninového prostředí (PB-2014-ZL-S2566-012-Bedrichov; viz 4.7.1), zahrnují geofyzikální měření, hydrogeologické měření,

 SÚRAO	Závěrečná zpráva projektu Výzkumná podpora pro bezpečnostní hodnocení HÚ	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 462/2020

měření chemického složení vody, měření posunů horninových masivů, seismická měření či měření transportních vlastností (Hokr et al 2018).

6 Doporučení pro další výzkumné práce pro bezpečnostní hodnocení v rámci zúžení počtu lokalit pro umístění HÚ

Plán dalších prací v oblasti podpory bezpečnostního hodnocení HÚ by měly obecně vycházet z následující podkladů:

- z výsledků projektu Výzkumná podpora bezpečnostního hodnocení HÚ (2014 – 2020);
- z výsledků další navazujících i individuálních národních a mezinárodních projektů;
- z Plánu výzkumu a vývoje 2020 SÚRAO (v přípravě);
- z milníků a cílů, definovaných v Konceptu nakládání s radioaktivními odpady (2019);
- z mezinárodních doporučení (dokumenty IAEA, NEA/OECD, IGDTP SRA 2011, Beattie et al. 2015 ad.; POSIVA 2000 ad.).

Detailní doporučení budoucích prací je uvedeno v rámci popisu každého samostatného ZL v kapitole 4. Doporučení lze shrnout do několika obecných závěrů v každé jednotlivé oblasti, uvedených v následujících kapitolách pro každou oblast.

6.1 Chování VJP a forem RAO, nepřijatelných do přípovrchových úložišť, v prostředí hlubinného úložiště

V oblasti charakterizace zdrojového členu (viz kap. 4.1.2, 4.1.3) je možno najít několik směrů pro rozvoj této problematiky, a to především:

- Aktualizovat inventář VJP a RAO (seznam významných radionuklidů), a to včetně vlastností odpadu.
- Zaměřit se na detailní specifikaci okamžitě uvolnitelných radionuklidů, které významně přispívají k celkové dávce na reprezentativní osobu.
- Úzce spolupracovat s provozovateli jaderných zařízení, a to včetně výzkumných reaktorů, s cílem uvést do souladu vypočtené hodnoty a reálné historické provozní podmínky.

6.2 Chování ukládacích obalových souborů (UOS) VJP a RAO v prostředí hlubinného úložiště

Primární bezpečnostní funkcí UOS v multibariérovém konceptu HÚ je zajištění izolační funkce, zajišťující dostatečně dlouhé zadržení radionuklidů v UOS, a odolnost proti mechanické zátěži v HÚ po definovanou dobu (Gondolli et al. 2018a). Materiál UOS musí tedy přispívat k zajištění splnění těchto primárních funkcí a další výzkumné práce by to měly reflektovat (viz kap. 4.2). Jde především o rozvoj v oblastech:

- vlivu mikrobiálních procesů na korozi materiálů UOS pro VJP;
- studium extrémních podmínek (radiolýza, teplota, složení roztoku, sycení bentonitu) a jejich vlivu na dlouhodobou životnost UOS (a to včetně UOS pro RAO);

- studium alternativních materiálů pro UOS pro VJP (jiné koncepty, případně nástřik, keramika) i alternativních tlumících materiálů, které by mohly umožnit optimalizaci procesu pasivace povrchu v případě použití materiálů na bázi železa;
- dlouhodobých experimentů laboratorních i in-situ, které by umožnily sledovat procesy v delších časových intervalech;
- vývoje ukládání RAO jiných než VJP, a to včetně vitrifikovaného odpadu, který bude navrácen po přepracování v roce 2028 z Ruské federace, se zaměřením na vývoj ukládacích obalových souborů pro tyto typy odpadů a výplňových maticí;
- definování limitů a podmínek (LaP) pro přijetí odpadu (VJP a RAO) do HÚ.

6.3 Chování tlumících, výplňových a dalších konstrukčních materiálů v prostředí hlubinného úložiště

Tlumící bariéra úložného vrtu musí snížit pravděpodobnost mechanického poškození UOS po definované dobu. Dále musí tlumit chemické změny v okolí UOS po definované dobu a musí minimalizovat negativní vlivy ostatních bariér na UOS po definované dobu. A konečně musí omezit transport radionuklidů advekcí zajištěním nižší hydraulické vodivosti použitého materiálu oproti horninovému prostředí (primární bezpečnostní funkce; Gondolli et al. 2018).

Studium tlumících materiálů na bázi bentonitu (viz kap. 4.6.5) by ve světle provedených prací v dalším období mělo sledovat:

- Pro navazující práce v laboratorním měřítku je zásadní zajistit dostatečné množství homogenního bentonitového materiálu či nastavit postupy vypořádání se s nehomogenitou hustoty a zajistit jeho charakterizaci s co nejmenšími nejistotami, zejména stanovení obsahu jílových minerálů ze skupiny smektitu.
- Detailní studium migračních vlastností na charakterizovaném bentonitovém materiálu (viz kap. 4.6.5); vliv zastoupení hořčíku na migrační chování radionuklidů.
- Vliv reálné podzemní vody ze zvolených lokalit; vliv složení podzemní vody na vznik koloidů (stabilita, vliv na transport radionuklidů, vliv koncentrace Si); možno provést až po zahájení průzkumu na lokalitách; nejlépe in-situ.
- Vliv geochemických vlastností bentonitu na okolní inženýrské bariéry HÚ.
- Vliv geochemických vlastností bentonitu na okolní prostředí horninového masivu, nejlépe in situ.
- Vývoj THMC modelů.
- Detailní studium migrace plynů v prostředí inženýrských bariér.
- Studium mikrobiálních procesů v bentonitu (propojeno s kap. 6.2); stanovení limitních hodnot použité suché objemové hmotnosti bentonitu pro rozvoj mikrobiální aktivity za *in situ* podmínek.

Studium tlumících materiálů na bázi cementu (viz kap. 4.6.7) by v dalším období ve světle provedených prací mělo sledovat:

- Přesnou definici a vývoj cementových materiálů a směsí, které budou finálně použity v hlubinném úložišti, ať už jako konstrukční materiály, materiály inženýrské bariéry

(zátky, betonkontejnery) nebo matrice pro ostatní typy RAO, které budou ukládány do HÚ – propojeno s oblastí 6.2 a s vývojem UOS pro RAO jiné než VJP.

- detailní charakterizaci vybraných cementových materiálů a jejich alterovaných stavů a degradačních produktů.
- interakce s kovovými materiály, a to jak s konstrukčními prvky v případě použití cementových materiálů v konstrukčních částech HÚ, tak s potenciálními RAO z vyřazování JE, ukládanými do cementového prostředí.
- studium vhodných příměsí do cementů (aditiv), zejména organického charakteru, které by mohly výrazně ovlivnit jejich fyzikálně-chemické parametry.
- ozařování cementových vzorků s následným studiem chemicko-fyzikálních parametrů, případně výzkum vlivu karbonatace (práce se starými cementovými materiály).
- pokračování studia vlastností bentonit-cementových směsí jako možného tlumicího materiálu v HÚ, a to v oblasti chemicko-fyzikálních vlastností, geotechniky a struktury – propojeno s oblastí 6.2.

6.4 Řešení úložných vrtů a jejich vliv na vlastnosti obklopujícího horninového prostředí

Řešení úložných vrtů a jejich vlivu na vlastnosti okolního horninového prostředí je oblast, která je úzce spojená s praktickým řešením technologie výstavby HÚ a s ním spojených projektů. Doporučujeme, aby práce směřovaly do samostatných experimentů v pravděpodobném prostředí perspektivního úložiště zejména v případech dalšího rozšiřování podzemních prostor v PVP Bukov a v experimentech doprovázených změnami tepelného zatížení horninového masivu.

Použité metody měření by měly kombinovat měření napětí jak v makroměřítku (3D konvergence díla), středním měřítku i lokálním měřítku, tak aby poskytly relevantní vstupní informace pro konstrukci nezbytných numerických modelů distribuce napěťového pole lokality a jejího navázání na dlouhodobé antropogenní působení.

Z hlediska stanovení EDZ by experimenty měly směřovat do srovnávání interpretovaných výsledků geofyzikálních tomografických metod a výsledky experimentálního zjišťování rozdílů stupně pórovitosti a hydraulických parametrů v oblasti předpokládaného výskytu EDZ ve srovnání s vlastnostmi rostlého masivu dané lokality.

Lze předpokládat, že tyto úlohy budou řešeny v samostatných projektech, propojených i s projekty na charakterizaci horninového prostředí, a to případně i na jednotlivých vybraných lokalitách.

6.5 Chování horninového prostředí

Úlohy, které byly zaměřeny na charakterizaci chování horninového prostředí, byly svázány buď s vývojem metod, charakterizujících stav horninového masivu (viz kap. 4.5.1) nebo využívající možnost pracovat v antropogenních prostorách v hloubce odpovídající HÚ (viz kap.

4.5.2), tj. v PVP Bukov. Lze u nich předpokládat, že se v případě invazivních průzkumných prací na potenciálních vybraných lokalitách pro umístění HÚ přesunou do samostatných projektů, zaměřených na detailní lokální charakterizaci masivu na daném místě.

Pokud se nejdříve zaměříme na PVP Bukov (viz kap. 4.5.2), pak výstupy z charakterizačních prací (metodiky, data) je možno využít jak v budoucích průzkumných pracích na lokalitách, tak při vlastní činnosti v PVP Bukov při plánování, přípravě a vlastní realizaci výzkumných a experimentálních prací (viz kap. 4.5.7; kap. 4.5.8).

- Pro účely navazujících experimentů v podzemní laboratoři Bukov je žádoucí doplnění datové sady petrochemických a mechanických vlastností hornin, a to v celé škále litologického, mineralogického a texturního složení.
- Dále se jeví jako vhodné provedení detailní studie prvků křehké tektoniky (např. analýza mikrofraktur včetně jejich prostorových vztahů) a permanentní monitoring tektonické aktivity.

Pro průzkumné práce na budoucích potenciálních lokalitách pro umístění HÚ jsou klíčové následující aktivity:

- Aktualizace 3D strukturně geologických modelů a hydrogeologických modelů. Lze předpokládat, že tyto postupy se stanou integrovanou součástí průzkumných a charakterizačních prací na zúženém počtu lokalit
- Ke stávajícím datům je nutné realizovat dosud neprovedené invazivní průzkumné práce (hluboké vrty, rýhy apod.) s navazujícím geologickým, strukturním a hydrogeologickým výzkumem a průzkumem doplněným o vhodné metody DPZ a další příbuzné obory
- Aktualizovat stávající 3D hydrogeologické modely lokalit v návaznosti na získaná data z invazivních průzkumných prací, a to i s propojením na vytvoření DFN modelů (viz oblast 6.7) v různých měřítcích (regionální – detailní), v různých principech popisu horninového prostředí (EPM, DFN, kombinovaný, stochastické metody) a validovat je ve více řešitelských týmech
- V souvislosti s komplexním prokazováním bezpečnosti bude nutné postupně do HG simulací zařadit změny faktorů ovlivňujících poměry proudění podzemní vody (změny klimatických poměrů; denudace terénu, změny říční sítě, odvodnění při stavbě a provozu HÚ)
- pro charakterizaci lokality je rovněž zcela nezbytný geochemický model vývoje HÚ v dlouhodobých časových horizontech (zde viz kap. 4.5.9). Vhodné geochemické a retenční vlastnosti horninového masivu potřebné pro splnění bezpečnostních funkcí horninového prostředí jsou jedněmi ze zásadních kritérií pro výběr lokality pro umístění HÚ
- V rámci budoucích prací na lokalitách pro umístění HÚ je nutné vybudovat citlivou lokální seismickou síť, která umožní kontinuální sledování aktuálních vibračních projevů na lokalitě a v jejích blízkém okolí. Pro dobrou lokalizaci zaznamenaných seismických jevů je nutno vytvořit podrobný geologický model prostředí vycházející z geofyzikálních a petrologických studií (viz výše).

Lze předpokládat, že tyto úlohy budou řešeny v samostatných projektech, propojených i s projekty na charakterizaci horninového prostředí, a to případně i na jednotlivých vybraných lokalitách.

6.6 Transport radionuklidů z úložiště

Návrhy prací pro budoucí práce v oblasti transportu radionuklidů je nutno rozdělit na několik oblastí.

6.6.1 Transport radionuklidů v prostředí inženýrských bariér

Studium migrace radionuklidů v tlumících materiálech předpokládá obecně přijatý předpoklad použití bentonitu české provenience (ARP 2011).

Následující činnosti jsou doporučeny pro další období s cílem doplnit informace o transportních vlastnostech inženýrských bariér na bázi bentonitu:

- Zásadní je zajistit dostatečné množství homogenního bentonitového materiálu (zmíněno již v kap. 4.6.5).
- Nastavit postupy vypořádání se s nehomogenitou hustoty a zajistit jeho charakterizaci s co nejmenšími nejistotami, zejména stanovení obsahu jílových minerálů ze skupiny smektitu.
- Sledování vlivu Mg na migrační chování radionuklidů.
- Rozvoj teoretického popisu difúze kationtů i aniontů, jak s ohledem na možnost predikce hodnot charakteristických difúzních koeficientů potřebných pro účely PA, a to jak v případě použití tzv. homogeneous mixture modelu (HMM, Birgersson 2017; ÚJV) či modelu duálního transportu a PhreeqC (KJCH).

Následující činnosti jsou doporučeny pro další období s cílem doplnit informace o transportních vlastnostech inženýrských bariér na bázi cementu:

- Studium jednotlivých čistých fází tvořících cementové materiály (zejména CSH fázi. pro lepší porozumění mechanismům záchytu radioaktivních kontaminantů a také jako vhodný vstup pro modelování rovnováh i transportu).
- Další studium migračního chování současně zvolených i dalších vybraných kontaminantů a stopovačů.
- Vývoj chemismu různých typů vod po interakci s cementovými materiály a vývoj chemismu cementové pórové vody („young cement water“ vs. „equilibrated cement water“) na migrační chování kontaminantů.
- Studium vhodných příměsí do cementů (aditiv).
- Ozařování cementových vzorků s následným studiem vlivu ozáření materiálu na migrační parametry,
- Pokračování studia vlastností bentonit-cementových směsí jako možného tlumícího materiálu v HÚ. Kromě studia chemicko-fyzikálních vlastností by měl další výzkum studovat vlastnosti geotechnické, strukturní a zejména transportní a migrační (tj. sorpci a difúzi) pro vybrané kontaminanty a stopovače.

6.6.2 Transport radionuklidů v prostředí horninového masivu

Studium migrace radionuklidů v horninovém prostředí a jeho modelování by se mělo zaměřit především na přechod do reálného prostředí horninového masivu na vybraných lokalitách (viz kap. 4.6.3).

Stanovení migračních parametrů by se mělo zaměřit na:

- Vývoj transportních modelů, založených na různých konceptech puklinové sítě (EPM, DFN), včetně použití reálných transportních vlastností hornin na lokalitách
- Experimentální laboratorní stanovení migračních vlastností na reálných vzorcích hornin a puklinových výplních z potenciálních lokalit v rámci průzkumných prací s cílem zahrnout tyto hodnoty do bezpečnostního výpočtu s cílem snížení konzervatismu, a to včetně:
 - rozšíření portfolia radionuklidů, o radionuklidy, specifické např. pro odpady z vyřazování JE nebo o aktinidy;
 - provedení sorpčních experimentů s redox senzitivními prvky v podmínkách, odpovídajících podmínkám HÚ (Eh, pH, O₂), tj. např. v anaerobním boxu;
 - definování hraničních podmínek pro migrační procesy (mineralogické složení, Eh, pH, složení roztoku, teplota, CEC); zaměřit sledování směrem např. k tzv. smart K_d konceptu či pravděpodobnostnímu vyhodnocení nejistot migračních vlastností);
 - detailního popisu difúzního procesu pro konzervativní radionuklidy pro reálné vzorky z potenciálních lokalit ČR.
- Migrační experimenty *in-situ*, vč. stanovení hraničních podmínek v horninovém masivu (Eh, pH, vodivost, složení podzemní vody).
- Složení pórové vody krystalických hornin (dlouhodobé odběry *in situ*, modelování).
- Vývoj databázových struktur pro uchování a práce s daty.

6.6.3 Bezpečnostní výpočty

Vývoj a implementace bezpečnostních výpočtů s daty z reálného prostředí lokality Kraví hora prokázaly, že provedení bezpečnostní analýzy na zvolené lokalitě je proveditelné, včetně implementace reálných dat (viz kap. 4.6.10). Na základě těchto prací (Trpkošová et al. 2018b) byla vyslovena následující doporučení ve vztahu k hodnocení bezpečnosti na potenciálních lokalitách:

- zpracování databáze VUP (vlastností, událostí a procesů; v angličtině FEP);
- definice scénářů dlouhodobého vývoje HÚ (hlavní a alternativní), včetně jejich odvození a koncepčního pojetí, příprava vstupních dat a informací z reálného prostředí studovaných lokalit; tj. zaměřit hodnocení na reálné prostředí a data z něj;
- vývoj dílčích modelů (model blízkého pole, model vzdáleného pole, model biosféry) a to s cílem snížení nejistot a konzervatismu, které jsou v současné době s modely spojeny; tvořit modely reálné, nikoli konceptualizované či abstrahované;
- integrace dílčích modelů do komplexního modelu;
- provedení bezpečnostního hodnocení pro vybrané lokality na základě reálných dat;

- rozšířit analýzu nejistot spojených se vstupními předpoklady, vstupními daty, dílčími modely či komplexním modelem jako celkem a specifikovat jejich vliv na výsledné hodnocení.

6.6.4 Validace a verifikace modelů na základě benchmarkových studií v rámci zahraničních platforem

Verifikace transportních modelů, případně modelů T-H-M, slouží především jako součást procesu QA ověření modelů a modelových postupů, které jsou dále uplatnitelné v procesu popisu procesů v rámci fungování barrier HÚ.

V daném případě nelze než doporučit, aby aktivity započaté ať již v rámci platformy GWTFs (viz kap. 4.6.6), či v rámci projektu DECOVALEX (viz kap. 4.6.9) dále pokračovaly s cílem zapojit do těchto aktivit případně i experimenty domácí provenience. Modely vyvinuté nebo zdokonalené v rámci těchto aktivit a ověřené na uvedených experimentech mohou podpořit i efektivnější plánování *in situ* experimentů prováděných SÚRAO.

Případ benchmarku s GRS (viz kap. 4.6.12) jasně ukázal, že podobná diskuze nad modely může přinést i přímý benefit pro český program (oprava chyby v biosférickém modelu v prostředí GoldSim). Obě zúčastněné strany vzájemnou spolupráci doporučují a mají o ni zájem. Na české straně se jako nejpřínosnější jeví pokračování v komunikaci nad modelem biosféry, např. nad BCDEF faktory apod.

6.7 Charakterizace horninového prostředí

Lze předpokládat, že hlavní část prací, zaměřených na charakterizaci horninového prostředí, se v dalším období přesune především na 4 vybrané lokality, jejichž charakterizace, detailní popis, vytvoření HG a transportních modelů budou tvořit podklady pro bezpečnostní hodnocení a následně i pro výběr finální a záložní lokality.

Kromě reálného prostředí potenciálních lokalit se pro vývoj metod charakterizace horninového prostředí nabízí především prostředí podzemní laboratoře Bukov, kde vývoj metod charakterizace, monitoring či studium EDZ tvoří tři samostatné bloky činností, a to (<https://www.pvpbukov.cz/v>

[yzkum/vyzkumny-a-experimentalni-plan/](#)):

1. pilotní charakterizace hornin k ověření metodiky tvorby 3D modelů;
2. testování metod dlouhodobého monitoring;
3. testování vzniku a vývoje poručené zóny v okolí podzemního díla.

Lze předpokládat, že tyto úlohy budou řešeny v samostatných projektech, propojených i s projekty na charakterizaci horninového prostředí, a to případně i na jednotlivých vybraných lokalitách.

6.8 Obecná doporučení

Pro úspěšné pokračování prací směřovaných k bezpečnostnímu hodnocení HÚ je možno na základě získaných zkušeností formulovat několik doporučení směrem do budoucna

- Vzniklý tým dosáhl dnes již know how evropského úrovně a úspěšně se prosazuje i na mezinárodním poli; zachování jeho kontinuity a jeho další vývoj je klíčovým faktorem pro další úspěšné pokračování prací; neopominutelnou součástí je i výchova mladých odborníků a jejich podpora.
- V budoucích projektech by bylo vhodné zlepšit vzájemnou komunikaci a návaznost prací (např. s projekty zaměřenými na projektové řešení či na vývoj technologických či konstrukčních částí HÚ apod.).
- Komunikace na mezinárodní úrovni je velmi významná, nicméně časově náročná.
- Oponentura zpráv (interní, externí) i validace modelových nástrojů jsou nutnou součástí řešení projektu, představují však zvýšenou náročnost, a to především časovou; v případě zapojení externích oponentur výsledků projektu je nutno s tímto faktem počítat.
- Aplikace QA postupů je nevyhnutelnou součástí při koordinaci tak komplexního projektu, jako byl projekt Výzkumná podpora bezpečnostního hodnocení HÚ; plán managementu projektu (Prchal a Scheinherr 2017) ukázal, že nastavený systém managementu kvality byl vhodně zvolen a úspěšně aplikován i na akademické instituce, lze z něho vycházet i pro budoucí projekty.

7 Závěr

Projekt Výzkumná podpora bezpečnostního hodnocení hlubinného úložiště (HÚ) představuje jeden z největších uceleně zaměřených projektů v historii SÚRAO. V letech 2014 - 2020 bylo v řešitelském týmu hlavního dodavatele ÚJV Řež, a.s. a 7 hlavních subdodavatelů (Česká geologická služba, PROGEO, ČVUT, Technická univerzita v Liberci, CVŘ, Ústav geoniky AV, Chemcomex) řešeno 44 dílčích projektů (Zadávacích listů, ZL) za celkové účasti cca 250 odborníků z řady oblastí chování vyhořelého jaderného paliva (VJP) a radioaktivního odpadu (RAO), chování obalových souborů pro VJP a RAO, chování tlumících a výplňových materiálů, řešení úložných vrtů, chování horninového prostředí, transportu radionuklidů z úložiště a výzkumu charakterizace horninového prostředí atd.

Za šest let trvání projektu bylo vydáno téměř 240 průběžných a závěrečných zpráv, z toho 36 v anglickém jazyce, dále mapové podklady, geologické a hydrogeologické modely, odborné publikace, konferenční příspěvky apod. Výsledkem byly samozřejmě i metodiky, vyvinuté zejména s cílem charakterizovat horninové prostředí, soubory dat, které jsou přímo použitelné pro hodnocení bezpečnosti, či validace modelů v mezinárodních benchmarcích. Největší počet ZL i zpráv bylo vydáno v oblasti podpory Chování horninového prostředí, kterou následovala oblast podpory Transport radionuklidů.

Projekt ve svém vývoji více méně sledovat dva hlavní cíle. Za první nejvýznamnější výsledek je možno považovat provedení pilotního bezpečnostního výpočtu s reálnými daty z jedné z potenciálních lokalit pro umístění HÚ (Kraví hora), který prokázal, že v realizačním týmu je dostatek dat, argumentů, znalostí a výpočetních nástrojů, které umožňují provedení bezpečnostní hodnocení na odpovídající úrovni a vyhodnocení legislativně požadované hodnoty pro reprezentativní osoby, žijící na lokalitě. Pro další zúžení počtu lokalit na hlavní a záložní lokalitu v dalším procesu vývoje HÚ je provedení bezpečnostní hodnocení na každé z lokalit, podložené výsledky recentního invazivního průzkumu do předpokládané hloubky HÚ nezbytně nutné.

Druhým významným cílem bylo shromáždění podkladů pro hodnocení vhodnosti 9 potenciálních lokalit pro umístění HÚ pro VJP a RAO z hlediska hodnocení dlouhodobé bezpečnosti. Pro proces zúžení počtu lokalit bylo celkem připraveno 22 zpráv, shrnujících geologické a hydrogeologické charakteristiky, založené na recentních geofyzikálních měřeních, a poznatky o stabilitních charakteristikách a o jevech, které by mohly ovlivnit budoucí antropogenní vstupy do prostor HÚ. Kritéria, popsána a hodnocena v těchto zprávách, a jejich vyhodnocení přímo vstoupily do procesu porovnání potenciálních lokalit a přispěly k předložení návrhu zúžení počtu lokalit na 4, které budou detailně zkoumány v dalším období.

Ukončením projektu Výzkumná podpora bezpečnostního hodnocení HÚ a návrhem zúžení počtu lokalit z 9 na 4 se uzavírá významná etapa v programu vývoje HÚ v ČR. Pro úspěšné pokračování programu je možno doporučit především podporu zachování stávajícího týmu řešitelů, který v současné době dosáhl evropské úrovně, a to především v oblasti vývoje HÚ v krystalických horninách. Nelze opomenout ani výchovu mladé generace, neboť cesta k otevření HÚ v roce 2065 je dlouhá a uchování vědomostí a zkušeností je nutností. Provázanost s dalšími projekty, jako je např. projektové řešení či vývoj technologických komponent je taktéž zcela nevyhnutelné. A konečně – jen zahájení výzkumných a průzkumných prací přímo na lokalitách bude posouvat program vývoje HÚ v ČR do další fáze.

8 Reference

Výstupy jednotlivých ZL jsou uvedeny v daných podkapitolách v kap. 4.

- ANDERSON J., HERMANSSON J., ELERT M., GYLLING B., MORENO L., SELROOS J. O. (1998): Derivation and treatment of the flow wetted surface and other geosphere parameters in the transport models FARF31 and COMP23 for use in safety assesment, Svensk Kärnbränslehantering AB, R-98-60 December 1998.
- ANDERSON J., GRUNDTTEKNIK G., STROM A., SVEMAR CH., ALMÉN 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 – Technical report TR-00-12, SKB, Stockholm, Sweden.
- ARP (2011): VOKÁL A., HAVLOVÁ V., HERCÍK M., LANDA J., LUKIN D., VEJSADA J.: 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. MS ÚJV Řež, a.s. EGP 5014-F-101420, 12/2010.
- BACKERS T., GEIER J., MEIER T. (2018): DECOVALEX 2016-2019: Task G – definition work package 2.2, Document No: SSM2015-554-22, 12 s. SKB. Sweden.
- BAIER J., JANKOVEC J., ČERNÝ M., GVOŽDÍK L., MILICKÝ M., POLÁK M., UHLÍK J. (2020a): Pasport aktualizovaného detailního hydraulického modelu, Lokalita Březový potok. – MS SÚRAO, TZ 470/2020, Praha.
- BAIER J., JANKOVEC J., ČERNÝ M., GVOŽDÍK L., MILICKÝ M., POLÁK M., UHLÍK J. (2020b): Pasport aktualizovaného detailního hydraulického modelu, Lokalita Hrádek. – MS SÚRAO, TZ 469/2020, Praha.
- BEATTIE T., KOWE R., DELAY J., BUCKAU G., DIACONU D. (2015): RD&D Planning Towards Geological Disposal of Radioactive Waste, DELIVERABLE (D-N°: 2.3). Guidance for less – advanced Programmes, Sec IGD2 Project, June 2015.
- BERGER A. (1978): Long-term variations of daily insolation and Quaternary climatic changes. – Journal of the Atmospheric Sciences, 35, 2362–2367.
- BIRGERSSON, M. (2017): A general framework for ion equilibrium calculations in compacted bentonite. Geochim. Cosmochim. Acta 200, 186–200.
- BUKOVSKÁ Z., VERNER K., BURIÁNEK D., DOBEŠ P., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ B., ERBAN V., FRANĚK J., HALODOVÁ P., HOLEČEK J., JAČKOVÁ I., JELÉNEK J., KOPAČKOVÁ V., KOUČKÁ L., LAUFEK F., LNĚNIČKOVÁ Z., KOČERGINA J., MYŠKA O., NAHODILOVÁ R., PERTOLDOVÁ J., RUKAVIČKOVÁ L., SOEJONO I., ŠVAGERA O., VESELOVSKÝ F. (2017): Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov závěrečná zpráva. MS SÚRAO, ZZ 191/2017, SÚRAO, PRAHA.
- CARROLL L.R. (2001): Predicting Long-Lived, Neutron-Induced Activation of Concrete in a Cyclotron Vault, AIP Conference Proceedings 576, 301; doi: <http://dx.doi.org/10.1063/1.1395309>.
- CATLETT K., TAUXE J. (2014): Implementation of Diffusion in GoldSim. – Neptune document system. – JT.
- COMSOL MULTIPHYSICS® v. 5.0.. COMSOL AB, Stockholm, Sweden. [online]. [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: www.comsol.com.
- CRAWFORD J. (2019): Task 9: Increasing the realism in solute transport modelling – modelling the field experiments of REPRO and LTDE-SD – Task Description – 9D1 AND 9D2, SKB TF GWFTS, update 2019-05-06.

- ČERNÍK M., STEINOVÁ J., MIKEŠ J., ŠPAČEK P., DOBREV D., ČERNOUŠEK T., STOULIL J. (2019): Mikrobiální koroze za podmínek hlubinného úložiště pro koncepci ocelový UOS – zhutněný bentonit. – MS SÚRAO ZZ 403/2019, Praha.
- ČERNÝ M., UHLÍK J., MILICKÝ M., GVOŽDÍK L. (2020a): Pasport aktualizovaného detailního hydraulického modelu, Lokalita Magdaléna. – MS SÚRAO, TZ 471/2020, Praha.
- ČERNÝ M., UHLÍK J., MILICKÝ M., GVOŽDÍK L. (2020b): Pasport aktualizovaného detailního hydraulického modelu. Lokalita Čertovka. – MS SÚRAO, TZ 472/2020, Praha.
- ČERVINKA R., GONDOLLI J. (2015): „Projekt UOS č. 14E1054“ – Modelování pórové vody kompaktovaného bentonitu BaM. Revize 1. – Zpráva č. 14407, ÚJV Řež, a. s., Řež.
- ČERVINKA R., GONDOLLI J. (2016): Výběr reprezentativních podzemních vod a příprava jejich syntetických ekvivalentů. – Technická zpráva č. 41/2016, SÚRAO, Praha.
- ČERVINKA, R. (2014): Stanovení kationtové výměnné kapacity (CEC) a výměnných kationtů pomocí metody s Cu(II)triethyltetraminem. Certifikovaná metodika. Č.j. SÚJB/ONRV/15452/2014.
- ČERVINKA, R., KOLOMÁ, K. (2016): Determination of CEC and exchangeable cations on sample B-S-36-3. – MS SÚRAO TZ 39/2016/ENG, Praha.
- ČERVINKA, R., KOLOMÁ, K. (2016): Stanovení CEC a vyměnitelných kationtů na vzorku B-S-36-3. – MS SÚRAO TZ 39/2016, 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.
- DOBREV D., BLAHETA R., HANČILOVÁ I., HASAL M., HOKR M., KAŠPAR V., KOUŘIL M., MICHALEC Z., TRPKOŠOVÁ D., ZUNA M. (2016) Vliv syčení bentonitu na korozi materiálů ukládacího obalového souboru. MS SÚRAO ZZ 72/2016, Praha.
- DOBREV D., KOUŘIL M., A. N. MENDOZA MIRANDA, (2019) Korozní zkouška v alkalickém prostředí, MS SÚRAO, TZ 406/2020, Praha.
- EGP INVEST, spol. s r.o. (2012): Návrh způsobu vyřazování z provozu JE Dukovany, 12/2012.
- 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, ZZ 229/2018, Praha.
- GENS A. (2016): DECOVALEX 2019, Task D: HM and THM Interactions in Bentonite Engineered Barriers (INBEB): STAGE 1: OPERATIONAL PERIOD OF THE EB EXPERIMENT.
- GESH C. J., MCCONN R.J., PAGH R.J., RUCKER R.A., WILLIAMS R.G. (2011): Compendium of Material Composition Data for Radiation Transport Modeling, Washington, D.C. : United States. Dept. of Energy.; Oak Ridge, Tenn.: distributed by the Office of Scientific and Technical Information, U.S. Dept. of Energy, 2011, online http://www.pnnl.gov/main/publications/external/technical_reports/pnnl-15870rev1.pdf, [30-09-2017].
- GOLDSIM (2014): GoldSim Contaminant Transport Module User's Guide. GoldSim Technology Group, version 6.4.
- GONDOLLI J., DOBREV D., KAŠPAR V., KLAJMON M., STOULIL J. (2016): Chování UOS pro VJP a RAO / Korozní produkty – Věcný a časový harmonogram prací řešerše korozních a alteračních procesů na rozhraní železo-jíl. MS SÚRAO TZ 61/2016, Praha.

- GONDOLLI J., ČERVINKA R., DOBREV D., HAVLOVÁ V., HUSTÁKOVÁ H. (2018a): Vlastnosti, události a procesy pro bezpečnostní hodnocení hlubinného úložiště. – MS SÚRAO 330/2018, Praha.
- GONDOLLI J., KLAJMON M., KOUŘIL M. (2018b): Chování UOS pro VJP a RAO/Korozní produkty. Závěrečná zpráva. –MS SÚRAO ZZ 329/2018, Praha.
- GONDOLLI J., DOBREV D., KLAJMON M., ČERNOUŠEK T., KOUŘIL M. (2018c): Chování UOS pro VJP a RAO/Korozní produkty. 3. Průběžná zpráva. – MS SÚRAO TZ 217/2018, Praha.
- GONZÁLEZ SÁNCHEZ, F., VAN LOON, L.R., GIMMI, T., JAKOB, A., GLAUS, M.A., DIAMOND, L.W. (2008): Self-diffusion of water and its dependence on temperature and ionic strength in highly compacted montmorillonite, illite and kaolinite. Appl. Geochem. 23, 3840–3851.
- GUSTAFSON G., LIEDHOLM M. (1989): Groudwater Flow Calculation on a Regional Scale at The Swedish Hard Rock Laboratory. SKB Progress Report 25-88-17, Stockholm.
- GVOŽDÍK L., BUKOVSKÁ Z., GRECKÁ M., JANKOVEC J., KABELÉ P., KRÁLOVCOVÁ J., KRYL J., MARYŠKA J., MILICKÝ M., ŘÍHA J., ŠVAGERA O., TRPKOŠOVÁ D., UHLÍK J., URBAN P., VETEŠNÍK A., ZELINKOVÁ T. (2019): Transport radionuklidů z hlubinného úložiště/testování koncepčních a výpočetních modelů. Závěrečná zpráva. – MS SÚRAO, ZZ 463/2020, Praha.
- HARTLEY L. J. (1998): NAPSAC Release 4.1 Technical Summary Document, AEA-R&R-0271, AEA Technology, 1998.
- HAVLOVÁ V., RUKAVIČKOVÁ L., STAŠ L., PACOVSKÝ J., SOSNA K., HOKR M., ČERNÍK M., ŠPAČEK P., MIKEŠ J., MILICKÝ M. (2015A): Příprava experimentů v PVP Bukov. – MS SÚRAO TZ 06/2015. SÚRAO, Praha.
- HAVLOVÁ V., DOBREV D., VEČERNÍK P., ZUNA M., RUKAVIČKOVÁ L., FRANĚK J., VERNER K., ČERNÍK M., STAŠ L., MILICKÝ M. (2015B): Plán experimentů PVP Bukov pro podporu bezpečnostního rozboru lokality Kraví Hora. – MS SÚRAO TZ 09/2015. SÚRAO, Praha.
- 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., 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., PERTOLDOVÁ J., BUKOVSKÁ Z., HROCH T., ŠTĚDRÁ V., ČERNÝ M., ŘÍHA J., ČERVINKA R. (2018b): Hodnocení vhodnosti lokality pro umístění úložiště VJP a RAO z hlediska dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Březový potok. – MS SÚRAO TZ 276/2018, Praha.
- HAVLOVÁ V., PERTOLDOVÁ J., BUKOVSKÁ Z., HROCH T., ŠTĚDRÁ V., ČERNÝ M., ŘÍHA J., ČERVINKA R. (2018c): Hodnocení vhodnosti lokality pro umístění úložiště VJP a RAO z hlediska dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Čertovka. – MS SÚRAO TZ 277/2018, Praha.
- HAVLOVÁ V., PERTOLDOVÁ J., POLÁK M., HROCH T., ŠTĚDRÁ V., ŘÍHA J., ČERVINKA R., BUKOVSKÁ Z. (2018d): Hodnocení vhodnosti lokality pro umístění úložiště VJP a RAO z hlediska dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Čihadlo. – MS SÚRAO TZ 278/2018, Praha.
- HAVLOVÁ V., PERTOLDOVÁ J., BUKOVSKÁ Z., HROCH T., ŠTĚDRÁ V., JANKOVEC J., ŘÍHA J., ČERVINKA R. (2018e): Hodnocení vhodnosti lokality pro umístění úložiště VJP a RAO z hlediska dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Dukovany-západ (EDU-Z). – MS SÚRAO TZ 279/2018, Praha.
- HAVLOVÁ V., PERTOLDOVÁ J., BUKOVSKÁ Z., UHLÍK J., HROCH T., ŠTĚDRÁ V., ŘÍHA J., ČERVINKA R. (2018f): Hodnocení vhodnosti lokality pro umístění úložiště VJP a RAO z hlediska dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Horka. – MS SÚRAO TZ 280/2018, Praha.

- HAVLOVÁ V., PERTOLDOVÁ J., BUKOVSKÁ Z., BAIER J., HROCH T., ŠTĚDRÁ V., ŘÍHA J., ČERVINKA R. (2018g): Hodnocení vhodnosti lokality pro umístění úložiště VJP a RAO z hlediska dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Hrádek. – MS SÚRAO TZ 281/2018, Praha.
- HAVLOVÁ V., PERTOLDOVÁ J., BUKOVSKÁ Z., HROCH T., ŠTĚDRÁ V., UHLÍK J., ŘÍHA J., ČERVINKA R. (2018h): Hodnocení vhodnosti lokality pro umístění úložiště VJP a RAO z hlediska dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Kraví hora. – MS SÚRAO TZ 282/2018, Praha.
- HAVLOVÁ V., PERTOLDOVÁ J., BUKOVSKÁ Z., ČERNÝ M., HROCH T., ŠTĚDRÁ V., ŘÍHA J., ČERVINKA R. (2018i): Hodnocení vhodnosti lokality pro umístění úložiště VJP a RAO z hlediska dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Magdaléna. – MS SÚRAO TZ 283/2018, Praha.
- HAVLOVÁ V., PERTOLDOVÁ J., HROCH T., ŠTĚDRÁ V., JANKOVEC J., ŘÍHA J., ČERVINKA R. (2018j): Hodnocení vhodnosti lokality pro umístění úložiště VJP a RAO z hlediska dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Temelín-jih (ETE-J). – MS SÚRAO TZ 284/2018, Praha.
- HAVLOVÁ V., PERTOLDOVÁ J., BUKOVSKÝ Z., MIXA P., MILICKÝ M., ŘÍHA J., HROCH T., ŠTĚDRÁ V., ČERVINKA R. (2018k): Hodnocení vhodnosti lokalit pro umístění hlubinného úložiště VJP a RAO z hlediska dlouhodobé bezpečnosti. – MS SÚRAO TZ 313/2018. Praha.
- HAVLOVÁ V., TRTÍLEK R., RATAJ J. (2018l): Normalizované vyhodnocení vhodnosti lokalit pro umístění hlubinného úložiště VJP a RAO z hlediska dlouhodobé bezpečnosti. – MS SÚRAO TZ 327/2018. 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., JANKOVEC J., JELÉNEK 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, Praha.
- HAVLOVÁ V., PERTOLDOVÁ J., MIXA P., HROCH T., ŠTĚDRÁ V., ČERNÝ M., POLÁK M., MILICKÝ M., BAIER J., DUŠEK K., FIFERNOVÁ M., FRANĚK J., GVOŽDÍK L., HOLEČEK J., JANKOVEC J., JELÉNEK J., JELÍNEK J., KACHLÍKOVÁ R., KUČERA R., KÚRKOVÁ I., PETYNIÁK O., RAPPRIČH V., RUKAVIČKOVÁ L., ŠVAGERA O., UHLÍK J., VOJTĚCHOVÁ H., ŽÁČEK V., ŽÁČKOVÁ E. (2020b): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Čertovka. – MS SÚRAO, TZ 448/2020, Praha.
- HAVLOVÁ V., PERTOLDOVÁ J., MIXA P., POLÁK M., ČERNÝ M., MILICKÝ M., HROCH T., ŠTĚDRÁ V., BAIER J., DUDÍKOVÁ B., H., DUŠEK K., FRANĚK J., GVOŽDÍK L., HEJTMÁNKOVÁ P., HOLEČEK J., JANKOVEC J., JELÉNEK J., JELÍNEK J., KACHLÍKOVÁ R., KUČERA R., KUNCEOVÁ E., NÝVLT D., PETYNIÁK O., RAPPRIČH V., RUKAVIČKOVÁ L., ŠVAGERA O., UHLÍK J., VERNER K., VOJTĚCHOVÁ H., (2020c): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Čihadlo. – MS SÚRAO, TZ 449/2020, Praha.
- HAVLOVÁ V., PERTOLDOVÁ J., MIXA I., HROCH T., ŠTĚDRÁ V., JANKOVEC J., MILICKÝ M., BAIER J., BUKOVSKÁ Z., DUŠEK K., FRANĚK J., HANŽL P., HOLEČEK J., HRDLIČKOVÁ K., JELÉNEK J., JELÍNEK J., KACHLÍKOVÁ R., KRYŠTOFOVÁ E., KUČERA R., KUNCEOVÁ E., PETYNIÁK O., RUKAVIČKOVÁ L., SEDLÁČKOVÁ I., SOEJONO I., ŠÍR P., ŠVAGERA O., ŽÁČKOVÁ E., VOJTĚCHOVÁ H., UHLÍK J., GVOŽDÍK L. (2020d): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita EDU-západ. – MS SÚRAO, TZ 450/2020, Praha.
- HAVLOVÁ V., PERTOLDOVÁ J., MIXA P., ČERNÝ M., POLÁK M., MILICKÝ M., HROCH T., ŠTĚDRÁ V.,
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 POLÁK M., V., RAPPRIČH V., ŘIHOŠEK J., RUKAVIČKOVÁ L., ŠVAGERA O., VOJTĚCHOVÁ H., ŽÁČKOVÁ E. (2020e): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita ETE-jih. – MS SÚRAO, TZ 449/2020, Praha.
- HAVLOVÁ V., PERTOLDOVÁ J., MIXA P., HROCH T., ŠTĚDRÁ V., UHLÍK J., JANKOVEC J., MILICKÝ M., BAIER J., BURIÁNEK D., DUDÍKOVÁ B., DUŠEK K., FRANĚK J., GVOŽDÍK L., HEJTMÁNKOVÁ P., HOLEČEK J., JELÉNEK J., JELÍNEK J., KACHLÍKOVÁ R., KUČERA R., KUNCEOVÁ E., PETYNIÁK O., POLÁK M., RAPPRIČH V., RUKAVIČKOVÁ L., ŠVAGERA O., VERNER K., VOJTĚCHOVÁ H. (2020f): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Horka. – MS SÚRAO, TZ 452/2020, Praha.
- HAVLOVÁ V., PERTOLDOVÁ J., MIXA P., HROCH T., ŠTĚDRÁ V., BAIER J., MILICKÝ M., BUKOVSKÁ Z., ČERNÝ M., DUDÍKOVÁ B., DUŠEK K., FRANĚK J., GVOŽDÍK L., HOLEČEK J., JANKOVEC J., JELÍNEK J., KACHLÍKOVÁ R., KUČERA R., KUNCEOVÁ E., PETYNIÁK O., POLLÁK M., RAPPRIČH V., RUKAVIČKOVÁ L., ŠVAGERA O., UHLÍK J., VOJTĚCHOVÁ H., ŽÁČKOVÁ E. (2020g): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Hrádek. – MS SÚRAO, TZ 453/2020, Praha.
- HAVLOVÁ V., PERTOLDOVÁ J., MIXA P., HROCH T., ŠTĚDRÁ V., UHLÍK J., JANKOVEC J., MILICKÝ M., BURIÁNEK D., BUKOVSKÁ Z., DUŠEK K., FRANĚK J., HOLEČEK J., JELÍNEK J., KACHLÍKOVÁ R., KRYŠTOFOVÁ E., KUČERA K., KUNCEOVÁ E., PEŘESTÝ V., PETYNIÁK O., RAPPRIČH V., RUKAVIČKOVÁ L., ŠVAGERA O., VOJTĚCHOVÁ H. (2020h): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Kraví hora. – MS SÚRAO, TZ 455/2020, Praha.
- HAVLOVÁ V., PERTOLDOVÁ J., MIXA P., ČERNÝ M., POLÁK M., MILICKÝ M., HROCH T., ŠTĚDRÁ V., BAIER J., BUKOVSKÁ Z., DUDÍKOVÁ B., DUDKOVÁ I., DUŠEK K., FRANĚK J., GVOŽDÍK L., HOLEČEK J., JANKOVEC J., JELÉNEK J., JELÍNEK J., KACHLÍKOVÁ R., KUČERA R., KUNCEOVÁ E., PACHEROVÁ P., PETYNIÁK O., RAPPRIČH V., RUKAVIČKOVÁ L., ŠÍR P., ŠVAGERA O., UHLÍK J., VOJTĚCHOVÁ H. (2020i): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Magdaléna. – MS SÚRAO, TZ 455/2020, Praha.
- HELLMUTH K.H., SIITARI-KAUPPI M., LINDBERG A. (1993:)). STUDY OF POROSITY AND MIGRATION PATHWAYS IN CRYSTALLINE ROCKS BY IMPREGNATION WITH ¹⁴C-POLYMETHYLMETHACRYLATE. J. CONTAM. HYDROL. 13, 403–418.
- HOFMANOVÁ E., ČERVINKA R., VOPÁLKA D., BABOROVÁ L., BRÁZDA L., PECKOVÁ A., VETEŠNÍK A., VIGLAŠOVÁ E., VAŠIČEK R. (2019): Transport radionuklidů z úložiště / vstupní parametry a procesní modely pro hodnocení transportu radionuklidů přes inženýrské bariéry: Závěrečná zpráva. – MS SÚRAO ZZ 420/2019, Praha.
- HOKR, M. ET AL. (2014): Tunel 2011, Závěrečná zpráva, SÚRAO, 2014, 166 s.
- HOKR M., RUKAVIČKOVÁ L., HAVLOVÁ V. A KOLEKTIV (2018): Vývoj a ověřování metodik pro charakterizaci horninového prostředí – výsledky monitoringu v přivaděči Bedřichov. – MS SÚRAO ZZ 289/2018, Praha.
- HOKR M., TRPKOŠOVÁ D., VETEŠNÍK A., ŘIHA J., HAVLOVÁ V., VOPÁLKA D., GVOŽDÍK L. (2020): Testování transportních modelů s využitím *in-situ* zahraničních experimentů. – MS SÚRAO, ZZ 480/2020, Praha.
- HROCH T. A PAČES T., HOŠEK, J., ŠEBESTA, J. (2015a): Erozní stabilita lokalit. Průběžná zpráva zpráva. – MS SÚRAO TZ 25/2015 Praha.
- HROCH T. A PAČES T., HOŠEK, J., NÝVL, D., ŠEBESTA, J., HEJTMÁNKOVÁ, P. (2015b): Erozní stabilita lokalit. Závěrečná zpráva. – MS SÚRAO ZZ 25/2015, Praha.

- HUŠŤÁKOVÁ H. (2018): Biosférický model a parametry pro výpočet transportu radionuklidů na lokalitě Kraví hora. – MS SÚRAO ZZ 218/2018 Praha.
- CHOI J. W., OSCARSON D. W. (1996): Diffusive transport through compacted Na- and Ca-bentonite. *Journal of Contaminant Hydrology*, 22, 189–202.
- IAEA (2011A): Safety Standards, Disposal of Radioactive Waste, Specific Safety Requirements, No. SSR- 5, IAEA, Vienna 2011.
- IAEA (2011b): Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste. - IAEA Specific Safety Guide No. SSG-14, IAEA, Vienna, 2011, ISBN 978–92–0–111510–2.
- IAEA (2012): Safety Standars, The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Wastem Specific Safety Guide, No. SSG-23, IAEA, Vienna 2012.
- IGD-TP Strategic Research Agenda (SRA), July 2011, ISBN 978-91-979786-0-6.
- JAEA (2018): Rock and Groundwater Data [online]. Japan Atomic Energy Agency, 2018 [cit. 30. 6. 2018]. Dostupné z: <https://www.jaea.go.jp/04/tono/miu/dataset/greet/greet.html>.
- JANKOVEC J., MILICKÝ M., GVOŽDÍK L., POLÁK M., UHLÍK J., ČERNÝ M., ZEMAN O., BAIER J. (2020): Pasport aktualizovaného detailního hydraulického modelu. Lokalita Na Skalním. – MS SÚRAO, TZ 473/2020, Praha.
- JANKOVEC J., UHLÍK J., ČERNÝ, M. (2020): Pasport aktualizovaného detailního hydraulického modelu. Lokalita ETE-jih. – MS SÚRAO, TZ 474/2020, Praha.
- JOUZEL J., BARKOV N.I., BARNOLA J.M, BENDER M., CHAPPELLAZ J., GENTHON C., KOTLYAKOV V.M., LORIUS C., PETIT J.R., RAYNAUD D., RAISBECK G., RITZ C., SOWERS T., STIEVENARD M., YIOU F., YIOU P. (1993): Extending the Vostok icecore record of paleoclimatic to the penultimate glacial period. – *Nature*, 364, 407–412
- KABELE P., ŠVAGERA O., SOMR M., NEŽERKA V., ZEMAN J., BUKOVSKÁ Z., FRANĚK J., JELÍNEK J., SOEJONO I. (2018): Mathematical modeling of brittle fractures in rock mass by the mean of DFN method. – MS SÚRAO Technical report no. TZ 286/2018. SÚRAO.
- KALÁB Z., JECHUMTÁLOVÁ Z. LEDNICKÁ M., ŠILENÝ J. (2015) Seismicita na území ČR a v příhraničních oblastech. Závěrečná zpráva. – MS SÚRAO ZZ 26/2015, 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.
- KLOMÍNSKÝ J. A KOLEKTIV (2008): Studium dynamiky puklinové sítě granitoidů ve vodárenském tunelu Bedřichov v Jizerských horách. - Závěrečná zpráva, 171 s. – MS SÚRAO, Archiv ČGS, ČGS-Geofond.
- KONCEPCE NAKLÁDÁNÍ S RADIOAKTIVNÍMI ODPADY A VYHOŘELÝM JADERNÝM PALIVEM V ČESKÉ REPUBLICE (2019), schválená 26. srpna usnesením vlády České republiky č. 597/2019.
- KOŠŤÁK B. (1969): A new device for in situ movement detection and measurement. – *Exp. Mech.*, 9, 374–379.
- KRÁSNÝ J., KNĚŽEK M., ŠUMOVÁ A., DAŇKOVÁ H., MATUŠKA M., HANZEL V. (1982): Odtok podzemní vody na území Československa. Český hydrometeorologický ústav. Praha.
- KUKLEVA E., KOZEMPEL J., VLK M., MIČOLOVÁ P., VOPÁLKA D. (2015): Preparation of ²²⁷Ac/²²³Ra by neutron irradiation of ²²⁶Ra. *J Radioanal Nucl Chem* 304, 263–266.
- LANDA J., TRPKOŠOVÁ D., VETEŠNÍK A. (2013): Tvorba celkového robustního modelu hodnocení bezpečnosti úložiště a aplikace modelu. Projekt MPO TIP T11/362, ÚJV Řež, a. s.
- LANDA J., TRPKOŠOVÁ D., HAVLOVÁ V., GONDOLLI J. (2015): Analýza stávajícího modelu hlubinného úložiště. – MS SÚRAO, TZ 8/2015. Praha.
- LÖFGREN M., NILSSON K. (2015): Task 9: Increasing the realism in solute transport modelling – modelling the field experiments of REPRO and LTDE-SD, Task description – 9B-1, SKB TF GWFTS, 2015-11-26.

- LÖFGREN M., ANDERSSON P., NILSSON K. (2017): Task 9: Increasing the realism in solute transport modelling – modelling the field experiments of REPRO and LTDE-SD, Task description – 9C, SKB TF GWFTS, 2017-.11-14.
- 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.
- MARYŠKA J., BLAHETA R., HOKR M., ŘÍHA J., ET AL. (2018): Development and verification of modelling method for THMC processes within the international project DECOVALEX 2019 - Final report. – MS SÚRAO ZZ 298/201 Praha.
- MELNYK T. W., SKEET A. (1986): AN IMPROVED TECHNIQUE FOR DETERMINATION OF ROCK POROSITY. *CAN. J. EARTH SCI.* 23, 1068-1074.
- MENDOZA MIRANDA A. N. (2017): Gas generation and migration in clay media as a result of anaerobic steel corrosion. – MS SÚRAO TZ 187/201878/ENG, Praha.
- 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. A FRANĚK J. ET AL. (2019): Aktualizace a konkretizace projektu průzkumných prací na hypotetické lokalitě. – MS SÚRAO, Technická zpráva, 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.
- MIXA P. A SKÁCELOVÁ Z., PERTOLDOVÁ J., BUKOVSKÁ Z., BURIÁNEK D., DUDÍKOVÁ B., FRANĚK J., HRDLIČKOVÁ K., NAHODILOVÁ R., SOEJONO I., VERNER K., ŽÁČEK V., JELÍNEK J., PETYNYIAK O., RUKAVIČKOVÁ L., KRYŠTOFOVÁ E., KŮRKOVÁ I., HOLEČEK J., ŘIHOŠEK J., GRUNDLOCH J., PACHEROVÁ P., KOLEJKA V., HUDEČKOVÁ E., JELÉNEK J., PECINA V., KRYL J., ŠVAGERA O., GILÍKOVÁ H., LOJKA R., PEŘESTÝ V., VOREL T., KNOTEK J., MÜLLEROVÁ P., HEJTMÁNKOVÁ P., KUNCEOVÁ E., ZEMKOVÁ M., KARENOVÁ J., FIFERNOVÁ M., AMBROZEK V., HÁJEK T., ŽÁČKOVÁ E., ZELINKOVÁ T., KUČERA R. (2020): Aktualizace 3D strukturně geologických modelů potenciálních lokalit hlubinného úložiště radioaktivních odpadů. Verze 1.2., 841 s., – MS SÚRAO ZZ 500/2020, Praha.
- National Ready Mixed Concrete Association (2017): Technology in Practice 13, Chloride Limits in Concrete, online: <http://www.nrmca.org/aboutconcrete/downloads/Tip13.pdf>.
- NOSECK U., BECKER D., SCHNEIDER A., HUSTÁKOVÁ H., HAVLOVÁ V., VETEŠNÍK A., UHLÍK J. (2020): Benchmark studies with GRS. – MS SÚRAO, ZZ 486/2020/ENG, Praha.
- 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.
- NÝVLT D., DOBROVOLNÝ P. (2015): Klimatická stabilita území – závěrečná zpráva. – MS SÚRAO TZ 5/2015, Praha.
- PERTOLDOVÁ J., MIXA P., BUKOVSKÁ Z., BURIÁNEK D., DUDÍKOVÁ B., FRANĚK J., HRDLIČKOVÁ K., NAHODILOVÁ R., SOEJONO I., VERNER K., ŽÁČEK V., PETYNYIAK O., KUČERA R., ŽÁČKOVÁ E., FIFERNOVÁ M., ZEMKOVÁ M. (2019): Lokalizace perspektivních území pro geologické charakterizační práce a perspektivních území pro projektové práce HÚ. Důvodová zpráva. – MS SÚRAO, TZ 446/2020, Praha.
- PETIT J. R., et al. (1999): Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice-core, Antarctica, *Nature*, 399, 429–436.

- POLÁK M., GVOŽDÍK L., MILICKÝ M., UHLÍK J. (2020): Pasport aktualizovaného detailního hydraulického modelu. Lokalita Čihadlo. – MS SÚRAO, TZ 475/2020, Praha.
- POSIVA (1996): Interim report on safety assessment of spent fuel disposal TILA96. Helsinki, Finland: Posiva Oy. POSIVA 96-17.
- POSIVA (2000): Disposal of spent fuel in Olkiluoto bedrock – Programme for research, development and technical design for the pre-construction phase, Working report: Posiva Oy, POSIVA REPORT 2000-14, 147 pages, in English ISBN 951-652-100-2, December 2000.
- POSPÍŠKOVÁ I., VOKÁL A., VONDROVIC L. A KOL. (2015): Střednědobý plán výzkumu a vývoje pro potřeby umístění hlubinného úložiště v ČR 2015–2025. – MS SÚRAO, TZ 01/2015, Praha.
- PRCHAL K. A SCHEINHERR A. (2017): Plán managementu projektu „Výzkumná podpora pro bezpečnostní hodnocení hlubinného úložiště“. Řízený dokument PL 2400 007, rev. 07, ÚJV Řež, a.s., 2017.
- PRCHAL K., HAVLOVÁ V., TRTÍLEK R. (2020): Koordinace a management – závěrečná zpráva. – MS SÚRAO ZZ 458/2020, Praha.
- PUSCH, R. (2006): Mechanical properties of clays and clay minerals in Bergaya, F., Theng, B.K.G., Lagaly, G., editors, (2006): Handbook of Clay Science. Elsevier Ltd. 1246 s.
- RATAJ J., FRÝBORT J., HERALTOVÁ L., FEJT F. (2015a): Rešerše složení a geometrie analyzovaných palivových souborů. - MS SÚRAO TZ 7/2015, Praha.
- RATAJ J., FRÝBORT J., HERALTOVÁ L., FEJT F. (2015b): Databáze VJP pro bezpečnostní rozborů. – MS SÚRAO TZ 28/2017, Praha.
- ROSENDORF T., HOFMANOVÁ E., VOPÁLKA D., VETEŠNÍK A., ČERVINKA R. (2018): Comparative study of HTO diffusion on individual and coupled systems of compacted bentonite and fresh ordinary Portland cement paste, Applied Geochemistry, 97, 102-108.
- ŘÍHA J., UHLÍK J., GRECKÁ M., MARYŠKA J., KRÁLOVCOVÁ J., ČERNÝ M., GVOŽDÍK L., POLÁK M., MILICKÝ M., BAIER J., TRPKOŠOVÁ D., HAVLOVÁ V. (2018): Transportní modely – závěrečná zpráva. – MS SÚRAO, TZ 324/2018, Praha.
- SKB (2008): Site description of Forsmark at completion of the site investigation phase. SDM-Site Forsmark. SKB TR-08-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SOLER J., NERETNIEKS I., MORENO L., LIU L., MENG S., SVENSSON S., TRINCHERO T., IRAOLA A., EBRAHIMI H., MOLINERO J., VIDSTRAND P., DEISSMANN G., ŘÍHA J., HOKR M., VETEŠNÍK A., VOPÁLKA D., GVOŽDÍK L., POLÁK M., TRPKOŠOVÁ D., HAVLOVÁ V., PARK D.-H., JI S-H., TACHI Y., ITO T. (2020): Predictive modelling of a simple field matrix diffusion experiment. Is it so straightforward?, Submitted to Hydrogeology Journal.
- SOLER J., NERETNIEKS I., MORENO L., LIU L., MENG S., SVENSSON S., TRINCHERO T., IRAOLA A., EBRAHIMI H., MOLINERO J., VIDSTRAND P., DEISSMANN G., ŘÍHA J., HOKR M., VETEŠNÍK A., VOPÁLKA D., GVOŽDÍK L., POLÁK M., TRPKOŠOVÁ D., HAVLOVÁ V., PARK D.-H., JI S-H., TACHI Y., ITO T. (2019): Evaluation and modelling report of Task 9A based on comparisons and analyses of predictive modelling results for the REPRO WPDE experiments, SKB Report R-17-10, Jan 2019.
- SOMR M., NEŽERKA V., KABELE P., ŠVAGERA O. (2016): Review of discrete fracture network modeling. – MS SÚRAO. TZ 74/2016, Prague.
- STEINOVÁ J., BURKARTOVÁ K., MIKEŠ J., ZUNA M., ČERNÍK M. (2019): Mikrobiální screening PVP Bukov a dolu Rožná. Závěrečná zpráva projektu. – MS SÚRAO ZZ 382/2019, Praha.
- SVOBODA K., ŠÍR D., BURIAN P., MILER V., MATĚCHA J., POŠVAŘ R., TRTÍLEK R. (2017): Charakterizace RAO nepřijatelného do přípovrchového úložiště z vyřazování jaderné elektrárny – biologické stínění reaktoru. – MS SÚRAO ZZ 203/2017 Praha.

- ŠANDA M. (edit.) (2013): Assessment of recharge dynamics in sedimentary and fractured granitic structures of catchments in the northern Czech Republic, using the Tritium-Helium-3 Dating Technique, Progress Report for the Research Contract-16335 (Dec 11th 2012 – Dec 10th 2013), 2013.
- ŠVAGERA O., BUKOVSKÁ Z., FRANĚK J., JELÍNEK J., SOEJONO I. (2017): Metodika dokumentace výchozových partií pro účely DFN modelování. – MS SÚRAO. Technická zpráva, Praha.
- TOUŠ M., ČUBOVÁ K., OTCOVSKÝ T., HEJNÝ J., KRÍŽ P., PODLAHA J., TRTÍLEK R., HAVLOVÁ V., JOHN J., NĚMEC M. (2017): Inventarizace RAO nepřijatelných do přípovrchových úložišť. – MS SÚRAO TZ 201/2017, Praha.
- TOUŠ M., HAVLOVÁ V., ČUBOVÁ K. (2018): Inventarizace RAO nepřijatelných do přípovrchových úložišť. – MS SÚRAO ZZ 230/2018, SÚRAO, Praha.
- TRPKOŠOVÁ D., HAVLOVÁ V., HUSŤÁKOVÁ H. (2016): Aktualizace integrovaného, transportního modelu pro hodnocení dlouhodobé bezpečnosti. – MS SÚRAO, ZZ 44/2016. Praha.
- TRPKOŠOVÁ D., HUSŤÁKOVÁ H., DOBREV D., HAVLOVÁ V., BUKOVSKÁ Z., FRANĚK J., RATAJ J., FEJT F., VETEŠNÍK A., BABOROVÁ L., VOPÁLKA D., POLÁK M., UHLÍK J., GVOŽDÍK L., ČERNÝ M., KRÁLOVCOVÁ J., ŘÍHA J., BŘEZINA J. (2017a): Shrnutí modelů a parametrů potřebných pro výpočet transportu radionuklidů na lokalitě Kraví hora. – MS SÚRAO TZ 189/2017, Praha.
- TRPKOŠOVÁ D., HAVLOVÁ V., BUKOVSKÁ Z., FRANĚK J., RATAJ J., FRÝBORT J., KOBYLKA D., LOSA E., FEJT F., VOPÁLKA D., BABOROVÁ L., ŠTAMBERG K., VETEŠNÍK A., VANĚČEK V., UHLÍK J., GVOŽDÍK L., MILICKÝ M., POLÁK M., KRÁLOVCOVÁ J., ŘÍHA J., MARYŠKA J. (2017b): Shrnutí procesních modelů lokality Kraví hora a aktualizace parametrů komplexního modelu. – MS SÚRAO TZ 200/2017 Praha.
- TRPKOŠOVÁ D., HAVLOVÁ V., DOBREV D., HUSŤÁKOVÁ H., GONDOLLI J., KLAJMON M., MENDOZA MIRANDA A. N., 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., VOKÁL A. (2018): Bezpečnostní rozbor dlouhodobé bezpečnosti hlubinného úložiště na lokalitě Kraví hora. – MS SÚRAO TZ 274/2018, 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. (2018b): Bezpečnostní rozbor dlouhodobé bezpečnosti hlubinného úložiště na lokalitě Kraví hora. – MS SÚRAO ZZ 334/2018 Praha.
- TUL (2016): Flow123d version 1.8.3, Documentation of file formats and brief user manual, NTI TUL, Online: <http://flow123d.github.io/>.
- UHLÍK J., MILICKÝ M., GVOŽDÍK L., POLÁK M., ČERNÝ M., KRÁLOVCOVÁ J., GRECKÁ M., RUKAVIČKOVÁ L. (2018): Detailní hydrogeologické modely lokalit. Závěrečná zpráva – MS SÚRAO ZZ 323/2018, Praha.
- UHLÍK J., JANKOVEC J., GVOŽDÍK L., MILICKÝ M. (2020a): Pasport aktualizovaného detailního hydraulického modelu. Lokalita Horka. – MS SÚRAO TZ 476/2020, Praha.
- UHLÍK J., JANKOVEC J., GVOŽDÍK L., MILICKÝ M. (2020b): Pasport aktualizovaného detailního hydraulického modelu, Lokalita Kraví hora. – MS SÚRAO, TZ 477/2020, Praha
- VAŠIČEK R., HOFMANOVÁ E., SVOBODA J., ČERVINKA R. (2019): Geotechnická charakterizace homoionních forem bentonitu BCV 2017. Závěrečná zpráva – Samostatná příloha. SÚRAO TZ 425/2019, Praha.
- UHLÍK J., KRÁLOVCOVÁ J., BAIER J., MILICKÝ M., GVOŽDÍK L., CHUDOBA J., ŘÍHA J., RUKAVIČKOVÁ L. (2018): Hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště. Pasport detailního modelu – lokalita Kraví hora. – MS SÚRAO TZ 336/2018, Praha.

- VEČERNÍK P., HOFMANOVÁ E., PECKOVÁ A., KAŠPAR V., TRPKOŠOVÁ D. (2017A): Vývoj aparatur pro charakterizaci inženýrských bariér hlubinného úložiště radioaktivních odpadů a vyhořelého jaderného paliva – Průběžná zpráva projektu za rok 2017. ÚJV zpráva 14671, ÚJV Řež.
- VEČERNÍK P., DRTINOVÁ B., BÁRTA J., BRÁZDA L., HAVLOVÁ V., KITNEROVÁ J., KOLOMÁ K., ROSENDORF T., VOPÁLKA D. (2017B): Transportní vlastnosti cementových materiálů – průběžná výzkumná zpráva III, Technická zpráva číslo 209/2017, SÚRAO/ÚJV Řež, a. s., Praha.
- VEČERNÍK P., DRTINOVÁ B., BRÁZDA L., HAVLOVÁ V., KAŠPAR V., KITNEROVÁ J., ŠUSTKOVÁ E., VOPÁLKA D. (2019a): Transportní vlastnosti cementových materiálů – průběžná zpráva IV. – MS SÚRAO TZ 365/2019, Praha.
- VEČERNÍK P., BRÁZDA L., HAVLOVÁ V., GALEKOVÁ E., HOFMANOVÁ E., KAŠPAR V. (2019b): Transportní vlastnosti cementových materiálů – průběžná zpráva V. – MS SÚRAO TZ 428/2019, Praha.
- VEČERNÍK P., DRTINOVÁ B., BÁRTA, J., BRÁZDA L., GALEKOVÁ E., HAVLOVÁ V., HOFMANOVÁ E., KAŠPAR V., KITNEROVÁ J., KOLOMÁ K., ROSENDORF, T., VOPÁLKA D. (2019c): Transportní vlastnosti cementových materiálů – závěrečná zpráva. – MS SÚRAO ZZ ZZ 430/2019, Praha.
- 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.
- VILKS P., YANG T. (2018): Sorption of selected radionuclides on sedimentary rocks in saline conditions—updated sorption values. NWMO report, TR-2018-03, Kanada, 165 s.
- VOKÁL A., LAHODOVÁ Z. ET AL (2018): Hodnocení lokalit pro umístění HÚ z hlediska bezpečnosti. – MS SÚRAO TZ 320, Praha.
- VOKÁL A., POSPÍŠKOVÁ I., VONDROVIC L., KOVÁČIK M., STEINEROVÁ L. (2017): Požadavky, indikátory vhodnosti a kritéria výběru lokalit pro umístění hlubinného úložiště. Metodický pokyn SÚRAO MP 22, SÚRAO, Praha.
- VONDROVIC L., AUGUSTA J., VOKÁL A., HAVLOVÁ V., KONOPÁČOVÁ K., LAHODOVÁ Z., POPELOVÁ E., URÍK J., BUKOVSKÁ Z., BUTOVIČ A., FRANĚK J., HROCH T., JELÍNEK J., KOBYLKA D., KRAJÍČEK J., MILICKÝ M., MIXA P., PERTOLDOVÁ J., SKOŘEPA Z., ŠTĚDRÁ V., ŠVAGERA J., UHLÍK J., ZAHRADNÍK O. (2019): Metodika zúžení počtu lokalit pro hlubinné úložiště v ČR v letech 2019–2020. – MS SÚRAO TZ 423/2019, Praha.
- VONDROVIC L., AUGUSTA J., VOKÁL A., HAVLOVÁ V., KONOPÁČOVÁ K., LAHODOVÁ Z., POPELOVÁ E., URÍK J., BUKOVSKÁ Z., BUTOVIČ A., FRANĚK J., HROCH T., JELÍNEK J., KOBYLKA D., KRAJÍČEK J., MILICKÝ M., MIXA P., PERTOLDOVÁ J., SKOŘEPA Z., ŠTĚDRÁ V., ŠVAGERA J., UHLÍK J., ZAHRADNÍK O. (2020): Výběr potenciálních lokalit hlubinného úložiště v ČR pro navazující etapu prací po roce 2020. – MS SÚRAO TZ 465/2020, Praha.
- VEČERNÍK P., DRTINOVÁ B., ADAM R., BABOROVÁ L., BRÁZDA L., FILIPSKÁ H., HAVLOVÁ V., KITNEROVÁ J., KOZEMPEL J., PODOJIL A., VOPÁLKA D., ZAVADILOVÁ A. (2016a): Transportní vlastnosti cementových materiálů. – MS SÚRAO TZ 42/2016, Praha.

WWW stránky:

<http://www.czechgeo.cz>

<https://www.GoldSim.com>

 SÚRAO	Závěrečná zpráva projektu Výzkumná podpora pro bezpečnostní hodnocení HÚ	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 462/2020


<https://www.pvpbukov.cz/o-pvp-bukov/>

<http://www.seismicportal.eu>

Zákony:

Zákon č. 263/2016 Sb., Atomový zákon.

Vyhláška č. 422/2016 Sb., o radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje.

 SÚRAO	Závěrečná zpráva projektu Výzkumná podpora pro bezpečnostní hodnocení HÚ	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 462/2020

9 Příloha 1 Seznam vydaných zadávacích listů

Chování VJP a forem RAO, nepřijatelných do přípovrchových úložišť, v prostředí hlubinného úložiště

Databáze VJP pro bezpečnostní rozbor (PB-2014-ZL-S2565-005-DatabazeVJP)

Chování VJP a forem RAO nepřijatelných do přípovrchových úložišť v prostředí HÚ /Vlastnosti RAO nepřijatelných do přípovrchových úložišť (PB-2015-ZL-S0945-018-CharakterizaceRAO)

Charakterizace RAO nepřijatelného do přípovrchového úložiště z vyřazování jaderné elektrárny – biologické stínění reaktoru (PB-2016-ZL-S4289-035-BiologStineni)

Chování ukládacích obalových souborů (UOS) VJP a RAO v prostředí hlubinného úložiště

Mikrobiální koroze (PB-2015-ZL-S1411-020-MIC)

Korozní produkty (PB-2016-ZL-S0145-025-Korozni Produkty)

Experimenty s materiály UOS pro bezpečnostní rozbor (PB-2015-ZL-S1392-021-ExperimentyUOS)

Test omezení koroze UOS využitím drenážní vrstvy v úložných vrtech (PB-2016-ZL-S0578-026-TestDrenazi)

Chování tlumících, výplňových a dalších konstrukčních materiálů v prostředí hlubinného úložiště

Verifikace metodiky pro stanovení kationtové výměnné kapacity bentonitu (metoda Cu-trien) (PB-2015-ZL-S1307-019-CECBentonit)

Experimentální hodnocení plynopropustnosti inženýrských bariér hlubinného úložiště (PB-2017-ZL-U3831-036-Plynopropustnost)

Provedení předběžného výpočtu tlaku na UOS (PB-2017-ZL-S1937-Tlak_kontejneru)


Řešení úložných vrtů a jejich vliv na vlastnosti obklopujícího horninového prostředí

Vznik a monitoring EDZ při výstavbě PVP Bukov (PB-2015-ZL-S1894-023-BukovEDZ)

Chování horninového prostředí

Studium napjatosti v horninách (PB-2014-ZL-S2302-002-LASMO)

Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov (PB-2014-ZL-S2304-004-Bukov)

 SÚRAO	Závěrečná zpráva projektu Výzkumná podpora pro bezpečnostní hodnocení HÚ	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 462/2020

Expertní odhady dlouhodobé stability horninového prostředí / Erozní stabilita území (PB-2014-ZL-S2380-007-ErozniStabilita)

Expertní odhady dlouhodobé stability horninového prostředí / Klimatická stabilita území (PB-2014-ZL-S2382-008-KlimatickaStabilita)

Expertní odhady dlouhodobé stability horninového prostředí / Seismická stabilita území (PB-2014-ZL-S2379-009-SeismickaStabilita)

3D strukturně-geologické modely horninového prostředí pro HÚ (PB-2014-ZL-S2304-010-3DStrukturneGeoModely)

HG modely horninového prostředí pro HÚ (PB-2014-ZL-S2393-011-HGModely)

Příprava experimentů v PVP Bukov (PB-2015-ZL-S0655-016-BukovExperimenty)

Plán experimentů PVP Bukov pro podporu bezpečnostního rozboru lokality Kraví hora (PB-2016-ZL-U2686-033-PripravaBukov)

Příprava geochemického modelu úložiště (PB-2016-ZL-S0626-027-Geochemie)

Transport radionuklidů z úložiště

Vstupní parametry a procesní modely pro hodnocení transportu RN v horninovém prostředí (PB-2014-ZL-S2300-003-Transport1)

Aktualizace integrovaného, transportního modelu pro hodnocení dlouhodobé bezpečnosti (PB-2014-ZL-S2303-006-Transport2)

Vstupní parametry a procesní modely pro hodnocení transportu radionuklidů přes inženýrské bariéry (PB-2014-ZL-S2565-013-Transport3)

Testování transportních modelů s využitím *in-situ* zahraničních experimentů (PB-2015-ZL-S1900-022-Transport4)


Transport radionuklidů přes materiály na bázi cementu (PB-2015-ZL-S2368-024-Transport5)

Hodnocení nejistot transportu radionuklidů z hlubinného úložiště (PB-2016-ZL-S0744-028-Transport6)

Vývoj a ověřování metodik modelování THMC procesů v rámci mezinárodního projektu DECOVALEX 2019 (PB-2016-ZL-S0870-029-Decovalex)

Transport radionuklidů z úložiště / Bezpečnostní rozbor HÚ v lokalitě Kraví hora (PB-2017-ZL-S3852-034-Transport7)

Transport radionuklidů z úložiště / Testování koncepčních a výpočetních modelů (PB-2017-ZL-S2222-041-Transport 8)

 SÚRAO	Závěrečná zpráva projektu Výzkumná podpora pro bezpečnostní hodnocení HÚ	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 462/2020

Charakterizace horninového prostředí

Vývoj a ověřování metodik pro charakterizaci horninového prostředí (PB-2014-ZL-S2566-012-Bedrichov)

Matematické modelování křehkého porušení horninového prostředí metodou DFN (PB-2016-ZL-S1351-030-DFN)

Geologická interpretace terénních geofyzikálních dat pro aktualizaci 3D strukturně-geologických modelů potenciálních lokalit HÚ (PB-2017-ZL-S2196-037-Geofyzika)

Předběžné hodnocení lokalit z hlediska dlouhodobé bezpečnosti (PB-2016-ZL-S2058-032-Hodnocení lokalit)

Charakterizace horninového prostředí / Předběžné hodnocení lokalit EDU–západ a ETE–jih z hlediska dlouhodobé bezpečnosti (PB-2017-ZL-S4076-039-HodnoceniEDU_ETE)

Aktualizace hodnocení lokalit z hlediska dlouhodobé bezpečnosti (PB-2019-ZL-U3183-043-Hodnoceni2)

Geologická interpretace terénních geofyzikálních dat pro aktualizaci 3D strukturně-geologických modelů potenciálních lokalit HÚ (PB-2017-ZL-U2196-037-Geofyzika)



SÚRAO

SPRÁVA ÚLOŽIŠŤ
RADIOAKTIVNÍCH
ODPADŮ

NAŠE
BEZPEČNÁ
BUDOUCNOST

info@surao.cz | www.surao.cz