Technická zpráva 550/2021

PRIORITY PLÁNU VÝZKUMU, VÝVOJE A DEMONSTRAČNÍCH AKTIVIT PODZEMNÍHO VÝZKUMNÉHO PRACOVIŠTĚ BUKOV 2021

Praha, 2021

SÚRAO

NÁZEV ZPRÁVY: Priority plánu výzkumu, vývoje a demonstračních aktivit pro Podzemní výzkumné pracoviště Bukov 2021

AUTORSKÝ KOLEKTIV: Jan Smutek, Lukáš Vondrovic, Antonín Vokál, Lucie Hausmannová, Markéta Dohnálková, Jaromír Augusta, Jozef Urík, Lucie Mareda, Ondrej Mikláš, Marek Vencl, Dmitry Lukin

Bibliografický zápis: Smutek J., Vondrovic L., Vokál A., Hausmannová L., Dohnálková M., Augusta J., Urík J., Mareda L., Mikláš O., Vencl M., Lukin D. (2021): Priority plánu výzkumu, vývoje a demonstračních aktivit pro Podzemní výzkumné pracoviště Bukov 2021. – MS SÚRAO, TZ 550/2021, Praha.

Tato zpráva je výhradně majetkem SÚRAO a její šíření bez souhlasu majitele je zakázáno.

Správa úložišť radioaktivních odpadů byla zřízena k 1. 6. 1997 Ministerstvem průmyslu a obchodu ČR jako státní organizace na základě atomového zákona (§ 26 zákona č. 18/1997 Sb. o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření). Od roku 2000 je SÚRAO ve smyslu § 51 zákona č. 219/2000 Sb. organizační složkou státu.

Obsah

1 Úvod 6

2 Cíle PVP Bukov 7

3 Popis PVP Bukov 8

4 Výzkumný a experimentální program laboratoře 10

5 Prioritní aktivity pro nejbližší období provozu PVP Bukov 11

5.1 Charakterizace a modelování horninového prostředí 12

5.2 Vývoj mikrobiální aktivity 13

5.3 Šíření tepla v HÚ 14

5.4 Transport látek v horninovém prostředí 16

5.5 Koroze UOS 18

5.6 THMC procesy 19

5.7 Charakterizace poškozené a ovlivněné zóny horniny 19

6 Plán experimentů pokročilé fáze provozu PVP Bukov 20

7 Závěr 21

Seznam použitých zkratek

DFN	Discrete Fracture Network (puklinová síť)
EDZ	Excavation damage zone (oblast horniny poškozená razicími pracemi)
EdZ	Excavation disturbed zone (oblast horniny narušená razicími pracemi)
HÚ	Hlubinné úložiště
Plán V&V SÚRAO 2020	Technická zpráva SÚRAO č. 525/2020: Střednědobý plán výzkumu a vývoje SÚRAO pro období 2020-2030
PVP Bukov	Podzemní výzkumné pracoviště Bukov
RAO	Radioaktivní odpady
SÚRAO	Správa úložišť radioaktivních odpadů
THMC (procesy/modely)	Termo-hydro-mechanicko-chemické (procesy/modely)
TZ	Technická zpráva
UOS	Ukládací obalový soubor
VEP	Výzkumný a experimentální plán
V&V	Výzkum a vývoj
VJP	Vyhořelé jaderné palivo

Abstrakt

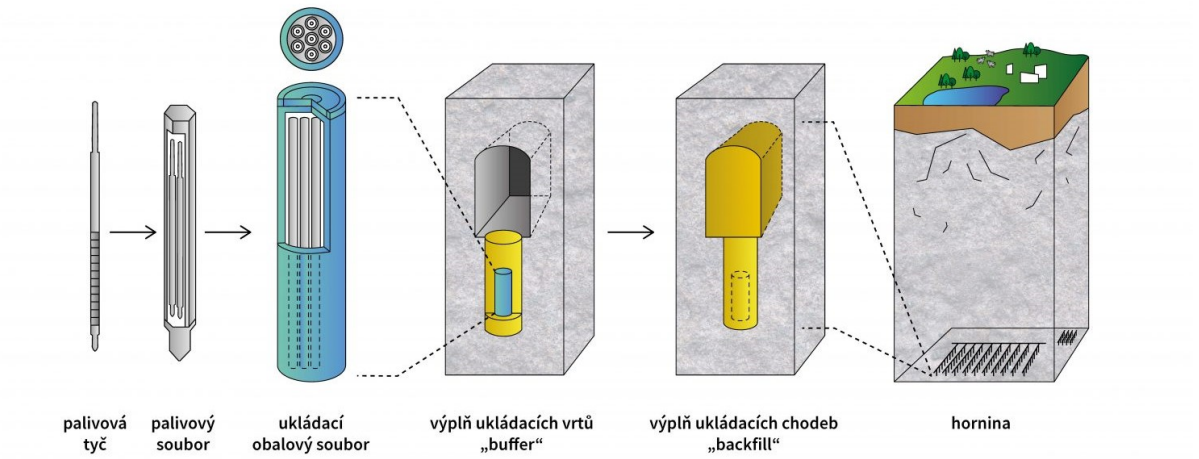
Tato zpráva obsahuje souhrn prioritních oblastí plánu výzkumu, vývoje a demonstračních aktivit Podzemního výzkumného pracoviště (PVP) Bukov na nejbližší následující roky provozu. PVP Bukov je klíčovým pracovištěm SÚRAO pro získání uceleného souboru dat pro vývoj modelovacích nástrojů k prokázání dlouhodobé bezpečnosti navrhovaného hlubinného úložiště RAO a VJP a ověření proveditelnosti zvoleného technického konceptu. Prioritní oblasti výzkumu vychází především z cílů definovaných ve Střednědobém plánu výzkumu a vývoje SÚRAO pro období 2020-2030 (TZ SÚRAO č. 525/2020). Mezi klíčové oblasti experimentů pro následující roky patří například vývoj metod charakterizace a modelování horninového prostředí, testování technologických postupů realizace ukládacích vrtů, vývoj a testování modelů ukládacích obalových souborů pro jejich použití v experimentech s fyzikálními modely ukládacích míst zabývajícími se studiem THM a THMC procesů, nebo také experimenty zaměřené na výzkum transportu látek v horninovém prostředí.

Klíčová slova

Hlubinné úložiště, PVP Bukov, podzemní laboratoř, plán priorit, bentonit, horniny krystalinika, inženýrská bariéra, buffer, backfill.

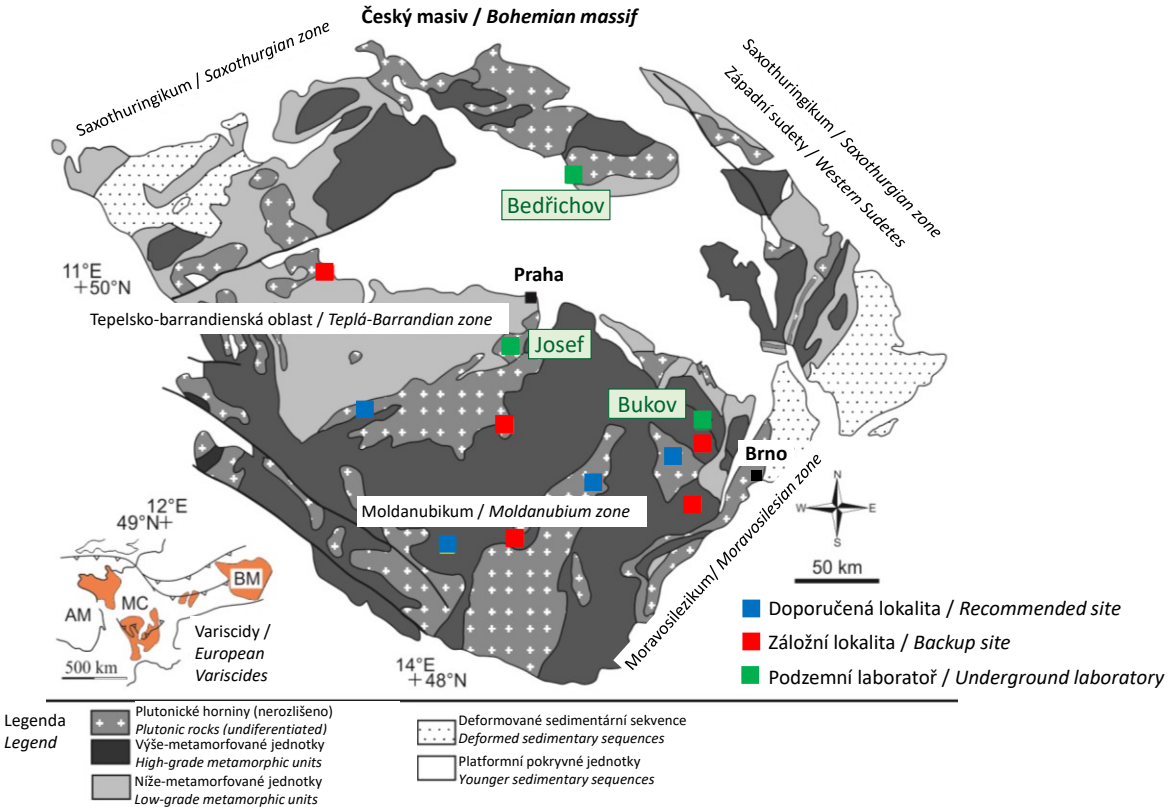
1 Úvod

Jednou z hlavních odpovědností SÚRAO je projekt přípravy hlubinného úložiště RAO a VJP (dále jen HÚ), které bude sloužit pro uložení všech radioaktivních odpadů, které není možné uložit do povrchových a přípovrchových úložišť (Obr. 1). V rámci tohoto rozsáhlého projektu SÚRAO podporuje a provádí potřebné výzkumné, vývojové a demonstrační aktivity. ČR se inspirovala u předních států s nejpokročilejšími programy hlubinného ukládání a následuje ověřený postup přípravy HÚ, jehož nezbytnou součástí je provádění programu ve vlastních generických podzemních výzkumných laboratořích/pracovištích. Hlavním cílem programu v podzemních laboratořích je včasná příprava a prověření vlastního technického řešení, tak aby byl projekt výstavby HÚ ve finální lokalitě realizovatelný v plánovaném časovém horizontu.



Obr. 1 – Ilustrační schéma základních komponentů českého HÚ

Pro co největší přiblížení se reálným podmínkám budoucího HÚ u in-situ experimentů bylo zbudováno Podzemní výzkumné pracoviště (PVP) Bukov, které se nachází v hloubce 550 m pod povrchem v horninách krystalinika Českého masivu (Obr. 2). Toto pracoviště bylo zhodnoceno jako nejvhodnější pro získání uceleného souboru dat využitelného pro sestavení a ověření matematických modelů k prokázání dlouhodobé bezpečnosti a k ověření proveditelnosti technického konceptu HÚ (Pospíšková et al. 2020a).



Obr. 2 – Geologická mapa Českého masivu s vyznačením kandidátních lokalit pro HÚ a podzemních laboratoří

2 Cíle PVP Bukov

Základní cíle PVP Bukov vychází z potřeb definovaných v plánech výzkumu a vývoje SÚRAO (Pospíšková et al. 2015, Vokál et al. 2020). Důležitým posláním je získání dostatku zkušeností a dat pro prokázání bezpečnosti a proveditelnosti HÚ na finální lokalitě. Využití PVP Bukov je plánováno přibližně do roku 2035, kdy na program v této generické laboratoři navážou práce ve finální lokalitě uvnitř podzemních děl HÚ, která jsou označovaná jako konfirmační laboratoř.

Obecné cíle PVP Bukov dle plánů V&V (Pospíšková et al. 2015, Vokál et al. 2020) lze shrnout do následujících bodů:

a) Získání dat pro validaci a verifikaci modelů

V současné fázi výběru lokality pro HÚ je třeba získávat data, která umožní prokázání stability a bezpečnosti plánovaného úložiště v navržené hloubce pod povrchem. PVP Bukov v tomto ohledu slouží pro získávání dat z in-situ měření potřebných k vývoji modelovacích nástrojů a ověřování jejich funkčnosti, tak aby ve finální lokalitě mohl být vytvořen komplexní soubor modelů pro prokázání dlouhodobé a provozní bezpečnosti HÚ a demonstraci technické proveditelnosti. Součástí souboru jsou geologické, tektonické, hydrogeologické, geomechanické, geochemické a THMC modely.

b) Otestování a demonstrace uvažovaných technických řešení

Druhým cílem je otestování v současnosti uvažovaných technických řešení pro HÚ v odpovídající hloubce pod povrchem v přesně popsaném geologickém prostředí. Jedná se například o dlouhodobé sledování koroze materiálů pro UOS, testování migračních vlastností hornin, nebo testování stability těsnicích a tlumicích bariér.

c) Získání metodik studia

Třetí cíl obnáší přípravu a otestování metodik studia a popisu horninového prostředí ve specifickém podzemním prostředí, které bude možné využít pro popis a charakterizaci kandidátních lokalit HÚ a poté při výstavbě HÚ ve finální lokalitě. Důležitou součástí je vývoj a otestování vlastního klasifikačního systému pro použití v HÚ. Ten bude sloužit například pro zhodnocování vhodnosti vybudovaných podzemních prostor pro umístění ukládacích vrtů.

d) Získání know-how výstavby a charakterizace podzemního díla

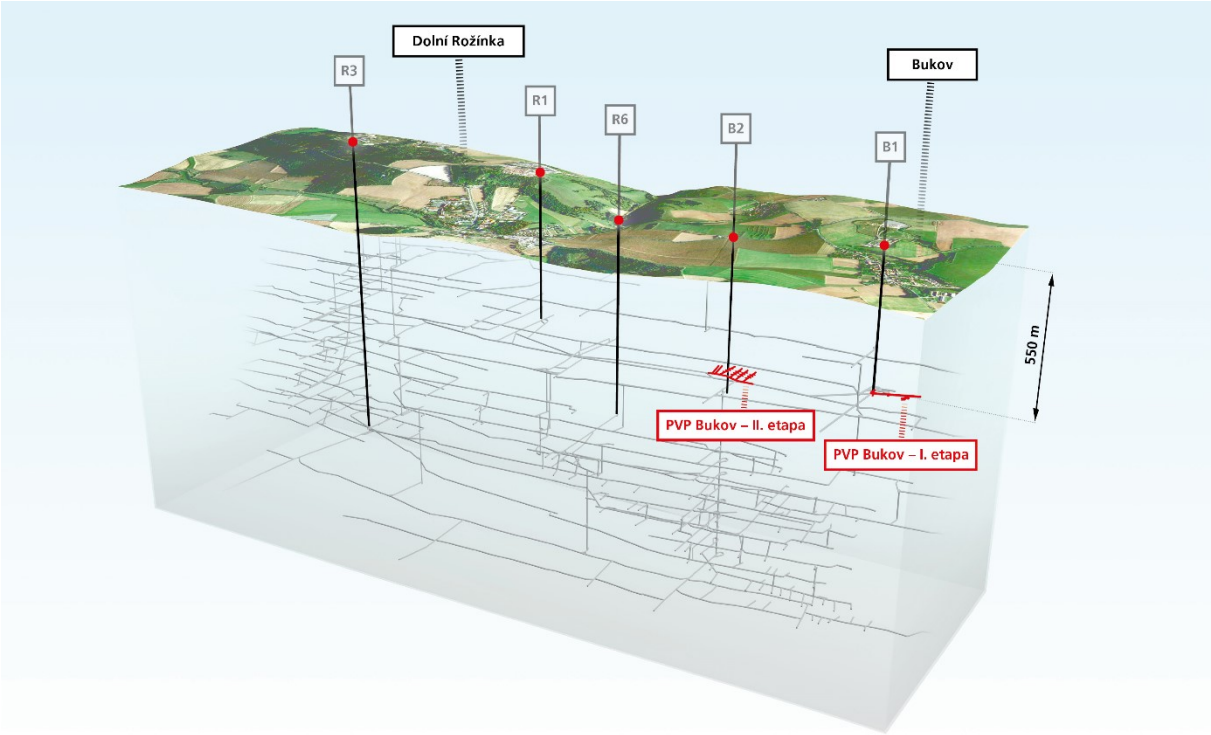
Poslední cíl zahrnuje získávání zkušeností a know-how z výstavby podzemních děl a jejich uvádění do provozu. V PVP Bukov je využívána unikátní možnost razit nová podzemní díla a ve včasné fázi programu HÚ jsou tak osvojovány práce v podzemním prostoru a získávány zpětné vazby při řešení konkrétních technických zadání.

Další konkrétní cíle PVP Bukov na následující roky byly definovány ve Střednědobém plánu výzkumu a vývoje SÚRAO pro období 2020-2030, dále uváděn jako „Plán V&V SÚRAO 2020“ (Vokál et al. 2020), jedná se o následující:

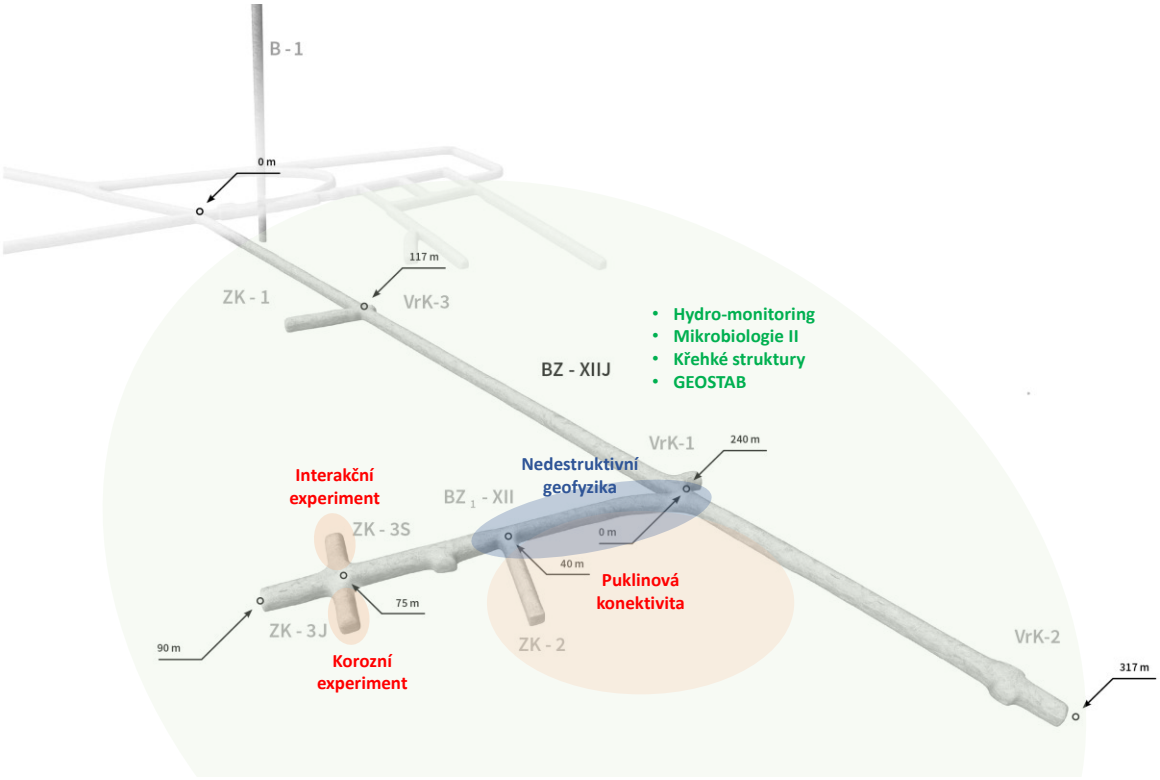
1) Stanovení přenositelnosti poznatků získaných z povrchových částí horninového prostředí PVP Bukov do hlubinných částí pro predikci vlastností lokalit v hloubce úložiště.
2) Zhodnocení vývoje mikrobiální aktivity (původní i zanesené) na základě monitoringu.
3) Ověření šíření teploty v úložišti od zdrojů simulujících VJP.
4) Ověření predikce transportu mobilních radionuklidů v izolační části úložiště.
5) Ověření vlastností materiálů UOS v reálných podmínkách horninového prostředí.
6) Ověření predikce THMC procesů v reálných podmínkách úložiště.
7) Ověření vlivu ražebních postupů na rozsah poškození horniny (EDZ) a izolační schopnosti horniny.

3 Popis PVP Bukov

Podzemní prostory PVP Bukov se nacházejí v úrovni 12. patra bývalého uranového dolu Rožná I v hloubce okolo 550 m. V roce 2017 byl dokončen komplex laboratoře označovaný jako I. Etapa, který se nachází poblíž jámy B-1 pod obcí Bukov (Obr. 3). Laboratoř byla vystavěna společností DIAMO s.p., o.z. GEAM, která je zodpovědná i za zajištění provozu laboratoře a návazné infrastruktury dolu (Augusta et al. 2018). Z hlediska geologické stavby se laboratoř nachází ve vysoce metamorfovaném vulkano-sedimentárním komplexu tvořeným převážně migmatity a amfibolity (platí pro obě části pracoviště). I. Etapa PVP Bukov obsahuje celkem 470 m chodeb využívaných pro experimentální činnosti (Obr. 4).

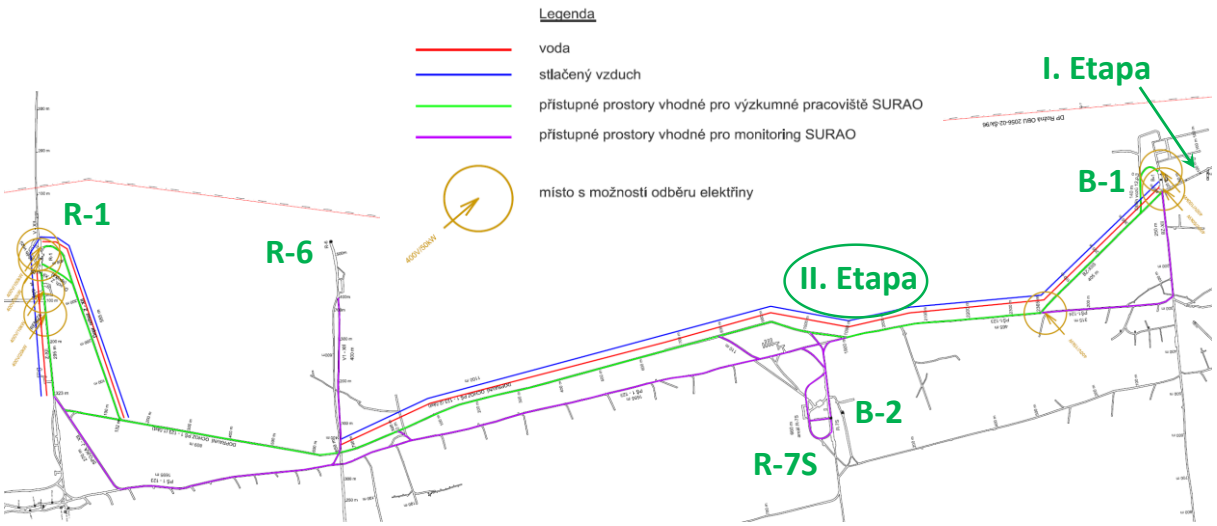


Obr. 3 – Schéma důlního komplexu s vyznačením pozice PVP Bukov (I. a II. Etapy)



Obr. 4 – Schéma laboratorních chodeb I. Etapy PVP Bukov s vyznačením současného využití pro experimenty

Do roku 2020 bylo kromě samotných prostor laboratoře na 12. patře využíváno i přístupu do dalších míst důlního komplexu v různých hloubkových úrovních, a to až na 24. patro do hloubky 1200 m, kde byly prováděny experimentální práce. V roce 2020 pak byla zahájena rekonfigurace důlní infrastruktury, tak aby v brzké době zůstala v provozu pouze ta důlní díla a zařízení, která jsou nezbytně potřebná pro chod laboratoře. Navržené řešení obnáší zaplavení spodních pater dolu až po úroveň 13. patra, se zachováním provozu čtyř jam (R1, R6, B2 a B1). V současné době je, a v budoucnu také zůstane, běžný přístup omezen pouze na 12. patro dolu (Obr. 5).



Obr. 5 – Mapa provozované části 12. patra dolu

Protože pro kompletní naplnění výzkumného programu SÚRAO byly stávající prostory I. Etapy zhodnoceny jako nedostatečné, byla naplánována ražba nových laboratorních chodeb. Komplex označovaný jako II. Etapa PVP Bukov (Obr. 3) se bude nacházet východně od jámy B-2, resp. R7-S (Obr. 3, Obr. 5). V plánovaných místech byly potvrzeny vhodné geologické podmínky a velkou výhodou tohoto místa je, že nedojde k ohrožení chodu již běžících experimentů ražbou. Ražba byla zahájena v lednu 2021 a stávající plán obnáší vytvoření šesti laboratorních chodeb (délka každé do 90 m), z kterých budou raženy desetimetrové zkušební komory. Lokalizace zkušebních komor bude záviset na zastižené geologické stavbě v rámci laboratorní chodby. V maximalistickém rozsahu je uvažováno s umístěním až 24 zkušebních komor.

4 Výzkumný a experimentální program laboratoře

Výzkumný program laboratoře byl zahájen společně se započetím ražeb v roce 2013. Od té doby zde bylo inicióváno celkem 14 výzkumných projektů využívající podzemních prostor. Výzkumný program je obecně od počátku plánovaní laboratoře rozdělen do oblastí označovaných jako VEP (Výzkumný a experimentální plán, viz Tabulka 1) s definovanými základními cíli. Jednotlivé projekty byly doposud vždy voleny na základě aktuálních potřeb SÚRAO s využitím doporučení obsažených ve studiích realizace experimentálního plánu, které byly s postupem času několikrát aktualizovány (Havlová et al. 2015; Vondrovic et al 2016; Společnost „ČVUT-SATRA-Mott MacDonald CZ“ 2016; Havlová et al. 2017; Butovič et al. 2018; Svoboda et al. 2019; Pospíšková et al. 2020a-e).

Tabulka 1 - Oblasti výzkumného a experimentálního plánu SÚRAO

Oblast programu SÚRAO	**Cíle**
VEP1	Vývoj metodik popisu horninového prostředí. Sběr popisných geologických dat, jejich uložení do databází a interpretace ve formě 3D modelů.
VEP2	Testování a vývoj metod dlouhodobého monitoringu procesů probíhajících v horninovém masivu (hydrogeologie, pohyby křehkých struktur, mikrobiologické osídlení, teplota masivu, seismicita). Vývoj nedestruktivních geofyzikálních metod.
VEP3	Výzkum proudění podzemních vod a transportu radionuklidů v horninovém prostředí. In-situ testy ve vrtech. Vývoj a testování modelovacích nástrojů.
VEP4	Vývoj a výzkum materiálů inženýrských bariér. Výzkum korozních vlastností materiálů pro UOS. Výzkum interakcí mezi materiály inženýrských bariér (bentonit, beton) a horninou. Verifikace a validace THMC modelů.
VEP5	Vývoj a testování metod pro charakterizaci porušené (EDZ) a ovlivněné (EdZ) oblasti hornin v okolí podzemních prostor.
VEP6	Vývoj nových konstrukčních postupů výstavby podzemních děl (vrtné a razicí práce, injektáže, zajištění výruby při prostupu přes poruchové zóny).
VEP7	Komplexní experimenty testující chování prvků ukládacího systému v reálném měřítku a podmínkách v HÚ. Testování technologií pro manipulaci, konstrukce experimentálních modelů a monitoring procesů.

5 Prioritní aktivity pro nejbližší období provozu PVP Bukov

Prioritní aktivity pro PVP Bukov vychází z Plánu V&V SÚRAO 2020. Tento dokument navazuje na Střednědobý plán výzkumu a vývoje pro potřeby umístění hlubinného úložiště v ČR 2015-2025 (Pospíšková et al. 2015), na základě kterého bylo v předchozích letech iniciováno a provedeno mnoho výzkumných projektů. Plán V&V SÚRAO 2020 zohledňuje poslední aktualizaci Koncepce nakládání s radioaktivními odpady a vyhořelým jaderným palivem v České republice schválenou usnesením vlády č. 597 ze dne 26. srpna 2019 a požadavky nového atomového zákona č. 263/2016 Sb. a jeho prováděcích předpisů. Plán je určen především pro období do výběru finální lokality hlubinného úložiště, tj. zhruba do roku 2025 až 2030.

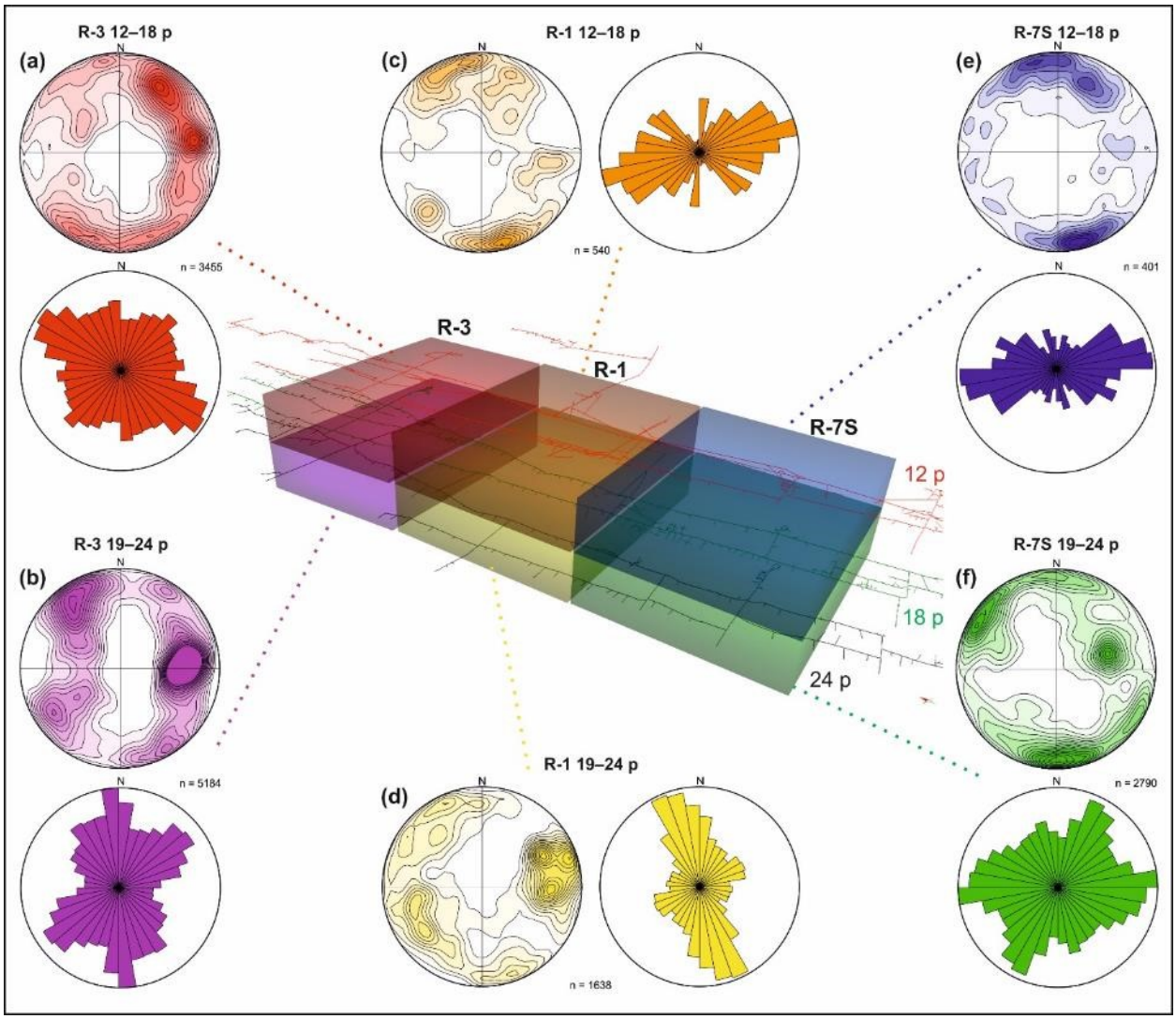
5.1 Charakterizace a modelování horninového prostředí

První prioritní oblast se týká získávání informací o lokálních vlastnostech horninového masivu od povrchu až do hloubky odpovídající HÚ (případně hlouběji) pro možné predikce vlastností kandidátních lokalit HÚ (Obr. 6), klasifikačních systémů horninového masivu pro potřeby umístění HÚ a vývoje modelových koncepcí v oblasti proudění vod.

Při ražbě a budování HÚ se předpokládá využití speciálního klasifikačního systému pro zhodnocování vhodnosti horninového prostředí pro situování přístupových důlních děl HÚ a především definování vhodných bloků pro umísťování ukládacích prostor. Při jeho vývoji budou nejprve přehodnoceny běžně používané klasifikační systémy a navržen systém pro konkrétní potřeby HÚ. Obdobným způsobem bylo postupováno při budování komplexu finského HÚ (Hagros et al. 2005). Ražba nové části PVP Bukov poskytuje unikátní možnost pro vytváření postupů, metodik a doporučení pro charakterizační a klasifikační práce v budoucnu využitelných při budování HÚ.

Další částí plánovaného průzkumu na vybraných potenciálních lokalitách pro umístění HÚ je realizace vrtů z povrchu do uvažované hloubkové úrovně HÚ. Tyto vrty by měly přinést detailní informace o strukturně tektonických poměrech a hydrogeologické charakteristice v hloubce. Některé z plánovaných metodik pro získání těchto informací z vrtů nebyly ještě v takových hloubkách v prostředí krystalinika Českého masivu testovány, a proto je v plánu v oblasti PVP Bukov provést zkušební vrt, kde budou otestovány pokročilé technologie jádrového vrtání a charakterizační metody ve vrtech. Vrt o délce cca 600 m je v plánu realizovat tak, aby mohly být provedeny korelace mezi daty získanými pomocí metod ve vrtu a daty získanými z měření v otevřených podzemních prostorách nebo vrtech vedených z podzemí.

Tato oblast je celkově provázána s modelovacími aktivitami, kde jsou získávána data pro vývoj a zpřesňování transportních modelů horninového prostředí. Kromě hydraulických testů a monitoringu, relevantních pro tvorbu a kalibraci hydraulického modelu, budou získávána data pro vývoj metodiky modelování puklinových sítí a zapracování migračních parametrů do transportních modelů. Plánován je komplexní projekt, kde bude vytvořen matematický model a studie hodnotící hydrogeologickou situaci v PVP Bukov a okolí se zahrnutím vlivu podzemního díla na přirozený režim podzemních vod. Součástí bude i vytvoření simulace zatápění důlních prostor a vlivu zatápění na okolí jako simulace uzavírání podzemního díla. Klíčové je také testování metodiky využití DFN modelů pro popis proudění podzemní vody v puklinovém krystalinickém prostředí, s využitím postupů a metodik modelování puklinových sítí vyvinutých v rámci dřívějších projektů (Kabele 2018, Gvoždík et al. 2020).



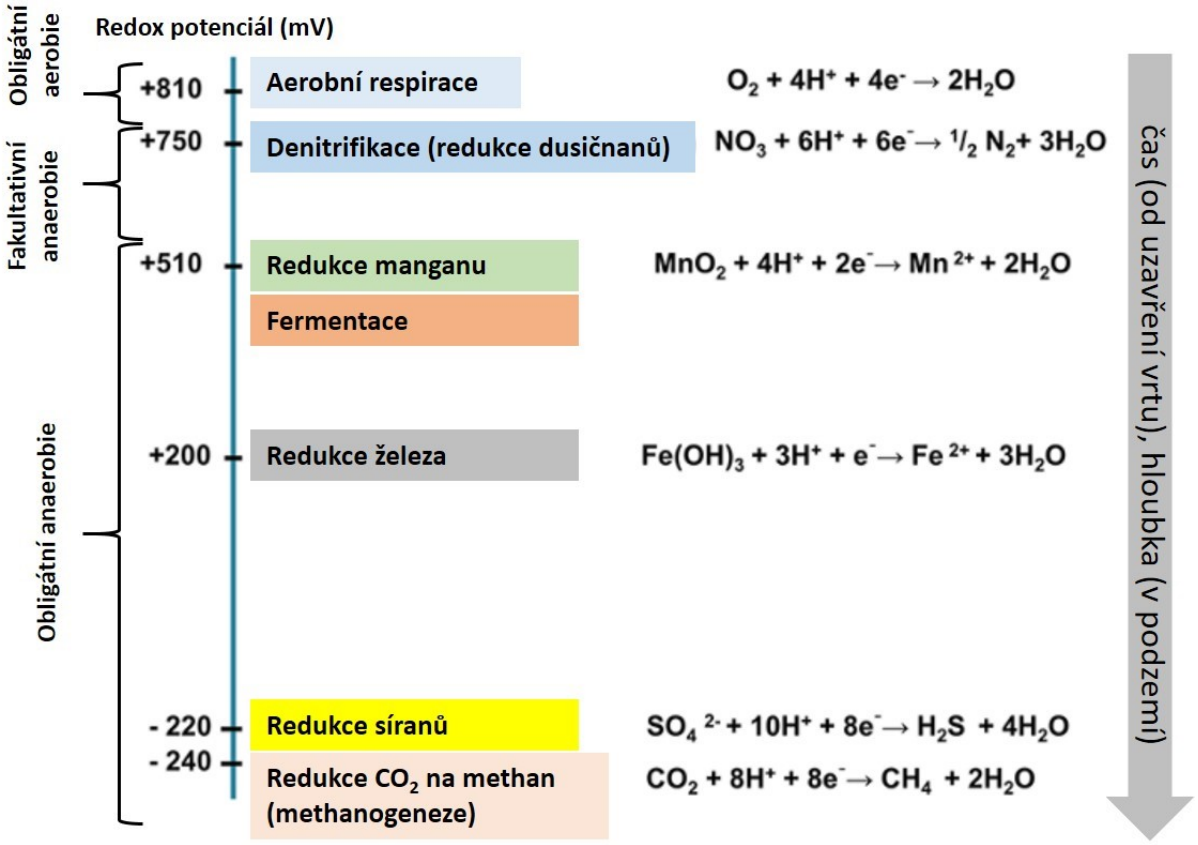
Obr. 6 – Ilustrační obrázek: Strukturní diagramy projektu Hluboké horizonty zobrazující prostorové změny orientace křehkých struktur v rámci studovaných částí dolu Rožná I v různých hloubkách (Bukovská et al. 2020)

5.2 Vývoj mikrobiální aktivity

Zhodnocení vývoje mikrobiální aktivity v horninovém prostředí a inženýrských bariérách je jednou z prioritních oblastí výzkumu v souvislosti s vývojem redoxního prostředí v úložišti a s korozními vlastnostmi materiálů ukládacího obalového souboru (Černík et. al, 2016). První informace o mikrobiálním osídlení v horninovém prostředí PVP Bukov přinesl projekt dokončený v roce 2019 (Steinová et al. 2019) a mikrobiální aktivita je také sledována v Interakčním experimentu (Svoboda et al. 2021).

Další směřování tohoto tématu by měl přinést probíhající projekt, který se soustředí na zhodnocení složení mikrobiálního osídlení vod v anaerobních podmínkách a interpretaci vzhledem k jejich složení a hydrochemickým podmínkám (Steinová et al. 2021). V závislosti na redoxním potenciálu prostředí lze pozorovat rozdílné mikrobiologické populace využívající zdroje dostupných terminálních elektronů (viz Obr. 7). V projektu je sledováno přirozené mikrobiální

osídlení, jehož vliv je významný zejména pro inženýrské bariéry a transport látek. Rešeršní část tohoto projektu se mimo jiné věnuje odlišení přirozeného zdroje mikrobů od zdroje zavlečeného - např. z bentonitu. Data z této oblasti přinese také i probíhající korozní experiment, kde bude součástí odběrů vod také mikrobiologické zhodnocení.



Obr. 7 – Obecné schéma metabolického profilování v horninovém prostředí (Steinová et al. 2021)

5.3 Šíření tepla v HÚ

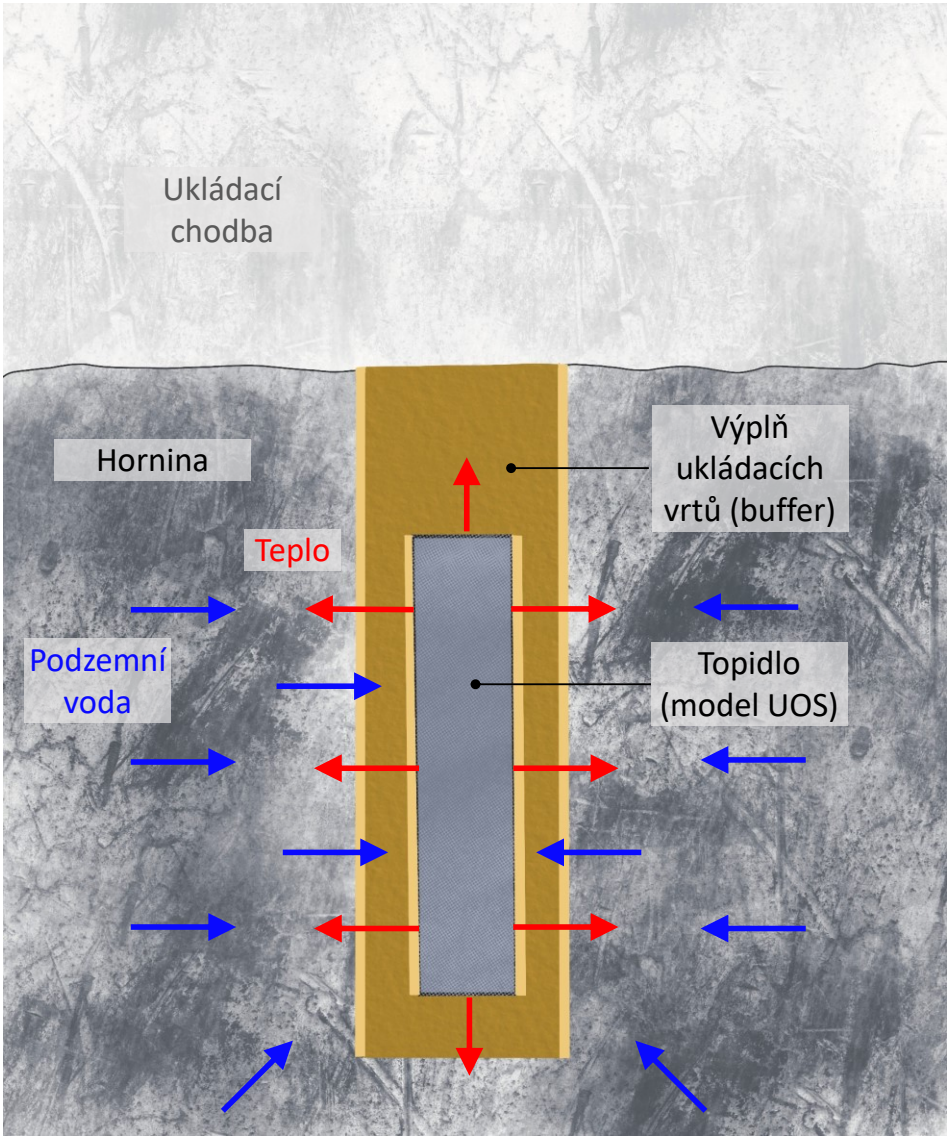
Pro projektové řešení HÚ je klíčové ověření šíření tepla v úložišti od zdrojů simulujících VJP, které ovlivňuje dimenzování podzemních chodeb a ukládacích vrtů (Kobylka 2019). Pro naplnění tohoto cíle jsou v plánu in-situ experimenty s fyzikálními modely ukládacích míst.

Pro realizaci těchto experimentů je v prvním kroku klíčové otestování postupu realizace a charakterizace vrtů pro fyzikální modely reprezentující ukládací vrty pro UOS. Cílem bude vytvoření horizontálních a vertikálních vrtů pro uložení modelů UOS dle aktuálních ukládacích konceptů zvažovaných pro HÚ v ČR v reálném měřítku. Program má ověřit možnosti technologických postupů a odhalit případné komplikace při charakterizaci horniny při výběru místa pro vrty, vrtném procesu a vyhodnocení přesnosti a kvality provedeného vrtu. Důležitou součástí bude také otestování metod charakterizace vrtů pro zhodnocení přesnosti provedení, metody zmapování povrchu vrtů, určení rozsahu poškozené oblasti hornin v okolí vrtu, nebo také otestování způsobů monitoringu přítoků vody do vrtů.

Dílčí součástí přípravy in-situ experimentů bude také vývoj a testování modelu simulujícího UOS. Cílem bude připravit technické řešení a následně vyrobit a otestovat topidlo pro použití v dalších experimentech. Rozdílem oproti v minulosti zkonstruovaným topidlům v projektech podporovaných SÚRAO bude, že topidlo bude umožňovat nastavení topného výkonu odpovídajícímu UOS. V experimentech nebude přizpůsobován výkon tak, aby byla udržována konkrétní konstantní teplota na vnějším plášti topidla, ale konstantní bude výkon, díky čemuž budou simulovány skutečné podmínky v HÚ.

V rámci této oblasti bude také realizován teplotní monitoring horninového masivu, který přinese informace o okrajových podmínkách potřebných pro modely šíření tepla. Mezi dílčí cíle tohoto projektu patří: získání hodnot teploty horninového masivu od povrchu do hloubky 550 m (úroveň PVP Bukov), určení rozsahu zóny tepelného ovlivnění horninového masivu antropogenní činností, určení původní teploty v horninovém masivu na měřících stanovištích (před vytvořením podzemních prostor dolu) pomocí matematického modelu a predikce dalšího vývoje parametrů na základě validovaného matematického modelu a zpřesnění znalostí o geotermálním gradientu (změna teploty s hloubkou pod povrchem).

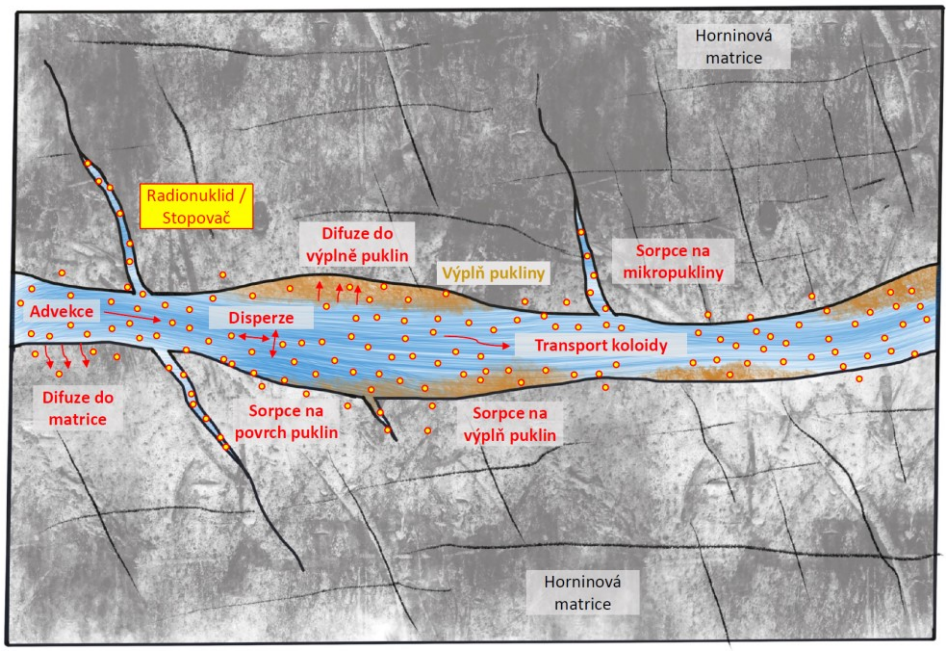
Následný program bude zaměřen na výstavbu a provozování fyzikálních modelů bentonitové bariéry zahřívané maketou UOS, která bude bariéru zatěžovat stejným výkonem jako UOS v HÚ. Kromě modelování šíření tepla a vývoje teploty se program bude zabývat distribucí vlhkosti a mechanické odezvy, tedy THM procesy. Experimentem bude ověřeno chování bentonitové bariéry, ověřeno šíření tepla od UOS skrz bentonitovou bariéru a horninu, získána data pro validaci matematických modelů zaměřených na simulace THM procesů v úložném prostoru a blízkém okolí během doby saturace výplňových materiálů, získána data pro validaci matematických modelů používaných pro tepelné dimenzování HÚ, a ověřen rozsah plochy HÚ a zpřesněny cenové odhady. Experiment bude obnášet výstavbu několika fyzikálních modelů (Obr. 8), které se budou lišit technickým řešením a množstvím instrumentace. Technické řešení bude vycházet z výstupů výzkumného programu SÚRAO zabývajícího se výplněmi a ostatními inženýrskými komponenty HÚ (označovaný jako program „Výplně“).



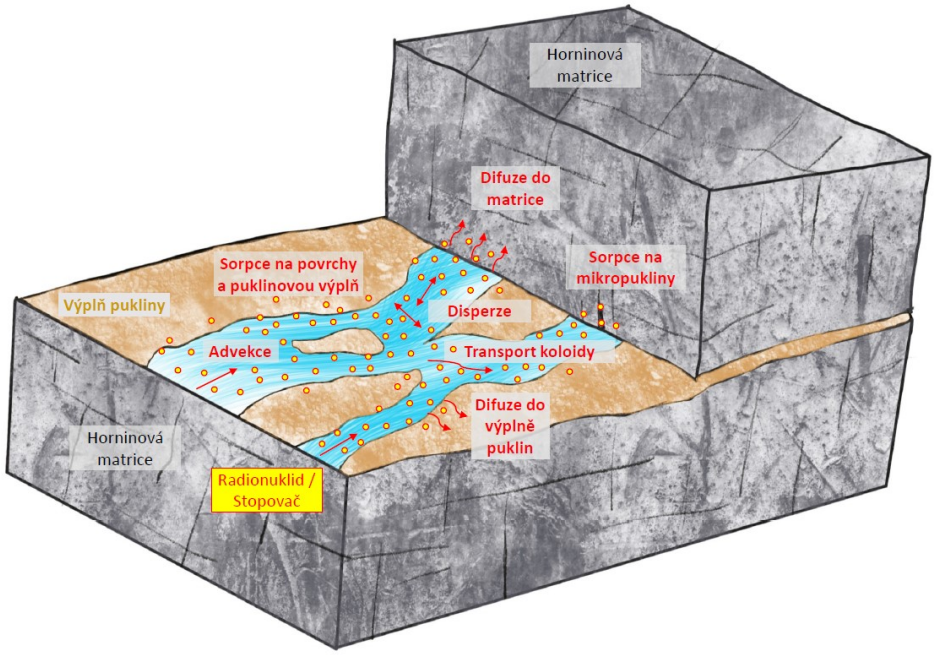
Obr. 8 – Ilustrační schéma fyzikálního modelu ukládacího místa pro vertikální způsob ukládání

5.4 Transport látek v horninovém prostředí

Pro ověření predikce transportu mobilních radionuklidů v izolační části úložiště slouží program experimentů se stopovacími testy s neaktivními i aktivními látkami. Tato prioritní oblast je opět spojena s modelovacími aktivitami a konkrétně je vázána k simulacím případů transportu radionuklidů po jejich úniku z poškozeného UOS. Radionuklidy mohou být transportovány ve formě roztoků s vodou přes inženýrské bariéry a geosféru dále do biosféry. Základními transportními procesy v horninovém prostředí jsou advekce, hydrodynamická disperze, sorpce a difuze do matrice (Obr. 9 a Obr. 10). Dalším přidruženým transportním médiem mohou pak být plyny a koloidy. Výsledky plánovaných in-situ experimentů budou uplatněny při tvorbě modelů části transportní cesty horninovým prostředím, do kterého budou jako vstupní parametry vstupovat vlastnosti průtokových cest (puklin) a zádržné vlastnosti horninové matrice.



Obr. 9 – Schéma transportních procesů v puklinovém prostředí ve 2D



Obr. 10 – Schéma transportních procesů v puklinovém prostředí ve 3D

Tento program byl zahájen projektem Puklinová konektivita (Zuna et al. 2020), který je lokalizován do prostor I. Etapy PVP Bukov. Zvolené místo pro tento projekt je vhodné především pro studium advektivního proudění a studium propojenosti puklinových systémů. V rámci tohoto projektu jsou prováděny hydrotesty na systému jádrových vrtů osazených multipakry a celý program bude zakončen stopovacími zkouškami s konzervativními nesorbujícími stopovači. Pro navazující

aktivity je v plánu vytvoření nového stanoviště v oblasti II. Etapy, které bude co nejvíce reprezentativní pro izolační část HÚ a vhodné i pro studium pomalých transportních procesů.

Pro studium difuzního transportu jsou uvažovány dva způsoby. Jednou cestou je samostatný dlouhodobý difuzní experiment ve zvláštních vrtech. Tento způsob by byl založen na zkušenostech z projektů LTD v Grimsel Test Site (Havlová et al. 2018) nebo LTDE v Äspö HRL (Löfgren a Nilsson 2020) a souvisejícího programu Task Force 9 (Soler et al. 2017, Hokr et al. 2020). Druhou cestou je realizace kombinovaného experimentu sledujícího procesy advekce, difuze a sorpce (příp. disperze) zároveň. Tento způsob by obnášel nalezení vhodné diskrétní pukliny, která by po detailní charakterizaci mohla být použita pro testy s koktejly radionuklidů (popřípadě jiných stopovačů reprezentujících různě sorbující radionuklidy).

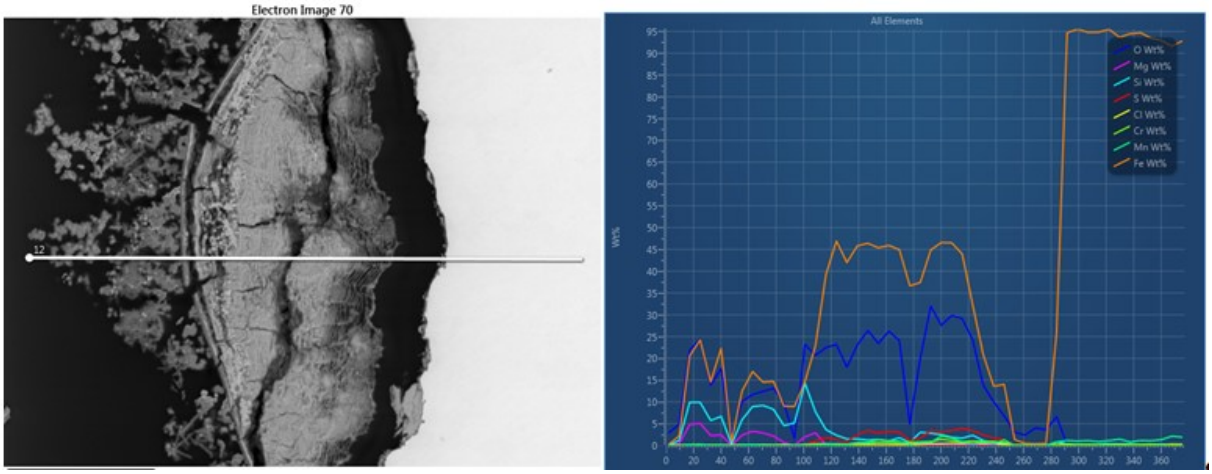
Program předpokládá realizaci stopovacích testů nejprve s neaktivními a posléze s aktivními stopovači. Výhodou použití aktivních izotopů v in-situ podmínkách je jejich snadná detekovatelnost při použití nízkých koncentrací, respektive aktivit použitých radionuklidů. Nevýhodou jsou specifická legislativní omezení.

5.5 Koroze UOS

Ukládací obalový soubor (UOS) je jednou z klíčových inženýrských bariér českého konceptu HÚ. Pro účely udělení licence pro navržené řešení UOS bude v budoucnu nutné doložit, že UOS splňuje všechny stanovené požadavky. Pro tyto potřeby bude nutné ověřit a demonstrovat chování materiálů navržených pro UOS v podmínkách blízkých HÚ. Tento program byl již zahájen a je předmětem pilotního korozního experimentu v PVP Bukov.

Cílem projektu je vypracování metodiky pro testování korozního chování kovových vzorků a získání znalostí o korozní odolnosti kandidátních materiálů pro UOS, realizace pilotního in-situ experimentu pro získání dat pro matematické modely predikující korozní odolnost materiálů UOS v časovém horizontu životnosti HÚ, vyhodnocení interakcí mezi kovovými materiály UOS a bentonitem, vyhodnocení ovlivnění vlastností podzemní vody přítomností materiálů inženýrských bariér, vyhodnocení vývoje mikrobiální aktivity v horninovém prostředí a v bentonitové náplni fyzikálních modelů se speciálním zaměřením na kontakt mezi kovem a bentonitem a popis ovlivnění mikrobiální aktivity v experimentu zvýšenou teplotou.

Realizovaný in-situ experiment obnáší přípravu několika sestav (fyzikálních modelů) s korozními moduly obsahující korozní vzorky, jejich instalaci do vrtů, zatěžovací fázi (zahřívání na 70 až 95 °C) a vyjímání sestav z vrtů po určitých časových obdobích pro laboratorní analýzy materiálů (Obr. 11). Testované materiály budou vycházet z programu vývoje českého UOS (Kotnour et al. 2019). Na základě výsledků z tohoto pilotního in-situ testu bude v případě potřeby navržen doplňující výzkumný program.



Obr. 11 – Ilustrační obrázek liniové analýzy vzorku oceli (Kotnour et al. 2019)

5.6 THMC procesy

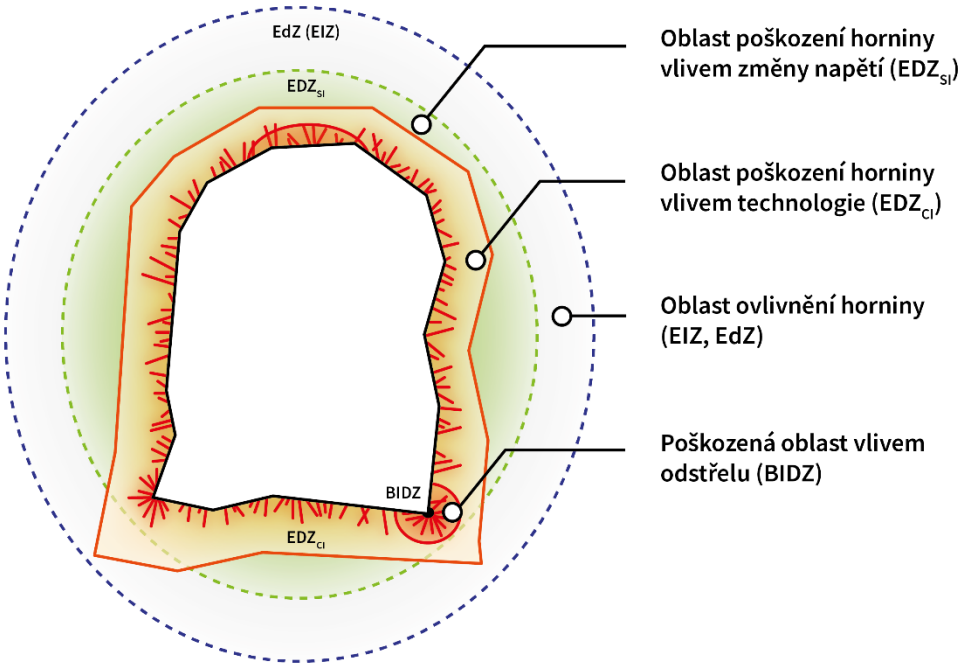
Potřeba tohoto programu vychází z Plánu V&V SÚRAO 2020 z části hodnocení dlouhodobé bezpečnosti, kde je v souladu s požadavky vyhlášky č. 377/2016 Sb. plánována verifikace a validace THMC (termo-hydro-mechanicko-chemických) modelů vývoje inženýrských bariér. Program je úzce propojen s modelováním a laboratorními experimenty, které budou prováděny v rámci připravovaného projektu Výzkumná podpora SÚRAO pro bezpečnostní hodnocení technického řešení HÚ (dále jen Bezpečnost II). Cílem těchto experimentů, které budou navrženy na základě volby vhodných technických řešení v podmínkách českého HÚ, je ověření modelů pro simulace vývoje inženýrských bariér v čase a prostoru v prostředí krystalinických hornin.

Oproti experimentům popsaným v Kap. 5.3, obnášejících konstrukci fyzikálních modelů s důrazem na termo-hydro-mechanické procesy v úložném prostoru, je v této části řešena i chemická část procesů. Bude se věnovat zejména korozním procesům na rozhraní UOS-bentonit nebo studiu vlivu korozních produktů a pórové vody na výplňové materiály. Cílem in-situ experimentů je získání dat pro validaci matematických modelů inženýrských bariér v reálném prostředí krystalinických hornin, tj. prostředí splňující předběžná kvalifikační kritéria pro umístění ukládacích vrtů, která zahrnují zejména kritéria na velmi malý přítok vody do vrtu, vhodné teplotní parametry a vhodné chemické prostředí. Vlastní, podrobná konstrukce experimentů, bude navržena až po provedení předběžného matematického modelování v projektu Bezpečnost II, které rovněž určí celkovou potřebnou dobu realizace in-situ experimentu.

5.7 Charakterizace poškozené a ovlivněné zóny horniny

Poslední prioritní cíl se týká ověřování vlivu ražby podzemních prostor na rozsah poškozené a ovlivněné oblasti hornin v okolí podzemních chodeb (Obr. 12). Toto téma je řešeno průběžně a nejvíce relevantních informací přinesou charakterizační a výzkumné aktivity doprovázející výstavbu nových laboratorních chodeb, která byla zahájena v lednu 2021. Část prací je řešena v probíhajícím projektu *Geologická a geotechnická charakterizace horninového prostředí – PVP Bukov II* a dle potřeb je v plánu provést další experimenty pro doplnění znalostí o vlastnostech a rozsazích poškozené a ovlivněné oblasti hornin na PVP Bukov pomocí metod nepoužitých v

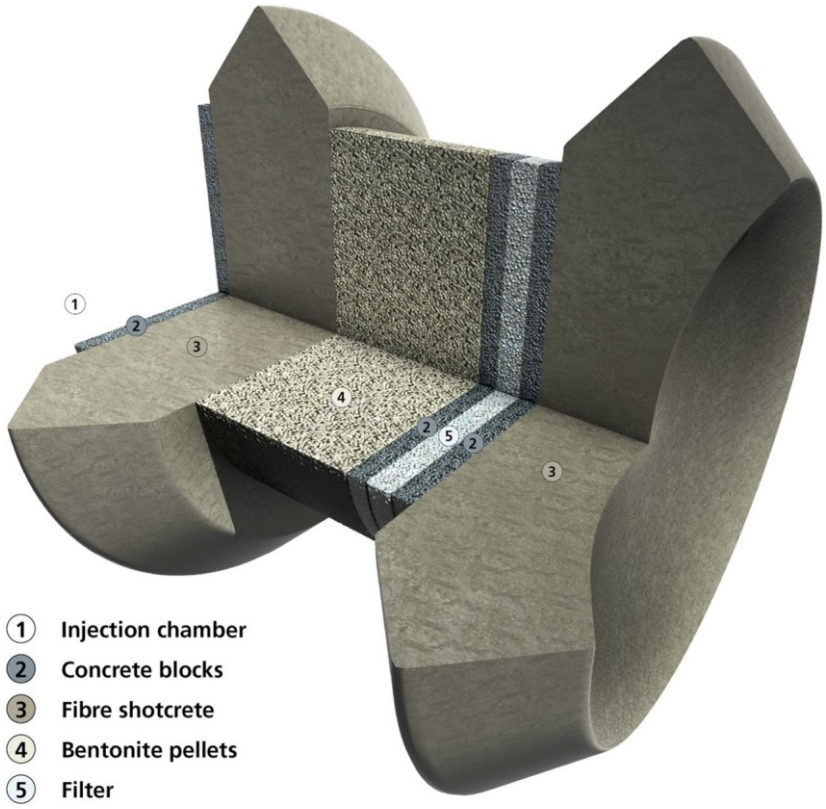
předešlých projektech. Důležitou součástí programu je zhodnocení a návrh metod pro charakterizaci poškozené a ovlivněné oblasti hornin při různých fázích výstavby a provozu HÚ.



Obr. 12 – Schéma oblastí poškozené a ovlivněné části horninového masivu v okolí podzemní chodby (přepracováno dle Siren 2015)

6 Plán experimentů pokročilé fáze provozu PVP Bukov

V pokročilé fázi provozu PVP Bukov (po roce 2025) bude mezi prioritní aktivity patřit především experimentální ověření českého konceptu inženýrských bariér a ostatních komponent úložiště. Zpřesnění konceptu je předmětem rozsáhlého připravovaného programu SÚRAO označovaného jako „Výplně“. Tento program poskytne nezbytná data a informace pro návrh experimentů. Experimenty budou zaměřeny na ověření proveditelnosti, funkčnosti a ceny realizace klíčových komponentů, mezi které patří: buffer (výplň ukládacích vrtů), backfill (výplň chodeb) a zátky (Obr. 13). Jednotlivé dílčí aktivity tohoto programu budou směřovat k realizaci komplexního demonstračního experimentu (prototypového úložiště), který bude syntézou všech znalostí z předcházejících experimentů a měl by jím být zakončen hlavní program provozu laboratoře.



Obr. 13 – Model základních částí in-situ experimentu EPSP (reprezentujícího zátku v HÚ) realizovaného v podzemní laboratoři Josef v rámci projektu DOPAS (Svoboda et al. 2016)

7 Závěr

Tento dokument obsahuje základní popis prioritních oblastí výzkumu, vývoje a demonstračních aktivit pro PVP Bukov na následující roky. Podrobnější popis programu bude předmětem připravovaného strategického dokumentu SÚRAO.

Reference

AUGUSTA J., SLOVÁK J., SMUTEK J., VONDROVIC L., KŘÍŽ P., MAGYAR P (2018): Výstavba a charakterizace Podzemního výzkumného pracoviště Bukov. Tunely a podzemné stavby 2018, 23.–25. 5. 2018 Žilina. s. 11.

BUKOVSKÁ Z., ŠVAGERA O., CHABR T., LEICHMANN J., SOSNA K., SOUČEK K., VAVRO M., ZUNA M., NAVRÁTIL P., BOHDÁLEK P., BOŠKOVÁ M., DOBEŠ P., FILIPSKÝ D., FRANĚK J., GALEKOVÁ E., GEORGIOVSKÁ L., HANÁK J., HAVLOVÁ V., HLISNIKOVSKÝ K., HOLECZY D., JANKOVSKÝ F., JAROŠ M., JELÍNEK J., JELÍNEK J., KNÉSL I., KOUCKÁ L., KRYL J., KŘÍBEK B., KUBEŠ M., KUBINA L., KUČERA R., KUKUTSCH R., LAUFEK F., MIXA P., MOZOLA J., NÁSIR M. M., PALÁT J., PATOČKA M., POŘÁDEK P., ROSENDORF T., SOEJONO I., STAŠ L., VAVRO L., VESELOVSKÝ F., VOREL J., WACLAWIK P., WERTICH V., ZAJÍCOVÁ V., ZELINKOVÁ T. (2020): Získání dat z hlubokých horizontů dolu Rožná. Závěrečná zpráva. – MS SÚRAO, TZ 464/2020, Praha.

BUTOVIČ A., ČERVENKA F., KOPŘIVA R., NOHEJL J., FIEDLER F., HAVLOVÁ V., SVOBODA J., PACOVSKÝ J., VAŠÍČEK R., ŠŤÁSTKA J., KOBYLKA D., BITTNAR Z., ČERNÝ R., DRTINOVÁ B., ZAHRADNÍK O., VEVERKA A., BAIERLE T. (2018): Rešerše experimentů pro potřeby PVP Bukov. – MS SÚRAO, TZ 372/2019, Praha.

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 – průběžná technická zpráva. – MS SÚRAO, TZ 71/2016, Praha.

GVOŽDÍK L., KABELE P., ŘÍHA J., ŠVAGERA O., TRPKOŠOVÁ D., VETEŠNÍK A. (2020): Transport radionuklidů z hlubinného úložišť – Testování koncepčních a výpočetních modelů. – MS SÚRAO, TZ 463/2020, Praha

HAGROS, A., MCEWEN, T., ANTTILA, P. & ÄIKÄS, K. (2005): Host Rock Classification Phase 3: Proposed Classification System (HRC-System). Working Report 2005-07, Posiva Oy, Eurajoki, Finland. 180 p.

HAVLOVÁ V. et al. (2015): 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., STAŠ L., ČERNÍK M., MILICKÝ M. (2017): Plán experimentů PVP Bukov pro podporu bezpečnostního rozboru lokality Kraví Hora. – MS SÚRAO, TZ 121/2017, Praha.

HAVLOVÁ V., HOFMANOVÁ E., KOLOMÁ K., TRPKOŠOVÁ D. (2018): Realizace a vyhodnocení LTD III. Experimentu Grimsel Test Site, – MS SÚRAO TZ 345/2018, Praha.

HOKR M. ET AL. (2020): Testování transportních modelů s využitím in-situ zahraničních experimentů. – MS SÚRAO, TZ 481/2020, Liberec.

KABELE P., ŠVAGERA O., SOMR M., NEŽERKA V., ZEMAN J. (2018). Mathematical modeling of brittle fractures in rock mass by means of the DFN method. Final report. – MS SÚRAO, TZ 286/2018, Praha.

KOBYLKA D. (2019): Optimalizace vzájemné vzdálenosti UOS. – MS SÚRAO, TZ 135/2017, Praha.

KOTNOUR P., DOBREV D., GONDOLLI J., KÁRNÍK D., KOUŘIL M., STOULIL J., MATOUŠEK J., LOVECKÝ M., ŠIK J., MACÁK P., PECHMANOVÁ E., KŘÍŽOVSKÝ M., MALINA J., MATAL O., ŽALOUDEK J., VÁVRA M., ČERMÁK J., KRÁL L. (2019): Výzkum a vývoj ukládacího obalového souboru pro hlubinné ukládání vyhořelého jaderného paliva do stádia realizace vzorku 3. etapa. – MS SÚRAO, TZ 411/2019, Praha.

LÖFGREN M., NILSSON K. (2020): Task description of Task 9B – Modelling of LTDE-SD performed at Äspö HR. SKB report P-17-30. Dostupné z: https://www.skb.se/publikation/2495657/P-17-30.pdf.

POSPÍŠKOVÁ I.Vokál A., Vondrovic L., Dusílek P., Dvořáková M., Hanusová I., Kováčik M., Vencl M., Vokál A., Woller F. (2015): Střednědobý plán výzkumu a vývoje pro potřeby umístění hlubinného úložiště v ČT 2015 – 2025. – MS SÚRAO, TZ 1/2015, Praha.

POSPÍŠKOVÁ I., ZEMAN J., KUCHOVSKÝ T., LEICHMANN J., MELICHAR R., ŘÍČKA A., KRÁSNÝ O., ŽÁČEK M., ŠOUREK J., ČERNÝ M. (2020a): Posouzení využitelnosti dat z RD&D programu v PVP Bukov. – MS SÚRAO, TZ 488/2020, Praha.

POSPÍŠKOVÁ I., ZEMAN J., VOZÁR M., KRÁSNÝ O., ŠOUREK J., KUCHOVSKÝ T., LEICHMANN J., MELICHAR R., ŘÍČKA A., NOHEJL J., OUBRAM J., ŽÁČEK M., ČERNÝ M., PTICEN F. (2020b): Posouzení experimentálního plánu PVP Bukov a odhad nákladů na jeho realizaci. – MS SÚRAO, TZ 494/2020, Praha.

POSPÍŠKOVÁ I., ZEMAN J., ŽÁČEK M., KUCHOVSKÝ T., LEICHMANN J., MELICHAR R., ŘÍČKA A., KRÁSNÝ O., ŠOUREK J., VOZÁR M., OUBRAMOVÁ L., ČERNÝ M. (2020c): Technické a ekonomické zhodnocení potenciálu PVP Bukov. – MS SÚRAO, TZ 496/2020, Praha.

POSPÍŠKOVÁ I., VOZÁR M., ZEMAN J., KRÁSNÝ O., ŽÁČEK M., NOHEJL J., OUBRAM J., KUCHOVSKÝ T., LEICHMANN J., MELICHAR R., ŘÍČKA A., ŠOUREK J., ČERNÝ M. (2020d): SWOT analýza a CBA analýza PVP Bukov. – MS SÚRAO, TZ 501/2020, Praha.

POSPÍŠKOVÁ I., ZEMAN J., ŽÁČEK M., KRÁSNÝ O., KUCHOVSKÝ T., LEICHMANN J., MELICHAR R., ŘÍČKA A., ŠOUREK J., VOZÁR M., NOHEJL J., OUBRAM J. ČERNÝ M. (2020e): Celkové zhodnocení využití potenciálu PVP Bukov v procesu přípravy hlubinného úložiště. – MS SÚRAO, TZ 502/2020, Praha.

SIREN, T. (2015): Excavation damage zones, fracture mechanics simulation and in situ strength of migmatitic gneiss and pegmatitic granite at the nuclear waste disposal site in Olkiluoto, Western Finland. Dissertation thesis. Aalto University. ISBN 978-952-60-6517-5. Dostupné z: https://aaltodoc.aalto.fi/handle/123456789/18518.

SOLER J. M., NERETNIEKS I., MORENO L., LIU L., MENG S., SVENSSON U., TRINCHERO P., IRAOLA A., EBRAHIMI H., MOLINERO J., VIDSTAND P., DEISSMANN G., ŘÍHA J., HOKR M., VETEŠNÍK A., VOPÁLKA D., GVOŽDÍK L., POLÁK M., TRPKOŠOVÁ D., HAVLOVÁ V., PARK D-K, JI S-H, TACHI Y., ITO T. (2017): Evaluation and modelling report of Task 9A based on comparisons and analyses of predictive modelling results for the REPRO WPDE Experiments, SKB report R-17-1. Dostupný z: https://www.skb.com/publication/2493045/R-17-10.pdf.

SPOLEČNOST „ČVUT-SATRA-MOTT MACDONALD CZ“. (2016): Studie realizace výzkumného programu PVP Bukov, část II: Technicko-ekonomická studie. – MS SÚRAO, TZ 62/2016, Praha.

STEINOVÁ J., BURKARTOVÁ K., MIKEŠ J., ZUNA M., ČERNÍK M. (2019): Mikrobiální screening PVP Bukov a dolu Rožná - závěrečná zpráva projektu. – MS SÚRAO, TZ 382/2019, Praha.

STEINOVÁ J., ZUNA M., ČERNÁ K. (2021): Mikrobiologický monitoring vybraných vod PVP Bukov a dolu Rožná – závěrečná zpráva projektu. – MS SÚRAO, TZ 547/2021, Praha.

SVOBODA J., PACOVSKÝ J., DVOŘÁKOVÁ M., HANUSOVÁ I., VEČERNÍK P., TRPKOŠOVÁ D. (2016): DOPAS EPSP experiment. Geological Society, London, Special Publications, 443, 59-72. Dostupné z: https://doi.org/10.1144/SP443.17.

SVOBODA J., BUTOVIČ A., ZAHRADNÍK O., HAVLOVÁ V. et al. (2019): Aktualizace plánu experimentů v PVP Bukov. – MS SÚRAO, TZ 397/2019, Praha.

SVOBODA. J., VAŠÍČEK R., RUKAVIČKOVÁ L., ŘIHOŠEK J., VEČERNÍK P. (2021): Interakční experiment – Průběžná zpráva etap 7-9 č. 3. – MS SÚRAO, TZ 537/2021, Praha.

VOKÁL A., VONDROVIC L., HAUSMANNOVÁ L., DOHNÁLKOVÁ M., HANUSOVÁ I., AUGUSTA J., KONOPÁČOVÁ K., URÍK J., KOVÁČIK M., VENCL M., POPELOVÁ E., LAHODOVÁ Z., MIKLÁŠ O., MÁČELOVÁ M., SUD J. (2020): Střednědobý plán výzkumu a vývoje SÚRAO pro období 2020-2030. – MS SÚRAO, TZ 525/2020, Praha.

VONDROVIC L., POSPÍŠKOVÁ I., AUGUSTA J., et al. (2016): Studie realizace výzkumného programu PVP Bukov, část I: Technická rozvaha. – MS SÚRAO, Interní technická zpráva, Praha.

ZUNA M., HAVLOVÁ V., JANKOVSKÝ F., ŠVAGERA O., KRYL J., ZELINKOVÁ T., HOLEČEK J., SOSNA K., KOŘALKA S., GVOŽDÍK L. (2020): Výzkum puklinové konektivity v PVP Bukov - Průběžná zpráva č. 2. – MS SÚRAO, TZ 521/2020, Praha.

SÚRAO | SPRÁVA ÚLOŽIŠŤ RADIOAKTIVNÍCH ODPADŮ | NAŠE BEZPEČNÁ BUDOUCNOST

info@surao.cz | **www.surao.cz**