

PROGRAM VÝZKUMU,
VÝVOJE A
DEMONSTRAČNÍCH
AKTIVIT PODZEMNÍHO
VÝZKUMNÉHO
PRACOVISTĚ BUKOV
2023

Autoři: Jan Smutek a kol.

Praha, 2023

NÁZEV ZPRÁVY: Program výzkumu, vývoje a demonstračních aktivit pro Podzemní výzkumné pracoviště Bukov 2023

AUTORSKÝ KOLEKTIV: Jan Smutek, Jaromír Augusta, Markéta Dohnálková, Anna Golubko, Lucie Hausmannová, Lucie Mareda, Michaela Matulová, Ondřej Mikláš, Lukáš Vondrovic.

Bibliografický zápis: Smutek J., Augusta J., Dohnálková M., Golubko A., Hausmannová L., Mareda L., Matulová M., Mikláš O., Vondrovic L. (2023): Program výzkumu, vývoje a demonstračních aktivit pro Podzemní výzkumné pracoviště Bukov 2023. TZ 683/2023, SÚRAO, Praha.

Obsah

1	Úvodní informace	9
1.1	Program vývoje a přípravy hlubinného úložiště	9
1.2	RD&D aktivity SÚRAO v podzemních pracovištích	9
1.3	Struktura zprávy	11
2	PVP Bukov	12
2.1	PVP Bukov I	12
2.2	Rekonfigurace infrastruktury dolu Rožná I	14
2.3	PVP Bukov II	15
2.4	Předchozí studie a plány experimentů pro PVP Bukov	18
3	Cíle výzkumného programu PVP Bukov	20
4	Dokončené projekty	23
4.1	Charakterizace I (2013–2017)	24
4.2	EDZ I (2015-2018)	27
4.3	Mikrobiologie I (2017–2019)	29
4.4	Hluboké horizonty (2017–2020)	30
4.5	Hydromonitoring I (2018–2023)	32
4.6	Nedestruktivní geofyzika (2018–2022)	35
4.7	Křehké struktury (2018–2022)	37
4.8	Mikrobiologie II (2020–2021)	38
4.9	Seismika PVP II (2020–2021)	40
4.10	POSIVA FLOW LOG (2022)	42
4.11	Externí projekty	43
4.11.1	GEOSTAB (2017–2021)	43
4.11.2	GEOBARR (2018–2022)	45
5	Probíhající projekty	47
5.1	Interakční experiment (2017–2027)	47
5.2	Puklinová konektivita (2019–2024)	49
5.3	Charakterizace II (2021–2025)	52
5.4	Korozní experiment (2021–2034)	55
5.5	Teplotní monitoring (2021-2025/2030)	57
5.6	EURAD WP MAGIC (2021 – 2024)	59
5.7	Napjatost (2023-2025/2027)	60

5.8	Obrysová trhací práce (2023).....	62
6	Oblasti plánu V&V a stav jejich řešení	64
6.1	Charakterizace horninového prostředí	64
6.1.1	Horninové klasifikační systémy	65
6.1.2	Charakterizace EDZ a EIZ	66
6.2	Migrace látek v horninovém prostředí	67
6.2.1	Procesy advekčně-disperzního transportu.....	69
6.2.2	Procesy difuze.....	71
6.2.3	Modelové koncepce v oblasti proudění podzemních vod.....	72
6.2.4	Nejistoty in-situ transportních parametrů	73
6.2.5	Proudění v EDZ a EIZ	74
6.3	Testování realizace a charakterizace ukládacích vrtů	74
6.4	Inženýrské bariéry HÚ.....	76
6.4.1	Beton se sníženým pH	76
6.4.2	Dlouhodobá laboratoř.....	77
6.4.3	Experimentální studium THM(C) procesů – Experiment HEAT.....	79
6.4.4	Eroze bentonitu a transport koloidů (ERO).....	81
6.4.5	Expanze bufferu do backfillu a zatížení UOS (EXP)	83
6.4.6	Demonstrační experiment prototypového úložiště (DEMO)	84
7	Závěr	87

Seznam a vysvětlení použitých zkratk

ABI	Acoustic Borehole Imaging (metoda zobrazování stěn vrtů pomocí akustické sondy - televizoru)
Äspö HRL	Äspö Hard Rock Laboratory
CCBM	Compact Conical ended Borehole Monitoring (metoda měření napětí s kuželovými tenzometrickými sondami)
CCBO	Compact Conical ended Borehole Overcoring (metoda určení napětí s kuželovými tenzometrickými sondami s jejich obvrtáním – metoda odlehčení vrtného jádra)
DFN	Discrete Fracture Network (puklinová síť)
EDZ	Excavation damage zone (oblast horniny poškozená razicími pracemi)
EdZ	Excavation disturbed zone (oblast horniny narušená razicími pracemi)
EIZ	Excavation influenced zone (oblast horniny ovlivněná razicími pracemi)
ERT	Electric resistivity tomography (elektrická odporová tomografie)
HÚ	Hlubinné úložiště
Plán V&V SÚRAO 2020	Technická zpráva SÚRAO č. 525/2020: Střednědobý plán výzkumu a vývoje SÚRAO pro období 2020-2030
OBI	Optical Borehole Imaging (metoda zobrazování stěn vrtů pomocí optické sondy - televizoru)
PVP Bukov	Podzemní výzkumné pracoviště Bukov
RAO	Radioaktivní odpady
RD&D	Research, development and demonstration (výzkum, vývoj a demonstrace)
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 výzkum
VJP	Vyhořelé jaderné palivo

Abstrakt

Tato zpráva popisuje dokončené, probíhající a plánované aktivity v PVP Bukov. Jedná se o aktualizaci první verze dokumentu z roku 2021 (TZ SÚRAO 546/2021). Od počátku provozu PVP Bukov je experimentální plán SÚRAO naplňován realizací jednotlivých zakázek/projektů. První část dokumentu se soustředí na popis všech jednotlivých dokončených a probíhajících experimentů, s vysvětlením jejich základní vazby na program přípravy hlubinného úložiště. Druhá část zprávy popisuje stav řešení oblastí plánu výzkumných prací, které jsou již částečně v řešení (jsou naplňovány prostřednictvím probíhajících zakázek) anebo se u nich předpokládá potřeba nové zakázky (je plánován nový nebo doplňující experiment). První dvě oblasti obsahují popis aktivit týkajících se charakterizace horninového masivu a migrace látek v horninovém prostředí. Nejobsáhlejší je oblast experimentů související s inženýrskými bariérami HÚ. Do této oblasti spadají aktivity, které řeší například kompatibilitu konstrukčních materiálů s materiály ukládacího systému. Nově je v dokumentu uvedeno konkrétní doporučené technické řešení in-situ experimentů s výstavbou modelů ukládacích míst. Blíže je také popsán demonstrační experiment, kterým by měl být zakončen hlavní program provozu laboratoře.

Klíčová slova

Hlubinné úložiště, HÚ, PVP Bukov, RD&D program, bentonit, horniny krystalinika, inženýrská bariéra, buffer, backfill.

Abstract

This report provides a description of the completed, ongoing and planned activities at the Bukov Underground Research Facility (URF). The document consists of an update of the first version of the document, which was compiled in 2021 (TZ SÚRAO 546/2021). Since the commencement of the operation of the Bukov URF, SÚRAO's experimental plan has been fulfilled via the completion of various contracts/projects. The first part of the document provides a description of all the Bukov-related experiments, both completed and ongoing, accompanied by an explanation of their links to the Czech deep geological repository (DGR) programme. The second part of the report describes the situation regarding the fulfilment of those areas of the research work plan that have already been partially addressed (via ongoing contracts) and for which the requirement for new contracts is assumed (new or additional experiments are planned). The first two areas include a description of the research activities related to the characterisation of the rock mass and the migration of substances within the rock environment. The most comprehensive field of experiments concerns the research of the engineered barriers of the future DGR including, for example, the compatibility of the planned structural materials with the materials to be used in the disposal system. The document also addresses a specific technical solution that has been recommended for the conducting of in-situ experiments involving the construction of models of the disposal spaces. The document also provides a detailed description of a demonstration experiment, which will conclude the main experimental programme at the laboratory.

Key words

Deep geological repository, DGR, Bukov URF, RD&D programme, bentonite, crystalline rock, engineered barrier, buffer, backfill.

1 Úvodní informace

1.1 Program vývoje a přípravy hlubinného úložiště

Jednou z hlavních odpovědností Správy úložišť radioaktivních odpadů (SÚRAO) dle Koncepce nakládání s VJP a RAO je program 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. Vyvíjené technické řešení českého HÚ bylo inspirováno švédským konceptem KBS-3, který je přizpůsobován pro potřeby českého prostředí (Hausmannová et. al 2023). České HÚ bude situováno do krystalinika Českého masivu.

V rámci tohoto rozsáhlého programu SÚRAO provádí potřebné výzkumné, vývojové a demonstrační aktivity. Konkrétní popis těchto aktivit je obsahem Střednědobého plánu výzkumu a vývoje SÚRAO pro období 2020-2030 (dále uváděn jako Plán V&V SÚRAO 2020; Vokál et al. 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.

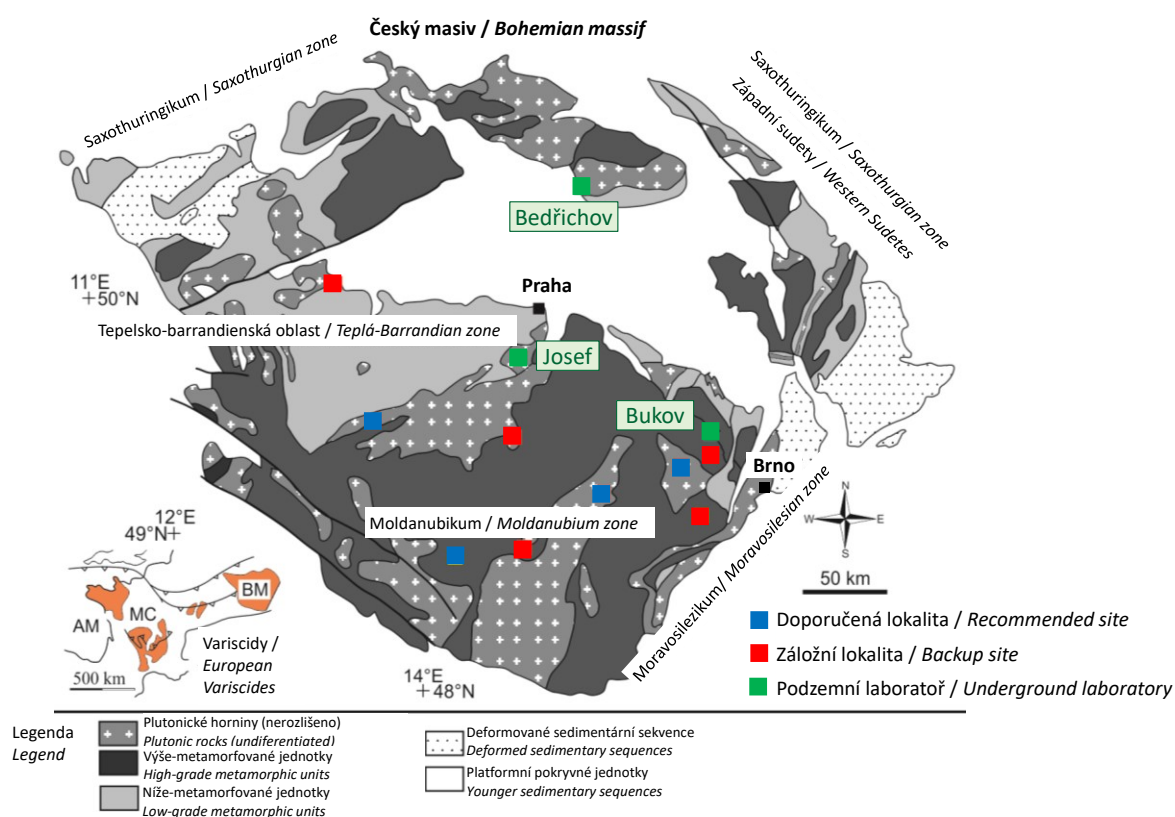
1.2 RD&D aktivity SÚRAO v podzemních pracovištích

Pro vývoj a výzkum v oblasti příprav hlubinných úložišť ve světě je specifické, že se nelze obejít bez dat získaných v odpovídajícím horninovém prostředí a je nutné realizovat in-situ experimenty v podzemních výzkumných laboratořích/pracovištích. Od zahájení programu vývoje a přípravy hlubinného úložiště v ČR v 90. letech 20. století SÚRAO postupně získává metodické zkušenosti z participace na projektech v zahraničních podzemních laboratořích (např. Grimsel Test Site, Schneeberger et al. 2019) a postupným využíváním pracovišť v ČR.

ČR se inspirovala u předních států s nejpokročilejšími programy vývoje hlubinného ukládání a následuje ověřený postup přípravy HÚ, jehož nezbytnou součástí je provádění RD&D programu ve vlastních generických podzemních pracovištích. Přestože základní přístup geologického ukládání v hlubinných úložištích založený na multibariérovém konceptu je stejný pro všechny státy, konkrétní technická řešení připravovaných úložišť se liší v závislosti na místních podmínkách (přírodní, ekonomické, politické) a radionuklidovém inventáři v daném státu. Pro vývoj a testování vlastního technického řešení jsou nezbytné generické podzemní laboratoře, které jsou využívány v brzkých fázích příprav hlubinných úložišť a často jsou realizovány v jinak nevyužívaných, již existujících podzemních prostorách, nebo alespoň využívají existující infrastrukturu podzemního díla, čímž dochází k velké úspoře investičních prostředků pro jejich výstavbu a provoz. Generické laboratoře se nenachází poblíž budoucího HÚ a jejich účel je jiný než u laboratoří specifických (z angl. termínu: *site-specific*, OECD-NEA 2013) testujících místní podmínky konkrétní potenciální horninové formace pro výstavbu HÚ, nebo podzemních prostorů uvnitř komplexu HÚ. Hlavním cílem generických laboratoří je

včasná příprava a prověření vlastního technického řešení tak, aby byl projekt výstavby HÚ ve finální lokalitě realizovatelný v plánovaném časovém horizontu.

Program SÚRAO byl v ČR v minulosti realizován v tunelu Bedřichov (Hokr et al. 2018) a podzemní laboratoři Josef (Svoboda et al. 2016, Štáštka et al. 2020). Zmínit lze také lokalitu Melechov, která sice není podzemní laboratoří, ale obsahuje síť hlubokých vrtů z povrchu a byla tak vhodná pro výzkum vlastností hornin krystalinika pomocí povrchových metod a měření ve vrtech (Rukavičková et al. 2006, Komulainen et al. 2019). Pro co největší přiblížení se reálným podmínkám budoucího HÚ u in-situ experimentů bylo vybudováno Podzemní výzkumné pracoviště (PVP) Bukov, které se nachází v hloubce přibližně 500 m. Na Obr. 1 jsou vyznačeny pozice zmiňovaných podzemních pracovišť společně s doporučenými a záložními lokalitami pro HÚ.



Obr. 1 – Geologická mapa Českého masivu s vyznačením kandidátních lokalit pro HÚ a podzemních laboratoří

K prokázání využitelnosti finální lokality pro HÚ z pohledu dlouhodobé bezpečnosti bude v budoucnu nutné sestavit věrohodný model predikující vývoj navrženého ukládacího systému (Mikláš et al. 2023). Tento model bude sloužit k prokázání, že při očekávaném vývoji hlubinného úložiště v dlouhodobém časovém horizontu nedojde k většímu ozáření reprezentativní osoby (zahrnující veškeré expoziční cesty) než 0,25 mSv/rok (dle V. 378/2016 Sb. § 18 (1) a Z. 263/2016 Sb. § 82 (1)). Součástí souboru modelů jsou pak geologický, tektonický, hydrogeologický, geomechanický, geochemický a THMC modely. K vývoji modelovacích nástrojů a ověřování jejich funkčnosti je potřeba využívat dostupná a nejvíce relevantní data, nejlépe z in-situ měření. V období realizace prací ve finální lokalitě HÚ musí být již dostupný vlastní komplexní systém modelovacích nástrojů, které jsou v současné době ve světě ve fázi vývoje. Správnost a spolehlivost těchto nástrojů pro dlouhodobou predikci

vývoje HÚ musí být prověřena s předstihem. Jedinou možností včasného získání relevantních dat pro tyto modely je využití generických pracovišť.

V rámci souboru studií realizovaných v roce 2020 bylo provedeno zhodnocení jaká data jsou potřeba, ověření možnosti jejich získání v různých podzemních pracovištích a posouzení jejich relevance pro program českého HÚ (Pospíšková et al. 2020a). Analýze byly podrobeny zahraniční podzemní laboratoře Äspö HRL, Mizunami, Onkalo, Grimsel Test Site, dále české podzemní laboratoře Josef a Bedřichov, včetně testovací lokality Melechov, a to vše ve srovnání s PVP Bukov. Pracoviště byla porovnávána ve smyslu možnosti získání dat k sestavení věrohodných modelů a získání dat ve vazbě k prokázání technické proveditelnosti HÚ. Z provedeného rozboru vyplynulo, že v PVP Bukov je možné získat ucelený soubor nezbytných dat k sestavení a ověření modelů k prokázání dlouhodobé bezpečnosti a k ověření proveditelnosti technického konceptu HÚ.

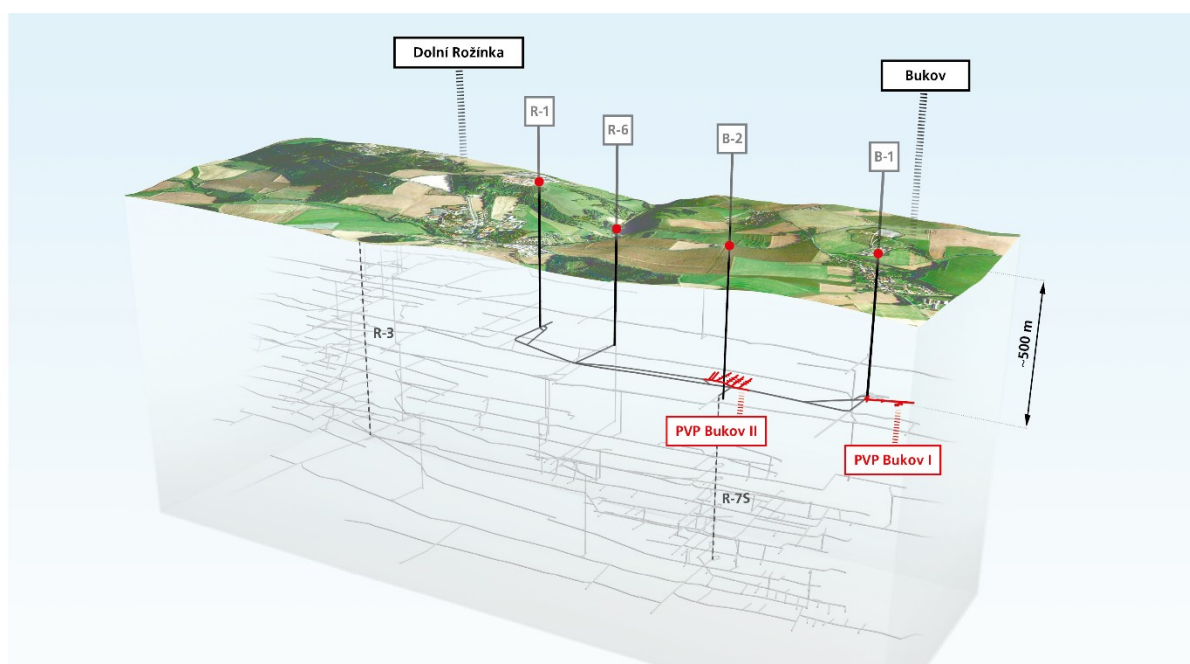
1.3 Struktura zprávy

Tato zpráva je dále členěna na kapitoly s následujícím obsahem:

- Kap. 2: PVP Bukov – popis laboratoře a dolu Rožná I, přehled předchozích plánů experimentů pro PVP Bukov a dalších realizovaných studií.
- Kap. 3: Popis cílů PVP Bukov.
- Kap. 4: Přehled dokončených projektů – základní popis vazby projektů k HÚ, jejich cílů a výsledků.
- Kap. 5: Přehled probíhajících projektů – základní popis vazby projektů k HÚ, jejich cílů a průběžných výsledků.
- Kap. 6: Oblasti plánu V&V a stav jejich řešení.

2 PVP Bukov

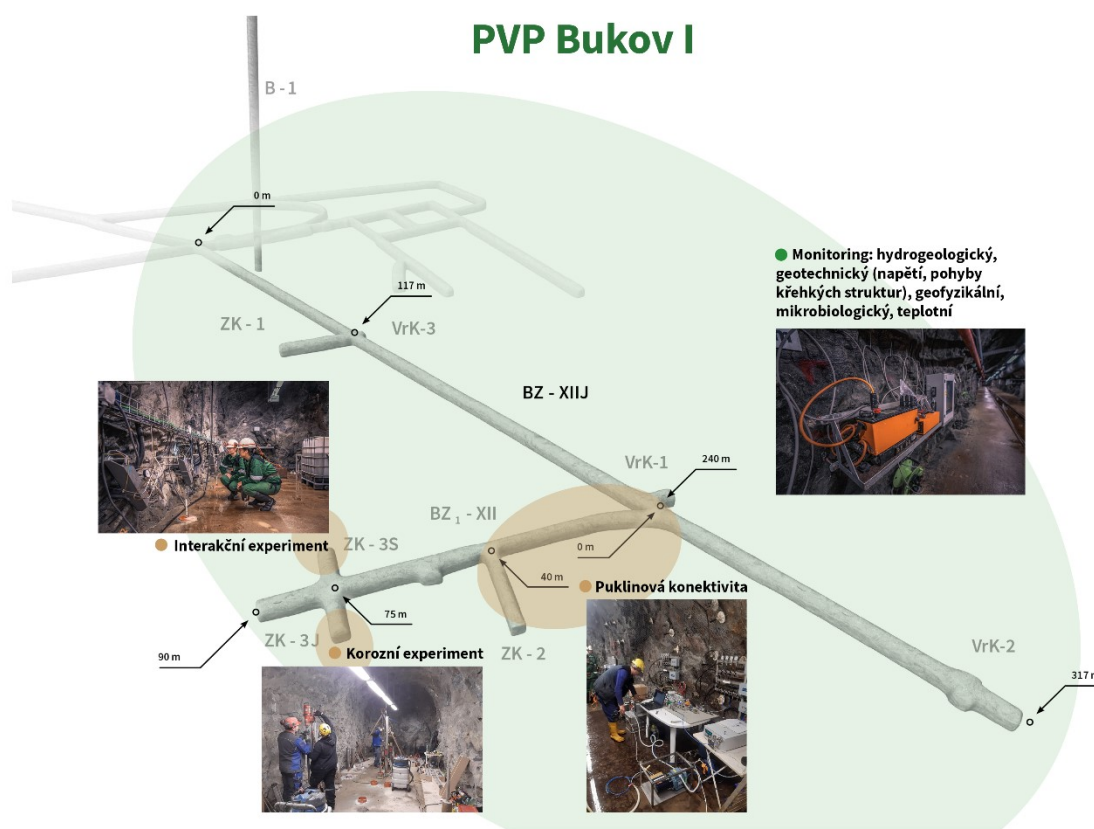
Podzemní laboratoř se nachází uvnitř komplexu bývalého uranového dolu Rožná I na jeho 12. patře (Obr. 2). Systém podzemních chodeb postupně vznikl od 50. let 20. století, kdy byla na lokalitě zahájena těžba uranové rudy. Těžba byla ukončena v roce 2017. První část podzemní laboratoře (PVP Bukov I) zprovozněná v roce 2017 se nachází u jámy B-1 pod obcí Bukov. Kromě první zprovozněné části laboratoře je v současnosti ražen nový systém laboratorních chodeb (PVP Bukov II). Ten se nachází v blízkosti jámy B-2 a jeho pozice byla určena na základě vhodných geologických podmínek, zjištěných vrtným průzkumem, a příhodných technologických podmínek pro realizaci budoucích experimentů. Za výstavbu laboratoře a následné zajištění jejího provozu, jakožto i návazné infrastruktury dolu, je zodpovědná společnost DIAMO s.p., o.z. GEAM.



Obr. 2 – Schéma důlního komplexu s vyznačením pozice PVP Bukov I

2.1 PVP Bukov I

Podzemní prostory vybudované v rámci I. etapy výstavby laboratoře (PVP Bukov I) se nacházejí v úrovni 12. patra dolu v hloubce cca 525 m pod povrchem (Obr. 2). Ražba PVP Bukov I probíhala od roku 2013 a dílo bylo kompletně dokončeno v roce 2017, kdy bylo předáno do užívání a byla zahájena experimentální fáze. PVP Bukov I obsahuje celkem 470 m chodeb (Obr. 3), které jsou využívány pro experimentální činnosti. Pozice laboratoře v rámci dolu Rožná I je patrná z Obr. 2.



Obr. 3 – Schéma laboratorních chodeb PVP Bukov I se zobrazením pozic klíčových experimentů

Z hlediska geologické stavby se laboratoř nachází ve vysoce metamorfovaných horninách vulkano-sedimentárního komplexu, který je tvořen převážně migmatity, amfibolity a pararulami. Litologický typ byl stanoven petrografickou analýzou v rámci projektu Charakterizace I (Bukovská et al. 2017). Studované vzorky z jádrových vrtů doložily, že se jedná především o biotitické, amfibol-biotitické a amfibolické migmatity. Byly zde pozorovány žilky pegmatitů a granitů. V puklinách a zlomech vzniklých v důsledku tektonických poruch v celém metamorfovaném komplexu se pak vyskytují hydrotermální žíly tvořené především kalcity, křemennými a křemen-albit-adulárovými minerály. Také byly potvrzeny projevy hydrotermální alterace horniny, hlavně tedy sericitizace a kaolinizace živců. V návaznosti na stanovení petrografického typu byla provedena geochemická charakterizace daného prostředí. Hlavními složkami v tomto komplexu hornin jsou SiO_2 , stabilní Al_2O_3 a K_2O . Dále zde lze nalézt MgO , CaO , TiO_2 i oxidy železa. Mezi pozorované stopové prvky patří Ta, Th, Nb, P, Ti a Sr. Hlavními prvky v karbonátových žilách jsou pak Ca, Mg, Fe a Mn. Vzhledem ke zvolené pozici laboratoře, nejsou laboratorní chodby kříženy žádnými strukturami s uranovými minerály.

Pro účely získání informací o typu, chemickém složení a proudění podzemních vod byla vybudována síť hydrogeologických monitorovacích stanic. V průběhu ražby PVP I docházelo k výkyvům přítoků a poklesům jejich vydatnosti. V mělkých částech komplexu dolu Rožná I (vyšší patra) převládá voda typu Ca-HCO_3 , v hlubším krystaliniku pak Na-HCO_3 . Dále zde byl potvrzen i výskyt vody typu Ca-SO_4 . Z pohledu duktilní tektoniky lze v prostředí PVP Bukov I pozorovat převrácení dvou regionálních metamorfních foliací. Z pohledu křehké tektoniky byly v oblasti identifikovány systémy dvou dominantních skupin křehkých struktur s pohybovými indikátory.

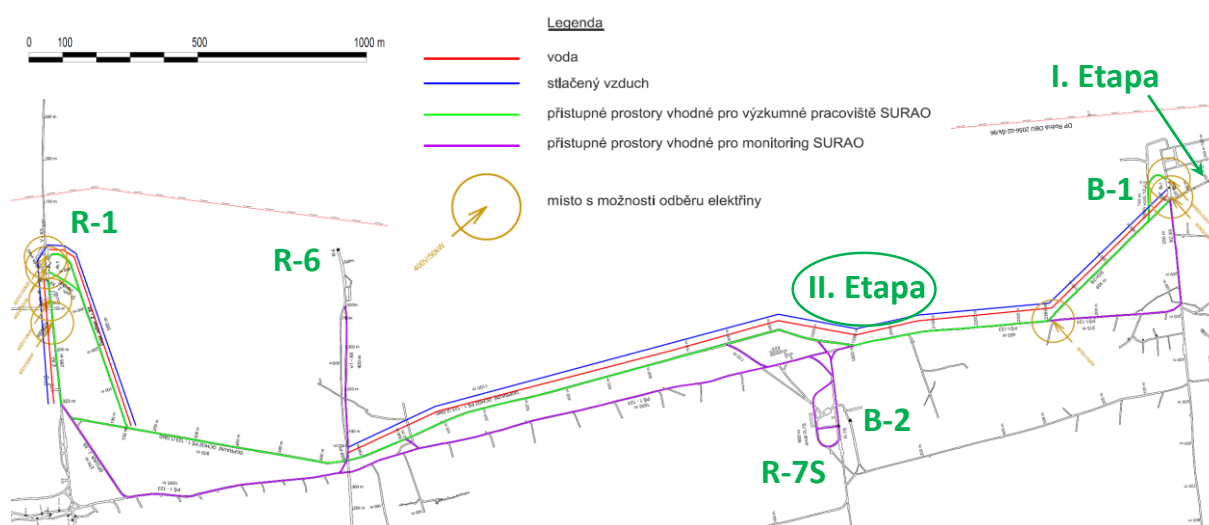
Laboratoř se skládá z 300 m dlouhého přístupového překopu, který byl vytvořen konvenčním způsobem ražby, a kratších děl, která byla ražena metodou hladkého výlomu (Augusta et al. 2018). Přístupový překop je ve velké části opatřen TH obloukovou výztuží se zapažením stropů a boků. V případě potřeby byla pro stabilizaci stěn použita svorníková výztuž v kombinaci s tahokovem či pletivem a v některých místech na kříženích chodeb stříkaným betonem. Laboratorní chodby jsou bez obloukové výztuže a v místech s nepříhodnými směry puklinových systémů byly použity sklolaminátové svorníky.

2.2 Rekonfigurace infrastruktury dolu Rožná I

Po ukončení aktivních těžebních činností v roce 2017 pokračoval provoz podzemního díla v původním režimu, kdy byl udržován přístup na důlní patra pod úrovní laboratoře, a to až na 24. patro do hloubky 1200 m, odkud byla čerpána důlní voda. Přístup do těchto pater byl využíván v rámci několika projektů (Bukovská et al. 2020, Stemberk et al. 2022) a byla tak získávána unikátní data, která umožnila studovat změny vlastností hornin s narůstající hloubkou pod povrchem.

V letech 2019 až 2020 si SÚRAO nechala vypracovat řadu externích srovnávacích studií, které měly za cíl porovnat, zda je pro naplnění výzkumného a experimentálního plánu nezbytné nadále investovat do provozu PVP Bukov, nebo zda by bylo efektivnější získat nezbytná data jiným způsobem, např. v zahraničních podzemních pracovištích. Provedené technickoekonomické studie měly za cíl porovnat varianty provozu dolu a vyřešit otázku, jestli pokračovat ve stávajícím nákladném režimu provozování celého důlního díla nebo provést jednorázové investice do úpravy infrastruktury v omezeném prostoru s porovnáním ekonomické stránky variant. Výsledkem bylo doporučení pokračovat v navazujícím provozu PVP Bukov za podmínky jeho optimalizace. Výsledky studií jasným způsobem demonstrovaly, že je potřebné pokračovat v experimentech na PVP Bukov a investovat do změn v konfiguraci provozu dolu. Finální, ekonomicky nejvýhodnější a technicky proveditelné řešení, obnášelo zatopení spodních pater dolu, až po úroveň 13. patra, se zachováním provozu čtyř jam (R-1, R-6, B-2 a B-1). Mezi výrazné investiční zásahy tohoto řešení patřily především změny ve stávajícím kaskádním systému čerpání důlních vod na povrch.

V návaznosti na vyhodnocení výše zmíněných studií byla k datu 1.7.2020 uzavřena nová smlouva o spolupráci při provozu PVP Bukov. Smlouva celkově pokrývá zajištění provozu do roku 2030 s opcí do roku 2035. V průběhu let 2020 až 2022 byly provedeny práce, jejichž výsledkem bylo snížení počtu provozovaných jam ze 6 na 4 jámy. V březnu 2021 bylo ukončeno čerpání vod na 24. patře a v jamách R-7S a R-3 je monitorováno stoupání hladiny vody. V prostoru jámy R-7S je v hloubce cca 60 m pod úrovní 12. patra připravena nová čerpací stanice, odkud budou vody po nastoupání hladiny čerpány přes jámy R-1 a B-1. Rekonfigurační práce kompletně dokončené ke konci roku 2022 obnášely dále například výměnu některých výtlačných řadů, rekonstrukci trafostanice u jámy B-1, částečnou rekonstrukci hladinové čerpací stanice R-1 nebo řešení ohřevu vtažných větrů a úpravu šachetní budovy jámy B-1. Základní přístup do důlního komplexu je nyní zajištěn už pouze na 12. patro do oblasti mezi jámami R-1 a B-1 (Obr. 4).

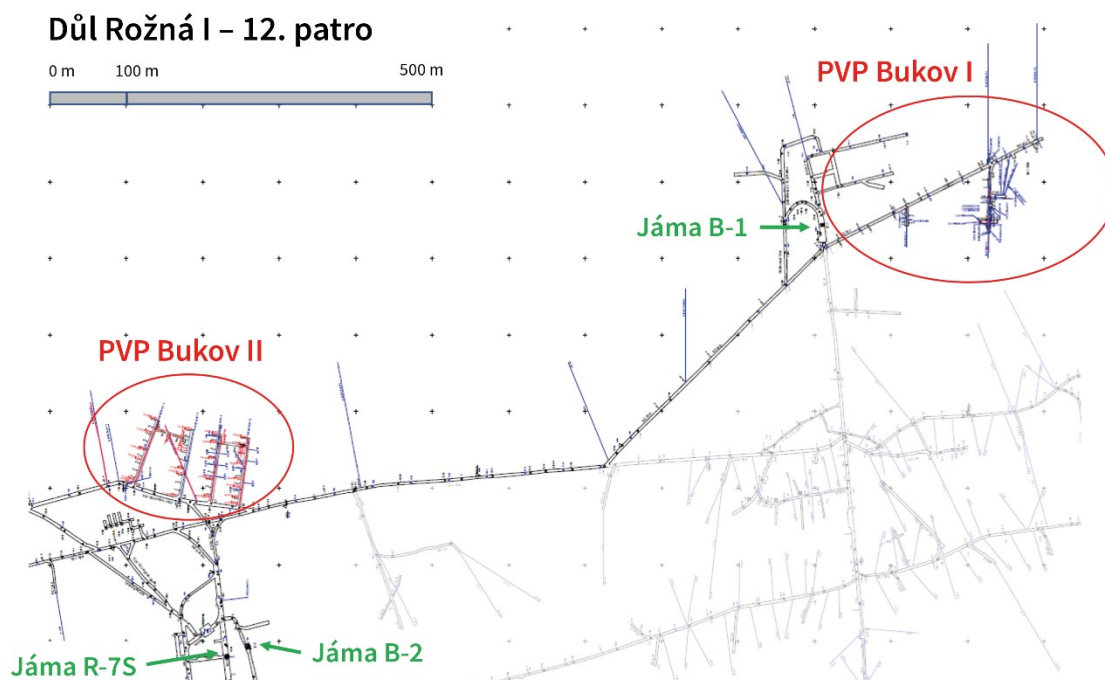


Obr. 4 – Mapa provozované části 12. patra dolu

2.3 PVP Bukov II

Protože pro naplnění výzkumného programu SÚRAO byly stávající prostory PVP Bukov I nedostatečné, byla naplánována ražba nového komplexu laboratorních chodeb (PVP Bukov II). Tuto novou část bylo rozhodnuto umístit do oblasti východně od jámy B-2, resp. R7-S (Obr. 2, Obr. 4). Lokalizace byla provedena na základě provedeného vrtného průzkumu.

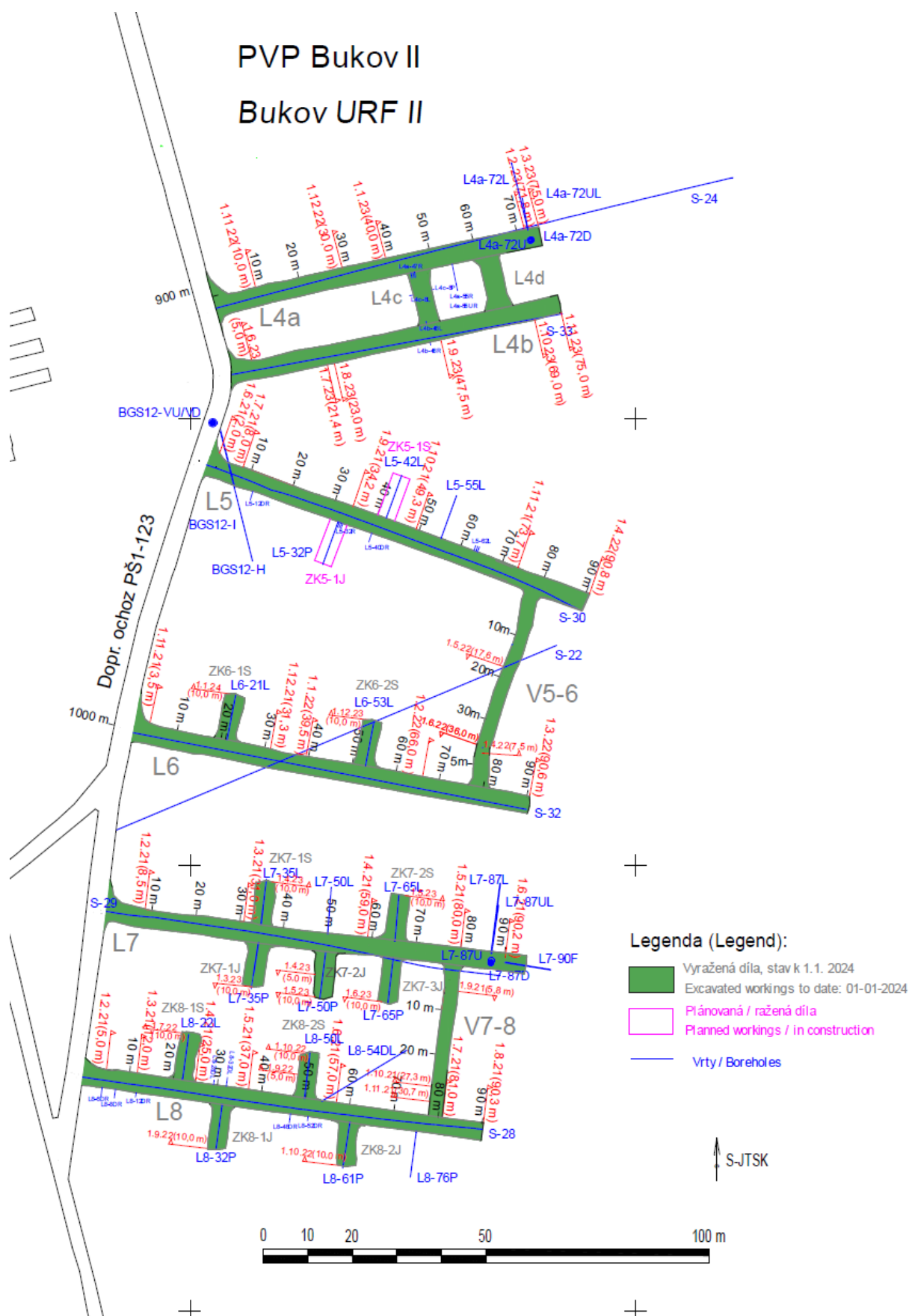
V plánovaných místech pro umístění PVP II byly potvrzeny vhodné geologické podmínky a velkou výhodou je i blízkost jámy B-2, která díky svému širokému profilu může být použita pro transport nadrozměrných nákladů do podzemí. To může být využito pro demonstrační experimenty, které je v plánu realizovat v pokročilé fázi provozu laboratoře. Oblast je vyznačena na Obr. 4, který zobrazuje mapu části 12. patra v oblasti mezi jámami R-1 a B-1 se zvýrazněním chodeb, které zůstanou v budoucnu přístupné a bude je možné využít pro výzkumné aktivity (například zřízení monitorovacích stanic). Mapa na Obr. 5 pak zobrazuje oblast 12. patra mezi jámami B-1 a B-2 s vyznačením PVP Bukov I a PVP Bukov II.



Obr. 5 - Mapa části 12. patra dolu Rožná I mezi PVP Bukov I a PVP Bukov II

Plán nového komplexu chodeb obnáší ražbu šesti laboratorních chodeb (délka každé chodby do 90 m), z kterých jsou následně raženy desetimetrové zkušební komory. Délky zkušebních komor vycházejí z délek důlních děl, které lze větrat přirozeným větrným proudem bez nutnosti instalace separátního větrání. Podle předešlých zkušeností je taková komora dostatečná a vhodná pro poskytnutí technologického zázemí pro experiment i realizaci jádrových vrtů. Navržený komplex dále obsahuje větrací chodby, které propojují dvojice laboratorních chodeb a umožňují vytvořit průchozí větrný proud. Určování lokalizace zkušebních komor probíhá průběžně s ražbou a závisí na dané geologické stavbě v rámci laboratorní chodby. V maximálním rozsahu bylo uvažováno o umístění až 24 zkušebních komor.

V druhé polovině roku 2020 proběhla realizace pilotních průzkumných vrtů, nacházejících se v osách plánovaných laboratorních chodeb a v lednu 2021 byly zahájeny ražby prvních dvou laboratorních chodeb. Finální uspořádání vzniklého systému chodeb PVP Bukov II je na Obr. 6. V mapě je vyznačen stav ražeb k datu 1.1.2024 s vyznačením chybějících děl. Předpokládané dokončení všech ražeb je po prvním kvartálu roku 2024. Následovat budou práce na vystrojení laboratorních chodeb s předpokládaným dokončením ve čtvrtém kvartálu 2024.



Obr. 6 – PVP Bukov II

2.4 Předchozí studie a plány experimentů pro PVP Bukov

První studie realizace experimentálního plánu pro PVP Bukov byla zpracována v roce 2015 v období ražeb PVP Bukov I (Havlová et al. 2015). Tato studie obsahovala návrh monitorovacích, výzkumných a experimentálních prací v pěti základních oblastech, které se staly základem členění výzkumného a experimentálního plánu SÚRAO (viz VEP1 až VEP5 Tabulka 1). V následujícím roce byl tento program rozšířen při zpracování technické rozvahy a technicko-ekonomické studie o další 2 témata: VEP6 a VEP7 (Vondrovic et al. 2016; Společnost „ČVUT-SATRA-Mott MacDonald CZ“ 2016). V roce 2017 pak byla provedena první aktualizace plánu experimentů z roku 2015 ve smyslu využití PVP Bukov pro podporu bezpečnostního rozboru blízko situované kandidátní lokality pro HÚ Kraví Hora (Havlová et al. 2017).

Tabulka 1 - Oblasti výzkumného a experimentálního plánu SÚRAO pro PVP Bukov

Oblast programu SÚRAO	Zkrácený název	Cíle
VEP1	Charakterizace	Vývoj metodik popisu horninového prostředí. Sběr popisných geologických dat, jejich uložení do databází a interpretace ve formě 3D modelů.
VEP2	Monitoring	Testování a vývoj metod dlouhodobého monitoringu procesů probíhajících v horninovém masivu (hydrogeologie, tektonika, mikrobiologie, seismická apod.). Vývoj nedestruktivních geofyzikálních metod.
VEP3	Transport	Výzkum proudění podzemních vod a transportu radionuklidů v horninovém prostředí. In-situ testy ve vrtech. Vývoj a testování modelovacích nástrojů.
VEP4	Inženýrské bariéry THMC procesy	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	EDZ	Vývoj a testování metod pro charakterizaci poškozené (EDZ) a narušené/ovlivněné (EdZ, EIZ) oblasti hornin v okolí podzemních prostor.
VEP6	Technologické postupy	Vývoj nových konstrukčních postupů výstavby podzemních děl (vrtné a razicí práce, injektáže, zajištění výrubu při prostupu přes poruchové zóny).
VEP7	Demonstrační experimenty	Komplexní experimenty testující chování prvků ukládacího systému v reálném měřítku a podmínkách v HÚ. Testování technologií pro manipulaci, konstrukce experimentálních modelů a monitoring procesů.

Aby při plánování konkrétních experimentů nedocházelo k neúčelnému opakování aktivit v minulosti již realizovaných v jiných podzemních laboratořích, byla v roce 2018 zpracována rešerše experimentů z ostatních podzemních laboratoří nacházejících se v horninách

krystalinika (Butovič et al. 2018). Cílem rešerše bylo zpracovat přehledný dokument s nejdůležitějšími experimenty doposud realizovanými v podzemních laboratořích Äspö HRL, Whiteshell, Grimsel Test Site a Onkalo. U každého experimentu bylo zhodnoceno, zda jsou jeho výsledky relevantní pro potřeby českého HÚ a zda je případně vhodné experiment zopakovat v podmínkách ČR (v PVP Bukov) a konkrétně pak v období následujících 10 let. Výstupem této práce byla pak druhá aktualizace plánu experimentů, která reflektovala výsledky rešerše (Svoboda et al. 2019).

V roce 2020 byly společnostmi AFRY vypracovány externí studie (Pospíšková et al. 2020e), které měly za cíl:

- posoudit využitelnost dat z RD&D programu v PVP Bukov (Pospíšková et al. 2020a),
- posoudit experimentální plán PVP Bukov a provést odhady nákladů na jeho realizaci (Pospíšková et al. 2020b),
- zhodnotit technický a ekonomický potenciál laboratoře (2020c),
- provést SWOT a Cost Benefit Analýzy (Pospíšková et al. 2020d).

SÚRAO bere doporučení obsažená ve vypracovaných studiích v potaz a nadále s danými informacemi pracuje.

Podkladem pro návrh aktivit v rámci důležité oblasti VEP4 zabývající se také inženýrskými bariérami z bentonitu je Shrnutí výzkumu českých bentonitů pro hlubinné úložiště – do roku 2018 (Hausmannová et al. 2018) a dokument popisující doporučení pro plán výzkumu a vývoje v této oblasti zpracovaný experty z AINS GROUP a Posiva Solutions (Kumpulainen et al. 2018). Konkrétní řešení experimentů je pak obsahem technické zprávy zpracované v roce 2023 (Svoboda et al. 2023).

V roce 2020 byla také pod vedením Posiva Solutions zpracována studie obsahující doporučení pro monitorovací a výzkumný program doprovázející výstavbu komplexu II. etapy PVP Bukov. Prvním výstupem studie byl report se shrnutím zkušeností z laboratoří Äspö HRL, Onkalo a dalších laboratoří, zhodnocením aktivit realizovaných při výstavbě I. etapy PVP Bukov a doporučením pro II. etapu (Aaltonen et al. 2020). Druhý výstup byl zaměřen na zhodnocení technologie ražby I. etapy PVP Bukov a návrh její optimalizace na základě zkušeností z ražeb podzemních chodeb v lokalitě Onkalo (Lehtola a Aaltonen 2020).

V roce 2021 byla specialisty SÚRAO zpracována technická zpráva č. 546/2021 (Smutek et al. 2021) s popisem plánu experimentů s vysvětlením vazeb na program HÚ.

3 Cíle výzkumného programu PVP Bukov

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

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

a) Získání dat pro kalibraci a validaci modelů a verifikaci softwarových nástrojů

V současné fázi výběru lokality pro HÚ je potřeba 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 modelů jsou geologický, tektonický, hydrogeologický, geomechanický, geochemický a THMC modely.

Dle Bezpečnostního návodu SÚJB BN-JB-2.4 (SÚJB, 2021) je doporučeno validovat matematické modely pomocí experimentálních dat. Níže jsou uvedeny experimenty v PVP Bukov rozdělené do oblastí, které jsou či budou využity pro kalibraci a/nebo validaci matematických modelů (Mikláš 2023):

- Životnost UOS
 - Pilotní korozní experiment (kap. 5.4)
 - Navazující experiment se zaměřením na korozivzdornou ocel jakožto materiál vnitřního pouzdra UOS (bude-li zhodnocen jako potřebný)
- Evoluce bentonitových bariér
 - Interakční experiment (kap. 5.1)
 - Dlouhodobá laboratoř (kap. 6.4.2)
 - Experiment HEAT (kap. 6.4.3), EXP (kap. 6.4.4) a DEMO (kap. 6.4.6)
- Transport hostitelskou horninou
 - Výzkum proudění v EDZ a EIZ (kap. 6.2.5)
 - Eroze bentonitu a transport koloidů (kap. 6.4.4)
 - Vývoj modelových koncepcí v oblasti proudění podzemních vod (kap. 6.2.3)
 - Ověřování přístupů hodnotících propagaci nejistot in-situ transportních parametrů (kap. 6.2.4)
- Šíření teploty
 - Teplotní monitoring (kap. 5.5)
 - Experiment HEAT (kap. 6.4.3) a DEMO (kap. 6.4.6)
- Geomechanický
 - Výzkum měření napjatosti v PVP Bukov II (kap. 5.7)

b) Testování a demonstrace uvažovaných technických řešení

Druhým cílem je otestování v současnosti uvažovaných technických řešení pro HÚ v odpovídající hloubce pod povrchem v přesně popsáném geologickém prostředí.

Jedná se například o dlouhodobé sledování koroze materiálů pro UOS (kap. 5.4), testování migračních vlastností hornin nebo testování stability těsnících bariér.

c) Vývoj a ověření metodik studia horninového prostředí

Třetí cíl obnáší přípravu a otestování metodik studia a popisu horniny 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 nebo popisu izolační části hlubinného úložiště a kritických horninových rozhraní.

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.

Konkrétněji definované cíle programu PVP Bukov byly v Plánu V&V SÚRAO 2020 (Vokál et al. 2020), který uvádí následující oblasti, na něž by se měly výzkumné práce zaměřit:

1) Stanovení přenositelnosti poznatků získaných z povrchových částí horninového prostředí PVP Bukov do hlubinných částí pro predikci vlastností lokalit v hloubce úložiště

Tato oblast cílů 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 a klasifikace horninového masivu HÚ. Pro tyto potřeby je využíváno archivních podkladů z doby provozu dolu Rožná I a jednotlivé zakázky poskytují různé druhy informací o geologických, hydrogeologických, geomechanických a dalších vlastnostech horninového masivu a je tak průběžně rozšiřován a upřesňován celkový obraz. Nejvíce relevantních dat bylo doposud získáno při projektech Charakterizace I (kap. 4.1) a Hluboké horizonty (kap. 4.4). Dále probíhají aktivity za účelem získání dat pro vývoj a zpřesňování transportních modelů horninového prostředí. Kromě hydraulických testů a monitoringu, relevantních pro tvorbu a kalibraci hydraulického modelu, jsou získávána data pro vývoj metodiky modelování puklinových sítí a zapracování migračních parametrů do transportních modelů (kap. 5.2). Pro tyto účely je využíváno jak laboratorních experimentů, tak in-situ testů a monitoringu (in-situ migrační experimenty, monitoring napětí v masivu apod.).

2) Zhodnocení vývoje mikrobiální aktivity (původní i zanesené) na základě monitoringu

První informace na toto téma přinesl projekt Mikrobiologie I (kap. 4.3). Mikrobiální aktivita je také sledována v Interakčním experimentu (kap. 5.1). Další směřování tohoto tématu přinesl projekt Mikrobiologie II (kap. 4.8). Tento projekt se soustředil na zhodnocení složení mikrobiálního osídlení vod v anaerobních podmínkách a interpretaci vzhledem k jejich složení a hydrochemickým podmínkám v zaplavených monitorovacích vrtech. Na základě doporučení je tato oblast výzkumu nadále vždy už

vázána na jiné konkrétní experimenty a není řešena odděleně. Příkladem je probíhající Korozní experiment (kap. 5.4), kde je také sledována mikrobiologická aktivita.

3) Ověření šíření tepla v úložišti od zdrojů simulujících VJP

Pro projektové řešení HÚ je klíčové ověření šíření tepla v úložišti se zdroji simulující zbytkové teplo generované VJP, které ovlivňuje dimenzování podzemních chodeb a ukládacích vrtů. Pro naplnění tohoto cíle jsou v plánu in-situ experimenty popsány v kap. 6.4.3.

4) Ověření predikce transportu mobilních radionuklidů v izolační části úložiště

Pro ověření predikce transportu mobilních radionuklidů v izolační části úložiště je určen program experimentů zaměřený na studium advektivního a difuzního transportu látek. Tento program bude naplňován pomocí stopovacích testů s neaktivními i aktivními látkami (kap. 6.2).

5) Ověření vlastností materiálů UOS v reálných podmínkách horninového prostředí

Program pro ověření vlastností materiálů ukládacího obalového souboru v reálných podmínkách horninového prostředí byl již zahájen a je předmětem Korozního experimentu (kap. 5.4).

6) Ověření predikce THMC procesů v reálných podmínkách úložiště

V souvislosti s ověřením predikce THMC procesů v reálných podmínkách úložiště budou navrženy zvláštní in-situ experimenty, které budou naplánovány na základě požadavků na získání konkrétních dat pro matematické modelování. Tyto požadavky jsou definované v kapitole Plánu V&V SÚRAO 2020 v části popisující výzkumnou podporu hodnocení bezpečnosti HÚ.

7) Ověření vlivu ražebních postupů na rozsah poškození horniny (EDZ) a izolační schopnosti horniny

Poslední cíl se týká ověřování vlivu ražby podzemních prostor na rozsah poškozené oblasti hornin v okolí podzemních chodeb. Toto téma je řešeno průběžně a nejvíce relevantních informací přináší charakterizační a výzkumné aktivity doprovázející výstavbu nových laboratorních chodeb PVP Bukov II. Část prací je řešena v projektu Charakterizace II (kap. 5.3) a dle potřeb je v plánu provést doplňující experimenty (kap. 6.1.2).

4 Dokončené projekty

Tato kapitola obsahuje přehled dokončených projektů v PVP Bukov. Ke každému projektu je vždy uvedeno vysvětlení vazby k programu HÚ, cíle projektu, způsob řešení a vybrané výsledky. Přehled všech dokončených projektů financovaných SÚRAO je obsahem Tab. 2. Uvedeny jsou dále i dokončené externí projekty financované jinými programy, které také využívaly PVP Bukov (Tab. 3).

Tabulka 2 - Přehled dokončených projektů SÚRAO v PVP Bukov

Název projektu/zakázky SÚRAO	Pracovní označení projektu	Období realizace	Hlavní dotčená oblast programu SÚRAO	Technické zprávy (TZ) SÚRAO
Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Charakterizace I	2013 - 2017	VEP1	191/2017 (Bukovská et al. 2017), 221/2018 (Souček et al. 2018)
Vznik a monitoring EDZ při výstavbě PVP Bukov	EDZ I	2015 - 2018	VEP5	351/2019 (Staš et al. 2019)
Mikrobiální screening PVP Bukov a dolu Rožná	Mikrobiologie I	2017 - 2019	VEP2	382/2019 (Steinová et al. 2019)
Získání dat z hlubokých horizontů dolu Rožná	Hluboké horizonty	2017 - 2020	VEP1	464/2020 (Bukovská et al. 2020)
Hydrogeologický a hydrochemický monitoring podzemních a důlních vod v prostoru PVP Bukov	Hydromonitoring I	2018 - 2023	VEP2	679/2023 (Vylamová et al. 2023)
Dlouhodobé monitorování horninového masivu v PVP Bukov nedestruktivními geofyzikálními metodami	Nedestruktivní geofyzika	2018 - 2022	VEP2	636/2022 (Bárta et al. 2022)
Monitoring aktivity křehkých struktur PVP Bukov a dolu Rožná	Křehké struktury	2018 - 2022	VEP2	640/2022 (Stemberk et al. 2022)
Monitoring anaerobního mikrobiálního osídlení PVP Bukov a rešerše vztahů horninového prostředí a mikrobů	Mikrobiologie II	2020 - 2021	VEP2	547/2021 (Steinová et al. 2021), 552/2021 (Černá et al. 2021)

Zjištění prostorové homogenity prostředí před provedením trhacích prací pomocí seismické tomografie	Seismika PVP II	2020 – 2021	VEP1	548/2021 (Chabr et al. 2021)
Posiva Flow Log measurements in four boreholes at the Bukov underground research facility in the Czech Republic	POSIVA FLOW LOG	2022	VEP3	646/2022 (Komulainen et al. 2023)

Tabulka 3 - Přehled externích realizovaných projektů v PVP Bukov

Název projektu/zakázky	Pracovní označení projektu	Období realizace	Hlavní dotčená oblast programu SÚRAO	Reference
Rozvoj geotechnických a geofyzikálních metod pro získání 2D a 3D obrazu geologické stavby (externí projekt)	GEOSTAB	2017 - 2021	VEP2	https://starfos.tacr.cz/cs/projekty/FV20294
Dlouhodobý výzkum geochemických bariér pro ukládání jaderného odpadu	GEOBARR	2018 - 2022	VEP1	ÚGV MUNI. 2023

4.1 Charakterizace I (2013–2017)

Název zakázky: Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov

Řešitelé: Česká geologická služba; Ústav Geoniky Akademie věd ČR v.v.i.; ÚJV Řež, a. s.; SG Geotechnika, a.s.

Vazba k programu HÚ

Při ražbě podzemních prostor HÚ bude nutné aplikovat v praxi ověřené metody charakterizace horninového masivu. Vzhledem ke specifičnosti podzemního díla, jakým je HÚ, je nutné přizpůsobit v současnosti běžně používané charakterizační metody. Ražba podzemních prostor PVP Bukov poskytla reálné podmínky pro testování těchto metod.

Cíle

- Provedení multidisciplinárního zhodnocení vlastností horninového prostředí PVP Bukov a dalších částí dolu Rožná I.
- Získání dat a informací zjistitelných pouze v průběhu ražby nebo krátce po vytvoření nových podzemních chodeb, například o redistribuci in-situ napětí.
- Popsání změn vlastností masivu s hloubkou pod povrchem (například chemismus a stáří podzemních vod).
- Vytvoření sítě bodů pro dlouhodobé monitorování vybraných parametrů horniny (například geostatická napjatost nebo hydrogeologické parametry).

- Vytvoření 3D modelů prostředí (geologické, strukturně-geologické nebo geomechanické).

Způsob řešení

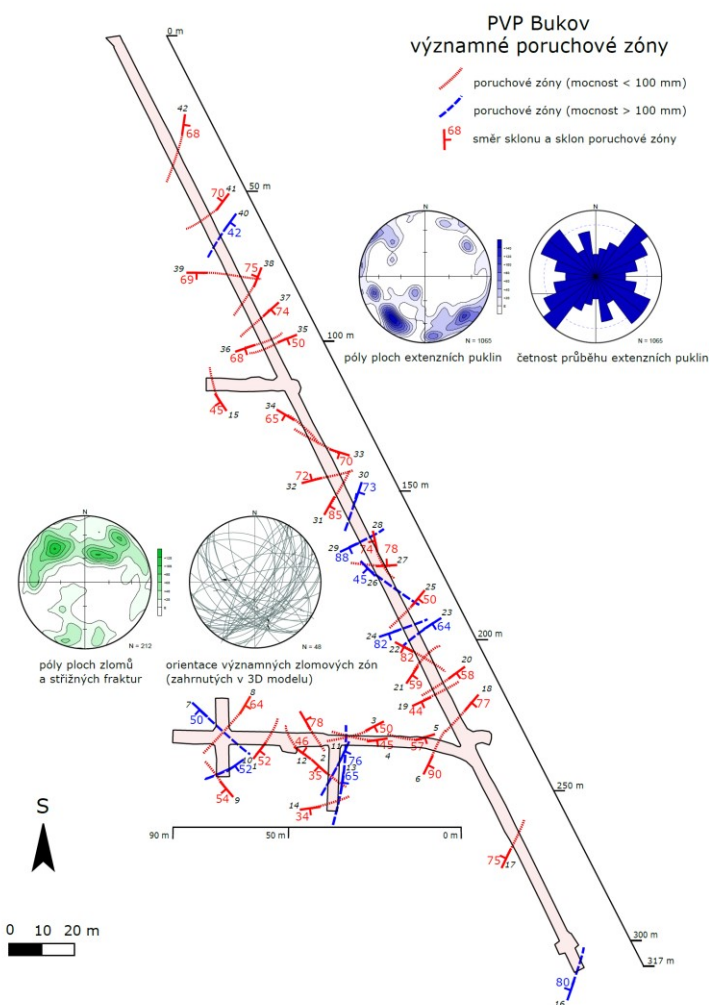
- Aplikace metod rozdělených na oblast geologickou (Bukovská et al. 2017) a oblast geotechnickou (Souček et al. 2018).
- Provedení analýzy petrologického a mineralogického složení hornin včetně charakteristiky minerálních výplní tektonických zón a odhadu teplotně-tlakových podmínek metamorfního vývoje, zhodnocení petrofyzikálních vlastností hornin, spektrální analýza vrtných jader a radiometrické datování hlavních geologických procesů. Komplexní strukturní analýza prvků duktilní a křehké tektoniky včetně aplikace metody anizotropie magnetické susceptibility. Hydrogeologické mapování a stanovení transportních charakteristik hornin. Tvorba strukturně-geologického a geomechanického modelu.
- Laboratorní a terénní práce geotechnické oblasti pro stanovení a zhodnocení fyzikálně-mechanických vlastností hornin, odebraných z boků důlních děl, z vrtů a z povrchových lokalit. Stanovení napětového stavu a přetvárného chování horninového masivu metodami hydraulického štěpení stěn vrtů (hydrofracturingu), Goodman Jack a CCBO, resp. CCBM. Dlouhodobá periodická tenzometrická a konvergenční měření. Stanovení kvality horninového masivu dle indexových geomechanických klasifikací RQD, RMR a Q. Posouzení vlivu technické a důlně indukované seismicity na zájmový horninový masiv.

Výsledky

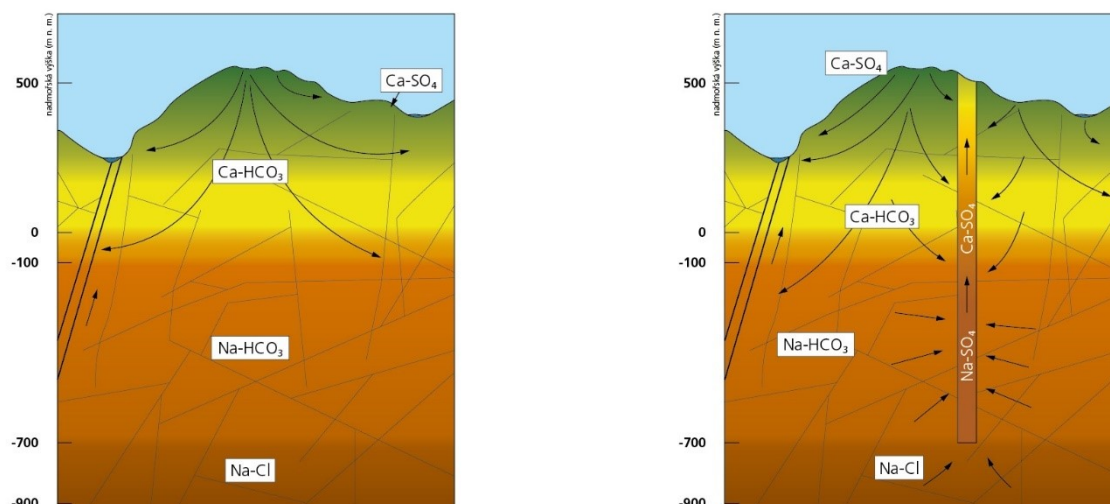
- Prostředí vykazuje vysokou variabilitu geologických vlastností vhodných pro realizaci experimentů. V oblasti se nachází migmatizované biotit-amfibolické pararuly s polohami amfibolitů, amfibolických a biotitických migmatitů s variabilní intenzitou migmatizace. V migmatitech je častá přítomnost žil a žilek a horniny v okolí poruch nesou znaky sekundárních mineralizací. Z hlediska geochemického a mineralogického složení byly horniny interpretovány jako původní část vulkanosedimentárního komplexu se střídáním poloh bazických až intermediálních hornin. Analýza chemického složení sekundárních mineralizací a výplní tektonických zón ukázala, že se jedná o produkty alteračních procesů.
- Měření magnetické susceptibility vzorků prokázalo předpokládanou anizotropii vůči směrům foliace horniny. Z pohledu duktilní tektoniky bylo možné pozorovat převrácení dvou původních regionálních metamorfních folií. Z hlediska křehké tektoniky byly identifikovány dvě dominantní skupiny křehkých struktur s pohybovými indikátory (zlomy a střížné pukliny, Obr. 7).
- Výzkum typů podzemních vod ve vertikálním profilu lokality (od povrchu do hloubky až 1200 m) prokázal změny chemismu s hloubkou s přechodem od vod typu Ca-SO_4 , přes Ca-HCO_3 a Na-HCO_3 až k Na-Cl (Obr. 8). Opakované odběry vod z přítoků do chodeb PVP Bukov po dobu 2,5 let odhalily posun ve složení vod z typu Na-HCO_3 na vody se zvýšeným obsahem síranů.
- Laboratorní analýzy transportních parametrů hornin přinesl výsledky ve vztahu k difúzním a sorpčním procesům. Výsledky neprokázaly velký vliv rozdílných litologií a variabilní vnitřní stavby hornin na hodnoty efektivních difúzních koeficientů. Tyto

parametry jsou více závislé na mineralogickém složení a stupni přeměny než na vnitřní anizotropii.

- Aplikací různých metod pro určení napjatosti (hydraulické štěpení, měření ve vrtech pomocí kuželových tenzometrických sond při převrtávání vrtů, analýza konvergenčních měření) byly určeny rozsahy in-situ napětí (max. horizontální napětí 16,5 – 31 MPa, min. horizontální napětí 10–17 MPa).



Obr. 7 - Významné poruchové zóny a pukliny v PVP Bukov I (Bukovská et al. 2017)



Obr. 8 – Schéma vývoje chemického složení a proudění podzemních vod s hloubkou:
 vlevo: v horninovém prostředí krystalinika bez antropogenního zásahu
 vpravo: v horninovém prostředí krystalinika při ovlivnění důlním dílem (Bukovská et al. 2017)

4.2 EDZ I (2015-2018)

Název zakázky: Vznik a monitoring EDZ při výstavbě PVP Bukov

Řešitelé: Ústav Geoniky Akademie věd ČR v.v.i.; Geotest a.s.

Vazba k programu HÚ

Při ražbě podzemních prostor HÚ, především ukládacích chodeb, bude nutné ověřit vlastnosti a rozsahy poškozené a ovlivněné zóny v okolí podzemních chodeb (EDZ a EIZ). V tu dobu bude již potřeba aplikovat spolehlivé a ověřené metody, které jsou v současnosti stále ve fázi vývoje.

Cíle

- Získání dat souvisejících se vznikem a vývojem zóny poškození (EDZ) a ovlivnění (EIZ) okolo podzemního díla a horninové klenby při výstavbě laboratorních chodeb.
- Aplikování různých metod pro určení rozsahů oblastí EDZ/EIZ a porovnání těchto rozsahů u chodeb vytvořených běžným postupem trhacích prací a chodeb realizovaných metodou hladkého výlomu.
- Monitorování změn v napjatosti horniny v oblasti redistribuovaných napětí v okolí chodeb.
- Vytvoření 3D modelu laboratorních prostor pomocí dat z laserového skenování a matematického modelu napěťového pole.

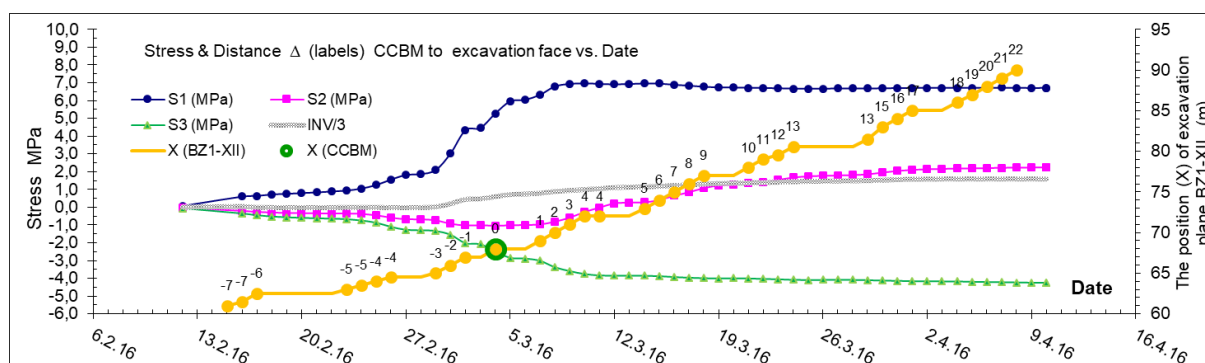
Způsob řešení

- Opakování kampaní elektrické odporové tomografie a seismických měření na vybraných profilech na stěnách laboratorních chodeb pro interpretaci možných změn parametrů oblastí EDZ/EIZ v čase.

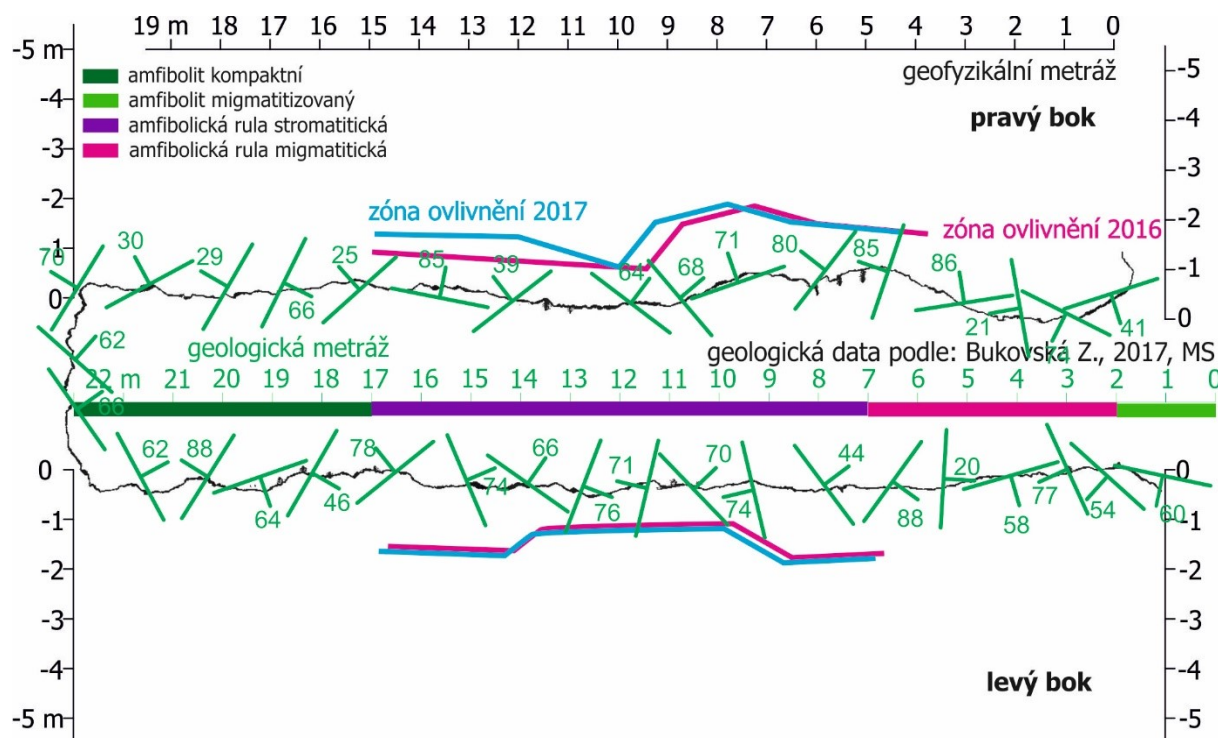
- Určení hodnot hlavních napětí pomocí metody CCBO (odlehčení vrtného jádra) a dlouhodobé monitorování změn napjatosti v hornině pomocí kuželových tenzometrických sond instalovaných do vrtů (metoda CCBM) vytvořených s předstihem a vedených ve směru ražby laboratorních chodeb ve vějířovém uspořádání. Sledování změn v napětí v průběhu pokračující ražby v různých vzdálenostech kolmo od laboratorní chodby (Obr. 9).

Výsledky

- V rámci projektu byla zapracována rozsáhlá rešerše se shrnutím poznatků o vzniku a vývoji EDZ v krystalinických horninách (Vavro et al. 2016).
- Výsledky geofyzikálních měření odhalily oblast, která může být interpretována jako oblast ovlivnění (EIZ). Její hranice byla detekována ve vzdálenosti 0,75 až 1,50 m od stěn chodeb vytvořených hladkým výlomem a až okolo 5 m od stěn v případě hlavní přístupové chodby ražené běžnou metodou trhacích prací. Obr. 10 obsahuje výsledky srovnání opakovaných ERT měření v chodbě ZK-1 a interpretací ovlivnění oblasti.
- Získané zkušenosti potvrdily vysoký stupeň obtížnosti získání dat pro interpretaci oblasti EDZ v anizotropních horninách. Pro určení rozsahu oblasti EDZ musí být použita širší škála metod.
- Výsledky měření metodou CCBO přinesly poměrně velký rozptyl hodnot, a to jak z hlediska magnitud hlavních komponent, tak i jejich orientace. Interpretace měření potvrdila ovlivnění měření přítomností blízkého výrubu, ale i blízkými poruchovými zónami.
- Výsledky monitorování metodou CCBM prokázaly předpokládanou reakci na postup ražby, kdy největší změny v napětí byly registrovány u sond nejbližší ke stěnám chodeb. Dlouhodobý monitoring prokázal, že k postupné redistribuci napětí dochází i dlouho po ukončení aktivního zásahu do masivu (i s ročním odstupem).



Obr. 9 – Příklad průběhu vypočtených napěťových změn vztažených k době a průběhu ražby chodby BZ1-XII (Staš et al. 2019)



Obr. 10 – Interpretace zóny ovlivnění a jejího vývoj mezi lety 2016-2017 z ERT měření v chodbě ZK-1 (Staš et al. 2019)

4.3 Mikrobiologie I (2017–2019)

Název zakázky: Mikrobiální screening PVP Bukov a dolu Rožná

Řešitelé: Technická univerzita v Liberci – Ústav pro nanomateriály, pokročilé technologie a inovace

Vazba k programu HÚ

Uvažované inženýrské bariéry HÚ mohou být ovlivněny mikrobiální aktivitou (mikroby přítomnými v horninovém prostředí nebo v těsnící bariéře z bentonitu). Pro zhodnocení bezpečnosti technického řešení HÚ je nutné znát vliv mikrobiálního osídlení na stabilitu inženýrských bariér. Do té doby je nutné určit metodiky, jak detekovat přítomnost cílových skupin mikroorganismů v horninovém prostředí případně v inženýrských bariérách a jak sledovat jeho vývoj.

Cíle

- Provedení pilotních kampaní odběrů v prostorách PVP Bukov a dalších částí dolu Rožná I pro určení funkční diverzity mikrobiálních společenstev.
- Získání dat pro plánované experimenty zaměřené na výzkum korozního chování materiálů inženýrských bariér.
- Navržení plánu dlouhodobého mikrobiálního monitoringu.

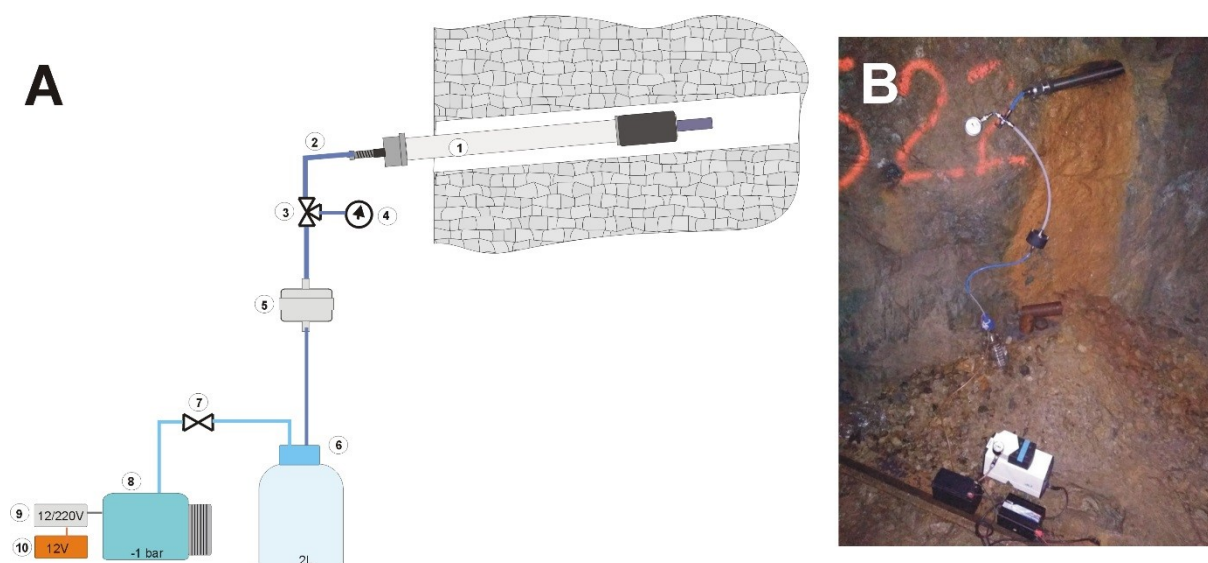
Způsob řešení

- Odběr a analýza vzorků vod a mikrobiálních nárůstů na hornině z oblasti 12. (v oblasti PVP Bukov a jinde) a 24. patra dolu.

- Aplikace molekulárně biologických metod (amplikonová sekvenace oblasti 16S rRNA a qPCR) a kultivačních postupů pro stanovení mikrobiální diverzity.
- Návrh systému s pasivním vzorkovačem pro odběr mikrobiální biomasy z vytékajících vod ze zvodnělých vrtů (Obr. 11).
- Monitorování hydrochemických parametrů vod.

Výsledky

- Mikrobiální diverzita ve studované oblasti je velmi ovlivněna aerobním prostředím důlních chodeb.
- Mezi nejhojněji zastoupené funkční skupiny patří mikroorganismy schopné oxidovat organické látky, sloučeniny železa a síry.
- Obligátně anaerobní mikroorganismy byly detekovány pouze v malém množství, především byly detekovány skupiny schopné oxidovat organické látky, sloučeniny železa a síry.
- Mikrobiální diverzita ve vodách ve studovaných vrtech byla za sledované období (1 rok) relativně stabilní.
- Z hlediska výzkumu stability inženýrských bariér jsou důležité anaerobní mikroorganismy, které nebyly v rámci screeningu dostatečně popsány. Byla proto stanovena doporučení pro pokračující monitoring na síti měřících bodů.



Obr. 11 – Použitý systém pro odběr mikrobiologických vzorků z podzemních vod (Steinová et al. 2019)

4.4 Hluboké horizonty (2017–2020)

Název zakázky: Získání dat z hlubokých horizontů dolu Rožná

Řešitelé: Česká geologická služba (koordinátor projektu); ÚJV Řež, a.s.; Ústav Geoniky AV ČR, v.v.i.; Masarykova univerzita, SG Geotechnika, a.s.; INSET, s.r.o.; DIAMO, s.p.

Vazba k programu HÚ

Podzemní prostory, především ukládací chodby, v HÚ nesmí být protnuty zlomovými strukturami velkého měřítka, protože ty mohou tvořit přímou transportní cestu pro radionuklidy

z ukládacího místa do geosféry a dále do biosféry. Důl Rožná I poskytnul unikátní příležitost pro studium takové zlomové zóny/struktury v různých hloubkových úrovních. Jednalo se o 1. zónu (R1) uranového ložiska (hlavní rudonosná struktura), což je tektonická zóna o mocnosti až 20 metrů přístupná z chodeb v hloubkové úrovni 550 až 1200 m (12.-24. patra dolu).

Cíle

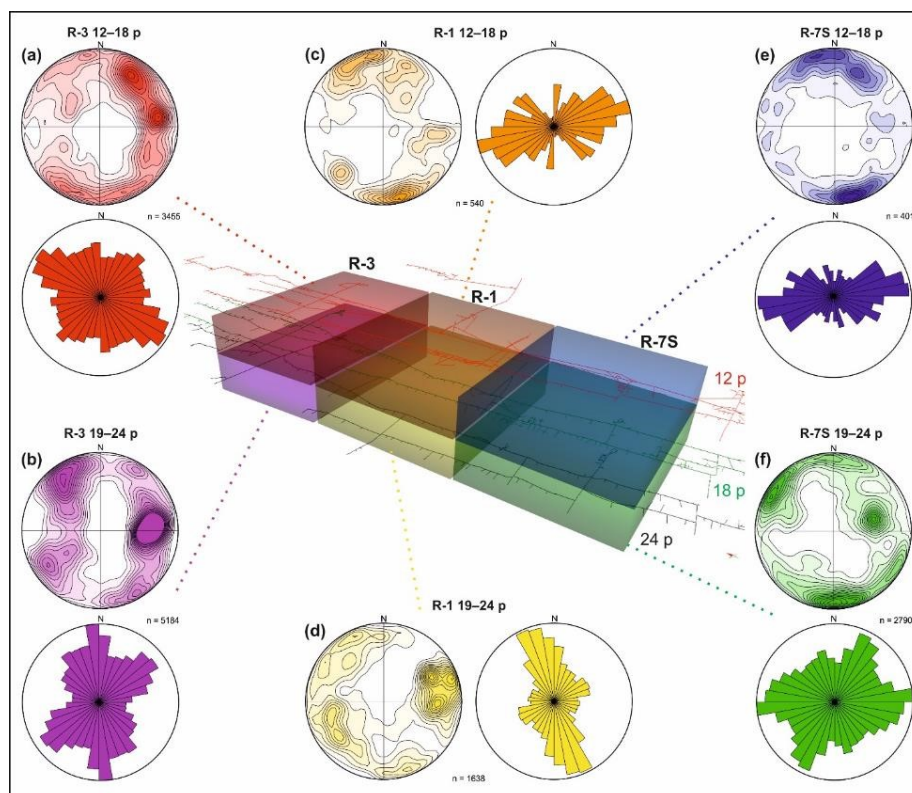
- Popis poruchové/zlomové zóny velkého měřítka reprezentující strukturu, která se nesmí vyskytovat v bezprostřední blízkosti ukládacích prostor v horninovém masivu hlubinného úložiště a jsou klíčové pro jeho bezpečnost.
- Získání informací o prostorové distribuci geologických a geotechnických vlastností horninového prostředí v různých hloubkových úrovních dolu Rožná I (Obr. 12).
- Získání informací o geochemických a transportních vlastnostech horniny.
- Definování jak a do jaké vzdálenosti od poruchové zóny velkého měřítka jsou ovlivněny vlastnosti horninového masivu.
- Rozšíření existující databáze znalostí o místním horninovém prostředí a tím i vědeckého potenciálu podzemní laboratoře.
- Interpretace změn geologických parametrů s hloubkou a získání věrohodných informací z prostředí hornin krystalinika Českého masivu potřebných pro program HÚ.

Způsob řešení

- Studium vlastností poruchové zóny R1 v různých hloubkách.
- Příprava geotechnických stanovišť s výzkumnými vrtty v různých patrech dolu, konkrétně na 12., 18., 20., 21., 22. a 24. patře poblíž zóny R1.
- Aplikace různých metod pro stanovení strukturních, geomechanických a geochemických parametrů horniny v různých vzdálenostech od zóny R1.
- Posouzení a reinterpetace archivních geologických a tektonických znalostí lokality, strukturní dokumentace prvků puklinové sítě a tvorba DFN (Discrete Fracture Network) modelu, ERT a seismická měření na povrchu stěn chodeb a ve vrtech, určení in-situ napjatosti, studium oblastí EDZ/EdZ, laboratorní program na vzorcích hornin.

Výsledky

- Pro získání dat pro tvorbu DFN modelů bylo kromě klasické strukturní dokumentace využito i dat z fotogrammetrických modelů stěn chodeb. Porovnání těchto dvou metod prokázalo, že data z fotogrammetrických modelů mohou být použita pro studium intenzity rozpukání a tvorby spolehlivých DFN modelů.
- Aplikované metody neprokázaly korelaci mezi mechanickými vlastnostmi hornin a hloubkou pod povrchem. Protože heterogenita hornin byla výraznější, než potenciální vliv přítomnosti zóny R1, nebyl zjištěn ani trend změny mechanických vlastností hornin se vzdáleností od této zóny.
- Důležitým zjištěním bylo, že přítomnost zóny R1 ovlivňuje intenzitu rozpukání a celkový počet puklin v hornině v jejím širším okolí. Přechodová oblast (mezi poruchovou zónou a neovlivněnou horninou) se zvýšenou intenzitou rozpukání má rozsah několika desítek metrů a její mocnost v některých případech až několikrát převyšuje mocnost samotné zóny R1.



Obr. 12 - Strukturní diagramy zobrazující prostorové změny orientace křehkých struktur v rámci celé studované části dolu Rožná I (Bukovská et al. 2020)

4.5 Hydromonitoring I (2018–2023)

Název zakázky: Hydrogeologický a hydrochemický monitoring podzemních a důlních vod v prostoru PVP Bukov

Řešitelé: Geotest, a.s.; KOČMAN Envimonitring s.r.o.

Vazba k programu HÚ

Hydrogeologické vlastnosti horninového masivu a hydrochemické vlastnosti podzemní vody jsou klíčové pro bezpečnost HÚ. Důl Rožná I a PVP Bukov poskytuje ojedinělou příležitost studovat vlastnosti krystalinického horninového masivu v různých hloubkových úrovních za pomoci metod, kde je nezbytný přímý přístup k hornině z otevřeného podzemního prostoru. Stáří některých důlních děl (desítky let) také umožňuje určit, jak jsou hydrogeologické a hydrochemické vlastnosti ovlivněny dlouhodobým provozem podzemního díla.

Cíle

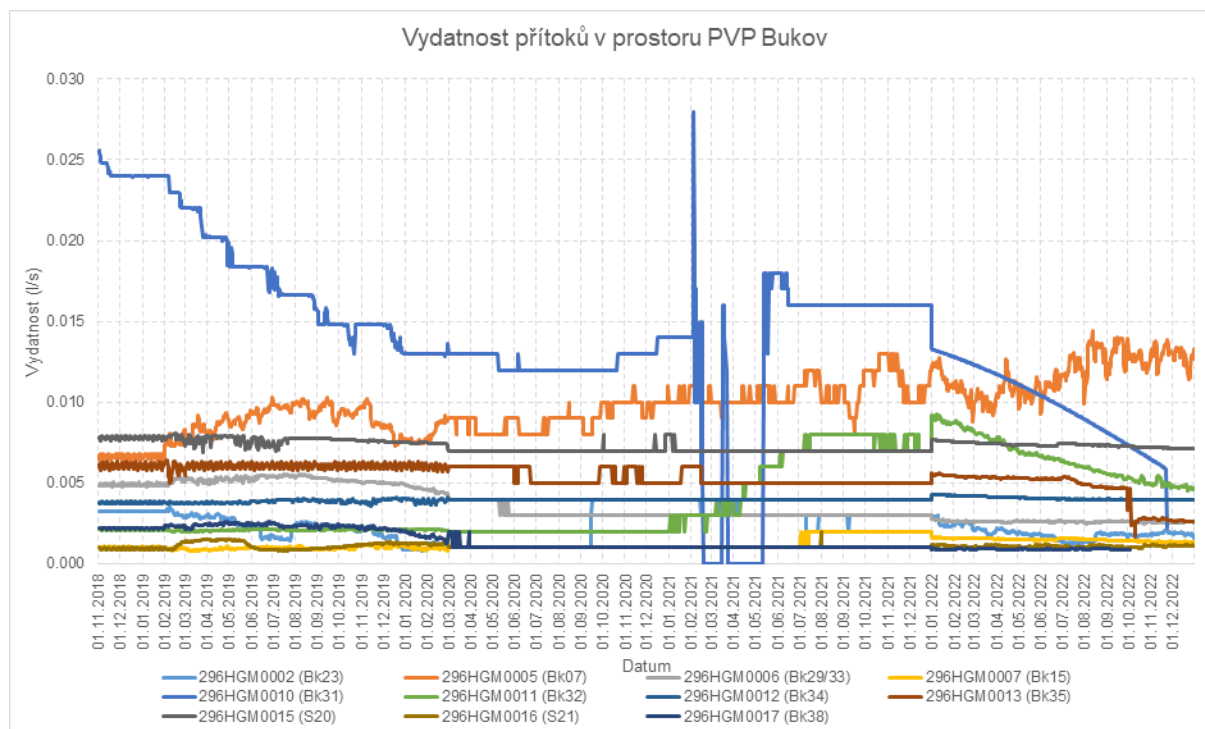
- Získání porozumění o charakteru proudění podzemních vod mělkého i hlubokého oběhu.
- Pokračování v dlouhodobém monitoringu na síti pozorovacích bodů vytvořených během výstavby PVP Bukov I v roce 2015. Výměna nefunkčních zařízení na monitorovacích bodech a zařazení nových bodů.
- Vyhodnocení vývoje chemismu vod na přítocích v podzemních dílech a vývoje vydatnosti přítoků.
- Vyhodnocení parametrů na povrchové lokalitě.

Způsob řešení

- Online monitorování a interpretace přítoků podzemních vod do prostor PVP Bukov I (z otevřených vrtů, puklinových systémů). Měření přítoků z puklinových systémů na stěnách chodeb svedením vod do žlabů a překlopných člunků, měření výtoků z vrtů pomocí průtokoměrů a měření celkového výtoku z PVP Bukov I pomocí parshallova žlabu.
- Opakované odběry vzorků podzemních vod pro analýzy změn chemismu. Analýzy pro určení stáří vod. Vzorkování na síti bodů nacházejících se i mimo laboratorní prostory na 12. patře v jiných přístupných důlních dílech (do roku 2020 i v hlubších patrech až po 24. patro odpovídající hloubce 1200 m).
- Monitorování parametrů vod na síti observačních bodů na povrchu nad úrovní PVP Bukov a v jeho širším okolí.

Výsledky

- Monitorované přítoky vod do prostor laboratoře vykazují velmi malé sezónní fluktuace. Celkově má většina přítoků postupný klesající trend od zahájení monitoringu (Obr. 13).
- Hydrochemický monitoring v podzemí byl prováděn čtvrtletně na celkem 15 místech a zahrnoval základní analýzu vod, měření koncentrací stopových prvků a stanovení radioaktivních látek ve vodě. V prostorách laboratoře převažují vody typu Ca-Mg-HCO₃-SO₄ (převládající anionty ve vodě byly především hydrogenuhličitan, sírany převládaly pouze ojediněle a nevedlo to k zásadním změnám chemismu vod) a vody typu Ca-Mg-HCO₃. Podzemní vody na lokalitě jsou převážně typu Ca-SO₄.
- Stáří podzemních vod bylo stanovováno několika na sobě nezávislými metodami. Metoda stanovení doby zdržení vody v horninovém prostředí založená na stanovení tritia prokázala, že vody v prostředí PVP Bukov se pouze omezeně mísí se srážkovou vodou, která do podzemí prosakuje minimálně. Metoda měření degradace freonů nepřinesla žádné relevantní výsledky. Stanovení stáří vod, respektive doby zdržení vody v horninovém prostředí, radiokarbonovou metodou (měření izotopu ¹⁴C) ukázalo, že vody v lokalitě u přítoku Bk-26 jsou přibližně 5000 let staré, respektive takto byla stanovena jejich doba zdržení. Podobné metody byly aplikovány i v zakázce Charakterizace I (Bukovská et. al 2017). Stáří vod (respektive zdržení) datovaných radiouhlíkovou metodou ¹⁴C bylo stanoveno přibližně na 7000 let. Podle místa odběru vzorku vody bylo v rámci tohoto projektu stanoveno stáří vod v rozsahu 6000-9000 let.
- V hlubších patrech dolu Rožná I (12.-24. patro) bylo stanoveno, že zde převládají vody typu Na-HCO₃ a Na-SO₄. Bylo zde také stanoveno podrobné prvkové složení podzemních vod. Mineralizace pro chemický typ vody Ca-Mg-HCO₃-SO₄ je 0,3-1 g/l.
- Byl pozorován rozdíl v pH vod v jednotlivých patrech. Vody v prostředí 12. patra jsou mírně zásadité, s hodnotami pH mezi 7,5-8,1. V mělkých částech jsou vody spíše neutrálního charakteru při pH 7. V nejhlubších patrech dolu se tyto hodnoty pohybují na pH 10. Hodnota pH tedy s narůstající hloubkou odběru roste.
- Radiologické rozbor podzemní vody stanovily, že k překročení limitu daných vyhláškou č. 422/2016 v průběhu celého monitoringu nedochází. Bylo naměřeno pouze mírné překročení celkové objemové aktivity alfa u bodů Bk23, Bk06, Bk26 a Bk35, které však nebylo kontinuální po celou dobu monitoringu. Došlo zde tedy k ojedinělým mírným zvýšením aktivity, po nichž se hodnoty opět normalizovaly. Jediným přítokem, kde byla pozorována výraznější zvýšená aktivita, byl přítok Bk27, který se vyznačoval zvýšenou aktivitou radonu, a to po celou dobu monitoringu.



Obr. 13 – Vydatnosti přítoků podzemní body do PVP Bukov (Vylamová et al. 2023)

4.6 Nedestruktivní geofyzika (2018–2022)

Název zakázky: Dlouhodobé monitorování horninového masivu v PVP Bukov nedestruktivními geofyzikálními metodami

Řešitelé: Technická univerzita v Liberci / Ústav pro nanomateriály, pokročilé technologie a inovace, G IMPULS, s.r.o.

Vazba k programu HÚ

Nedestruktivní geofyzikální metody poskytují cenné informace o vlastnostech a chování horninového masivu včetně oblasti EDZ/EIZ bez nutnosti realizace vrtných prací. V HÚ se předpokládá aplikace neinvazivních metod v co největší míře tak, aby došlo k co nejmenšímu narušení hostitelského horninového prostředí. U těchto metod došlo za poslední dobu k velkému pokroku, nicméně stále jsou ve fázi vývoje.

Cíle

- Návrh, instalace a provozování systému pro elektrickou odporovou tomografii a seismické měření na stěnách vybraných laboratorních chodeb.
- Dlouhodobé monitorování změn vlastností vybraného horninového bloku, které jsou důsledkem přirozeného vývoje nebo způsobené jinými aktivitami v daném místě (např. vrtné práce, vodní tlakové zkoušky apod.).

Způsob řešení

- Využití kombinovaného měřicího systému pro geofyzikální měření vyvinutého a otestovaného v prostředí tunelu Bedřichov.
- Pilotní parametrická seismická měření a elektrická odporová tomografie (ERT) na stěnách chodeb s různými roztečemi geofonů a elektrod pro návrh uspořádání prvků pro dlouhodobý monitoring.
- Instalace a provozování systému SGI1 na levé stěně chodby BZ1-XII, který kombinuje ERT měření na sérii elektrod a seismická měření s využitím geofonů (Obr. 14).

Výsledky

- Systém pro dlouhodobý monitoring byl zprovozněn v září 2019, kdy byla zahájena monitorovací fáze s cílem sledování změn vlastností zájmového horninového bloku.
- Před instalací systému měření, bylo nutno provést potřebné úpravy a připravit systém pro měření na PVP Bukov. Měřicí systém SGI 1 (Seismika, Geoelektrika, Internet, verze 1) byl původně odzkoušen v tunelu Bedřichov, horninové prostředí je zde stejnorodé a kompaktní. Hornina v PVP Bukov však vykazuje vyšší rozpukanost a značné množství mikrotrhlin. Přenos signálu je tedy horší, obzvláště při měření aktivní seismiky.
- V rámci zakázky probíhalo měření aktivní seismiky pomocí systému SGI 1 (měření seismickým prozařováním horniny). Prozařování probíhalo vícekrát denně a sbíraná data vyžadovala pečlivou analýzu. Výstupem daného měření je, že změny amplitud seismických signálů jsou výraznější než změny rychlosti v prostředí, v němž dochází ke změnám jeho vlastností.
- Monitoring pasivní seismiky vykazoval na počátku jen malou citlivost k seismickým dějům. Na konci projektu se však dal pozorovat přesně opačný jev, tedy nastavená

citlivost zařízení způsobila nepřetržitou registraci signálu. Tato skutečnost byla dána chybnou registrací signálu, který vysílala zařízení na monitoring vytékající vody z horniny. V průběhu tohoto měření nebyla testována lokalizace seismických dějů kvůli umístění snímačů.

- Provedené měření elektrické odporové tomografie (ERT) umožnilo zkoumat a monitorovat odporový profil zvoleného místa. Stanovila se tak očekávaná rychlost změn zdánlivých odporů. Pozorovány byly změny hodnot měrných odporů vlivem týdenního cyklu větrání v prostorech PVP. Jejich maxima nastávají v neděli, kdy se v prostorách PVP nevětrá. Podobný vliv mělo větrání i na měření metodou seismického prozařování, kde byla pozorována maxima signálu většinou v pátek, minima naopak v neděli. Tyto změny lze vysvětlit možnou kondenzací vody, ke které dochází při zahájení větrání. Voda tedy propojuje pukliny, které by jinak propojené nebyly. Při absenci větrání se voda začne odpařovat a stoupá tak elektrický měrný odpor měřený v hornině. Stejnou skutečnost, že větrací cyklus má vliv na prostředí PVP Bukov zachytila i měření aktivní seismiky.
- Z výsledků vyplynulo, že by bylo vhodné v měřeních tohoto typu pokračovat a doplnit je měřeními pomocí radaru, vyzvané polarizace či stanovení bludných proudů.



Obr. 14 – Pohled na stanoviště experimentu (Bárta et al. 2022)

4.7 Křehké struktury (2018–2022)

Název zakázky: Monitoring aktivity křehkých struktur PVP Bukov a dolu Rožná

Řešitelé: Ústav struktury a mechaniky hornin (ÚSMH) AV ČR

Vazba k programu HÚ

Za účelem prokázání tektonické stability hostitelské horninové formace HÚ je potřeba zvolit vhodnou metodu pro ověření pohybů po tektonických strukturách. Existují dlouholeté zkušenosti ze sítí měřidel instalovaných v ČR i mimo ni, které poskytují datové řady pro interpretace tektonického chování českého masivu.

Cíle

- Získání znalostí o pohybech křehkých struktur v krystalinických horninách v hloubce odpovídající HÚ.
- Vybudování monitorovací sítě, která bude poskytovat časové řady o chování různých generací struktur křehké tektoniky různého měřítka (zlomová zóna, zlom, puklinová zóna, puklina).
- Provedení celkové interpretace pohybů sledovaných struktur v PVP Bukov a vytvoření matematického modelu pro jejich simulaci.

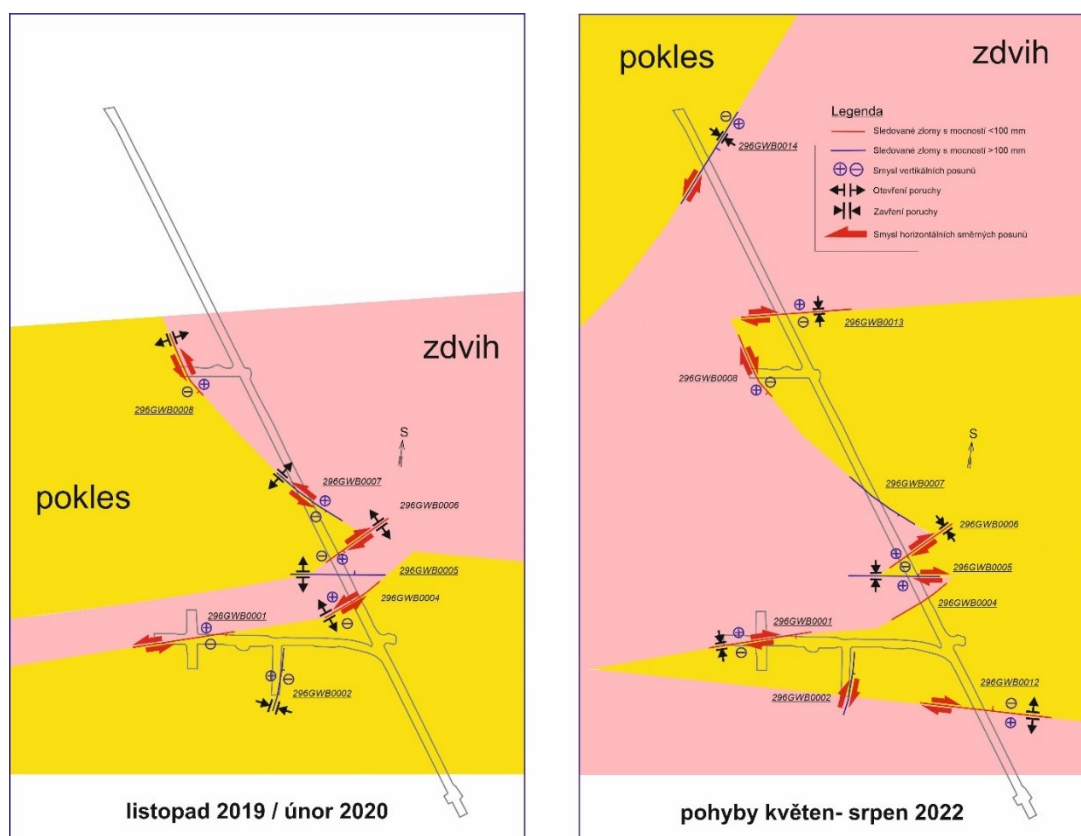
Způsob řešení

- Měření pohybů křehkých struktur je realizováno pomocí 3D opticko-mechanických extenzometrů (dilatometrů) TM-71. Jedná se o zařízení vyvinuté v ÚSMH, s velmi vysokým rozlišením ve srovnání s tradičními i moderními technikami monitorování pomalých pohybů horninového masivu. Přístroj dokáže zaznamenat posun ve všech třech směrech a zároveň rotace s přesností až 0,001 mm. Zařízení využívá jevu optické interference, kdy jsou sledovány a interpretovány vzájemné posuny spirál na dvojici překrývajících se sklíček.
- Instalace extenzometrů na 10 vybraných struktur s různou orientací vůči hlavním směrům in-situ napětí. Monitoring a udržování sítě pro získání co nejdelší datové řady.
- Sestavení „quasi-2D“ modelu PVP Bukov, který byl proveden jako 3D horizontální řez v okolí PVP Bukov v úrovni mezi cca -563.5 m a -546.5 m s včleněním tektonických zón do modelu jako zón oslabení. Simulace pomocí software Plaxis 3D VIP s aplikací horizontálních tlaků na jednotlivé bloky horniny zpětná analýzu naměřených pohybů.

Výsledky

- Původní síť měřících bodů instalovaná v roce 2019 obsahovala celkem sedm osazených struktur v PVP Bukov I, další dvě struktury na 24. patře a jednu na 20. patře dolu. Informace z měřících bodů ze struktur na spodních patrech dolu byly sbírány do poloviny roku 2020, kdy byla zařízení demontována z důvodu plánovaného zaplavení těchto prostor. Tato zařízení pak byla osazena na tři nově vybrané struktury uvnitř laboratoře a doplňují tak původní sérii měřidel.
- Celkově tak měřící síť nyní obsahuje 10 sledovaných struktur, kde jsou všechna měřidla napojena na datovou síť a je zajištěn přenos dat.

- Za monitorované období byla pozorována období extenzního režimu charakteristického poklesy a otevíráním sledovaných křehkých struktur, období bez výrazných posunů, ale následně i opačného kompresního režimu (Obr. 15).
- Celkově se posuny na sledovaných strukturách pohybují v setinách mm za rok a můžou mít charakter krátkodobých trendů nebo pulzní (skokový) charakter.
- Výsledkem modelování je informace o napjatostních a tlakových poměrech v oblasti a interpretace porušení oblasti tektonickými liniemi. Model rámcově předpovídá naměřené směrné posuny, kde předpovědi kvalitativně velmi dobře odpovídají měření a kvantitativně odpovídají řádově.



Obr. 15 – Porovnání režimu vertikálních pohybů pro dvě významná období (Stemberk et al. 2022)

4.8 Mikrobiologie II (2020–2021)

Název zakázky: Monitoring anaerobního mikrobiálního osídlení PVP Bukov a rešerše vztahů horninového prostředí a mikrobů

Řešitelé: Technická univerzita v Liberci-Ústav pro nanomateriály, pokročilé technologie a inovace

Vazba k programu HÚ

Tento projekt navazoval na mikrobiální screening provedený v letech 2017 až 2019 (kap. 4.3). Mikrobiální osídlení na PVP Bukov a jiných částech dolu Rožná I bylo charakterizováno jako silně antropogenně ovlivněné (především aerobní zástupci mikrobů). Navazující projekt se

více zaměřoval na anaerobní mikrobiální aktivitu, kterou se v PVP Bukov doposud nepodařilo přesně popsat.

Cíle

- Zlepšení porozumění o rozdílech mezi přirozeným mikrobiálním osídlením horninového prostředí a antropogenně ovlivněného prostředí.
- Zevrubné seznámení s mikrobiální aktivitou v PVP Bukov s ohledem na plánované experimenty (Korozní experiment – kap. 5.4, apod.).
- Popsání souvislostí a nejistot u mikrobiálních procesů v celém systému HÚ za pomoci řešerských prací. Zaktualizování přístupu k hodnocení mikrobů ve vztahu k HÚ.

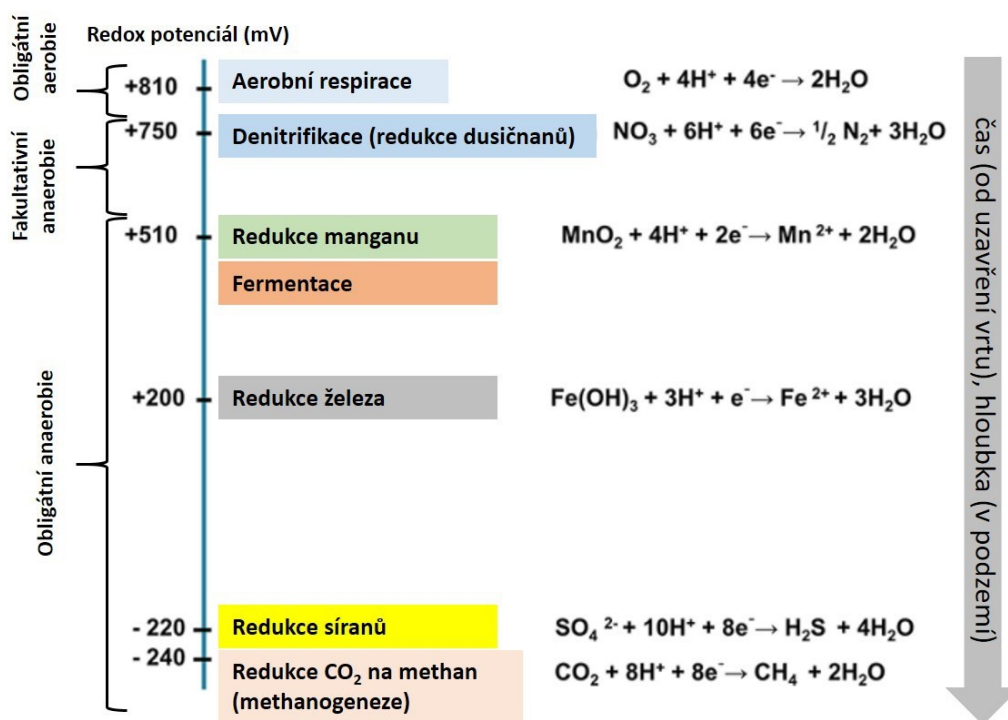
Způsob řešení

- Provedení odběrů a analýz vzorků vod ze zvodnělých vrtů v PVP Bukov pomocí metodiky vyzkoušené v rámci předchozího projektu. Stanovení mikrobiální diverzity pomocí molekulárně-biologických metod (extrakce DNA, kvantitativní real-time PCR a Next generation sequencing).
- Paralelní sledování hydrochemických parametrů vytékajících vod z vrtů (obsah kyslíku, Eh, pH, teplota, konduktivita) a laboratorní hydrochemické analýzy na vzorcích vod.
- Interpretace vývoje mikrobiální diverzity na monitorovaných bodech. Vyčíslení poměrného zastoupení různých populací mikroorganismů a porovnání s daty z dřívějších měření v ČR se zaměřením na přítomnost pro HÚ potenciálně nebezpečných skupin mikroorganismů (síran-redukující, železo-redukující, železo-oxidující, methanogenní a acetogenní mikroorganismy).
- Řešerské práce zaměřené na mikrobiální aktivitu očekávanou v HÚ z hlediska antropogenních zdrojů mikrobů a mikrobů z neovlivněné horniny. Porovnání míry vlivu mikrobiální aktivity na komponenty HÚ ze zdrojů z horninového prostředí oproti zdrojům z bentonitu. Shromáždění závěrů ze studia mikrobiální aktivity a souvisejících procesů jako je koroze UOS, illitizace bentonitu, nebo hydrogeochemické procesy.

Výsledky

- Mikrobiologické analýzy byly doplněny o in-situ hydrochemická měření, která poskytují zásadní informace o podstatných podmínkách prostředí, které určují stav a vývoj mikrobiálních společenstev (a fungují tedy jako spolehlivé prediktory některých charakteristik mikrobiálního osídlení hlubinných podzemních vod).
- Byly detekovány všechny skupiny pro HÚ potenciálně nebezpečných mikroorganismů podílejících se na mikrobiálně indukované korozi (především síran-redukující a síru oxidující bakterie, železo-redukující a železo-oxidující bakterie a nitrát-redukující bakterie) a dále mikroorganismy, které mají schopnost ovlivnit funkční vlastnosti bentonitu (především železo-redukující bakterie).
- Bylo prokázáno, že stabilita prostředí a nedostupnost terminálních akceptorů elektronů je hlavním klíčem k minimalizaci mikrobiální aktivity v HÚ.
- Z výsledku mnoha nezávislých studií vyplynulo (Černá et al. 2021), že mikrobiální diverzita se dramaticky liší mezi vzorky hornin a mezi podzemní vodou (byť jsou vzorky odebrané ze stejného místa). Navíc sesilných mikroorganismů je až několika řádově více než planktonních. Proto vzorkovače podzemních vod nepředstavují ideální formu pro studium sesilných mikroorganismů, jejichž složení se od planktonních může zásadně lišit.

- Dalším faktorem, který výrazně ovlivňuje mikrobiální diverzitu, je horninové prostředí (např. pyrit, markazit, kalcit atp.) a s tím související dostupnost terminálních akceptorů elektronů, donorů elektronů a dostupnost zdrojů uhlíku (Obr. 16). Neméně důležitým faktorem je hloubka a dále míra izolace (tj. nakolik je studovaná lokalita propojena systémem puklin). Změna jediného drobného parametru postačuje k dramatické změně v mikrobiálním společenstvu.



Obr. 16 - Posloupnost redukčních reakcí a terminální akceptory elektronů (Steinová et al. 2021)

4.9 Seismika PVP II (2020–2021)

Název zakázky: Zjištění prostorové homogenity prostředí před provedením trhacích prací pomocí seismické tomografie

Řešitelé: INSET s.r.o.

Vazba k programu HÚ

Metoda seismické tomografie je určena pro zobrazení kvality horninového masivu pomocí měření rychlosti šíření seismických vln. Umožňuje stanovit míru porušení horniny a identifikovat poruchové zóny a oblast EDZ. Pro účely HÚ bude tato metoda vhodná zejména pro identifikaci stabilních, nerozpukaných horninových bloků a posouzení stavu geomechanických vlastností horniny.

Cíle

- Vytvoření seismické mapy horninového bloku určeného pro ražbu komplexu chodeb PVP Bukov II pomocí měření v průzkumných a pilotních jádrových vrtech laboratorních chodeb nacházejících se v zájmové oblasti.

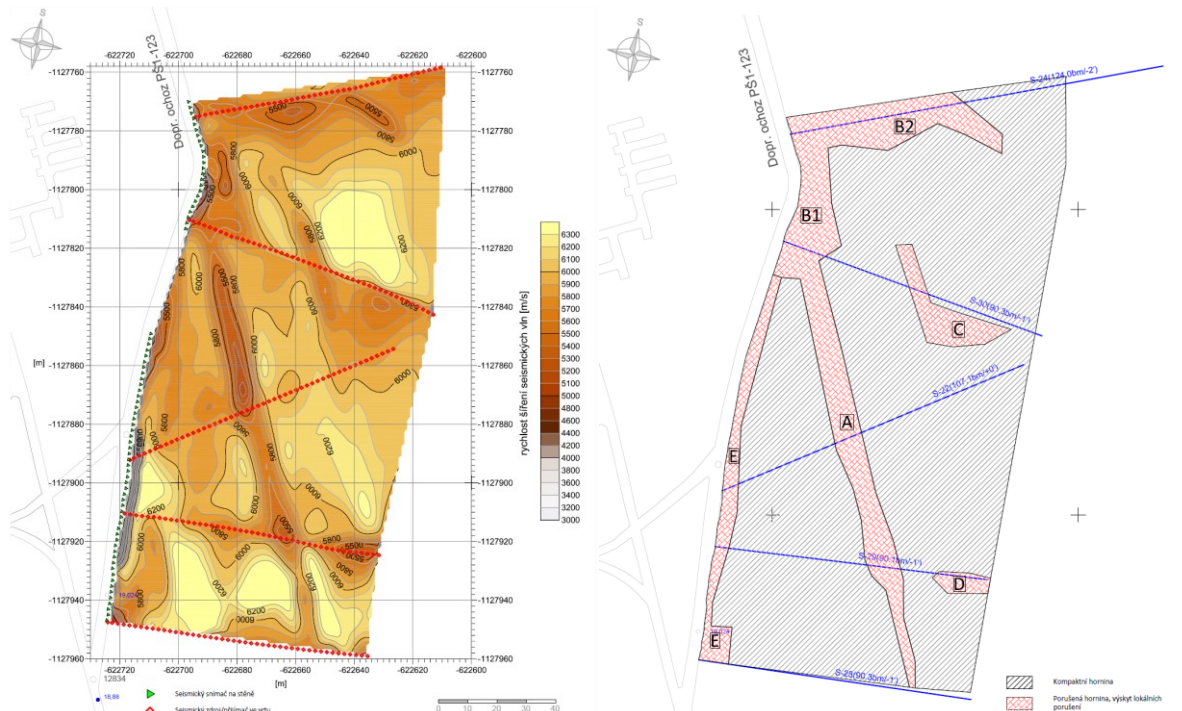
- Získání údajů o prostorové distribuci poruchových zón a určení míry porušení zkoumaného horninového bloku.

Způsob řešení

- Aplikace metod měření šíření seismických vln na systému pěti jádrových vrtů v horninovém bloku PVP Bukov II. Měření byla prováděna mezi vrty a také s využitím snímačů umístěných na stěnu přístupové chodby PŠ1-123.
- Vyhodnocení měření vytvořením mapy seismických rychlostí studované oblasti horniny.

Výsledky

- Výsledkem měření je mapa (Obr. 17) pokrývající celý rozsah budoucího komplexu PVP Bukov II o rozměrech cca 100 x 200 m.
- Celkově měření poukázaly na relativně malé porušení horniny.
- Neporušené nebo slabě porušené horniny v prostředí PVP Bukov mají seismickou rychlost z pravidla vyšší než 5800 m/s.
- Tento projekt poskytl důležitá data o predikci průběhů oblastí s menší kvalitou (poruchových zón), která bylo možné návazně porovnávat s informacemi získanými přímým pozorováním na stěnách ražených chodeb PVP Bukov II.
- Výsledky predikovaly průběh oslabenější zóny horniny, která byla následně potvrzena při ražbách laboratorních chodeb, kde byly detekovány vyšší přítoky podzemní vody (Obr. 17).



Obr. 17 – Vlevo: výsledek tomografického zpracování rychlostního pole; vpravo: blokové interpretační schéma (Chabr et al. 2021)

4.10 POSIVA FLOW LOG (2022)

Název zakázky: Utilisation of POSIVA experience in the Application of Posiva Flow Log (PFL) – Posiva Flow Log measurements in four boreholes at the Bukov underground research facility in the Czech Republic

Řešitelé: Posiva Solutions

Vazba k programu HÚ

Pro potřeby získání informací o hydraulické vodivosti hostitelské horniny HÚ bude nezbytné použití ověřených zařízení a metodik. SÚRAO využívá ojedinělé možnosti získání srovnávacích dat ze zařízení Posiva Flow Log (PFL). Jedná se o zařízení vyvinuté na míru pro prostředí krystalinických hornin vyznačujících se velmi nízkou hydraulickou vodivostí a puklinovou propustností. Zařízení je schopné detekovat přítoky do vrtů z diskrétních puklin malého měřítka, získat data pro určení hydraulické vodivosti a provádět přímé odběry pro chemické analýzy vod z velkých hloubek ve vrtech. První zkušenosti v ČR byly získány už v roce 2019 na lokalitě Melechov (Komulainen et al. 2019).

Cíle

- Provedení a vyhodnocení série měření ve 4 vybraných vrtech v PVP Bukov.
- Lokalizace propustných puklin v rámci testovaných vrtů a určení vydatností.
- Stanovení pórového tlaku podzemní vody a hydraulické vodivosti vybraných úseků vrtů případně jednotlivých puklin.
- Odběr podzemní vody z vybraných struktur ve vrtech.

Způsob řešení

- Aplikace měření ve dvou subhorizontálních vrtech (S-33 a S-24), šikmým úpadním vrtem L8-54DL a svislým úpadním vrtem L7-87D (délky vrtů 30,3-124 m).
- Realizace měření ve vrtech za přirozených tlakových podmínek ve vrtech (s otevřeným vrtem) a se zvýšeným tlakem vody v zaparkovaném vrtu (tlak 2 MPa).
- Použití metody „PFL DIFF“ (Posiva Flow Log Difference Flow Method) pro identifikaci přítoků vody do zaparkovaných úseků vrtů a přímé měření parametrů vody (elektrická vodivost a odpor, teplota a tlak vody ve vrtu).

Výsledky

- Ve třech proměřených vrtech (S-33, S-24, L8-54DL) bylo v souhrnu detekováno 43 hydraulicky vodivých puklin s přítoky vody do vrtů. U všech třech vrtů byl detekován mírně vyšší počet puklin s registrovaným průtokem vody při fázi se zvýšeným tlakem vody ve vrtu. Nejvíce hydraulicky vodivých puklin s registrovaným průtokem bylo zjištěno ve vrtu S-33 (16 puklin při otevřeném vrtu, 20 puklin při tlaku 2 MPa).
- Žádná puklina s přítokem vody do vrtu nebyla detekována ve vrtu L7-87D.
- Měření pórového tlaku vody na puklinách ukázalo nižší hodnoty, než by odpovídalo dané hloubce pod povrchem.
- Hodnoty transmisivity měřených etáží vrtů se pohybovaly v rozmezí $3 \cdot 10^{-11} \text{ m/s}^2$ až $3 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}^2$.
- Bylo provedeno in-situ měření některých chemických parametrů (pH, ORP, teplota, celková koncentrace rozpuštěných látek). Ve vrtu S-33 se hodnoty pH pohybovaly mezi

8,1 – 9,0, tedy relativně bazické. ORP ve vrtu S-33 bylo mezi 207 - 279 mV. Teplota v daném vrtu se pohybovala mezi 15,0 - 15,8 °C. Hodnoty celkových rozpuštěných látek TDS se pohybovaly mezi 506-728 mg/l.

- Z vrtu S-33 byl v hloubce 31,2 proveden odběr vody pro laboratorní analýzy. Bylo stanoveno chemické složení vody (anionty, kationty), měrná vodivost (při 25 °C), CHSKMn, celkový organicky vázaný uhlík TOC a změřena aktivita vody (celková beta aktivita a radon/radium v Bq/l). Do budoucna bude vhodné tato data porovnat s jinými výsledky laboratorních analýz vzorků vody z vrtů.



Obr. 18 – Měřicí stanoviště u vrtu L7-87D a vrtu S-24

4.11 Externí projekty

4.11.1 GEOSTAB (2017–2021)

Název zakázky: Rozvoj geotechnických a geofyzikálních metod pro získání 2D a 3D obrazu geologické stavby

Řešitelé: GEOtest, a.s.; Ústav geoniky AV ČR, v. v. i.; Technická univerzita v Liberci / Ústav pro nanomateriály, pokročilé technologie a inovace

Vazba k programu HÚ

Obdobně jako u projektu v kap. 4.6 spočívala klíčová náplň tohoto projektu ve vývoji a testování neinvazivních geofyzikálních metod a geotechnických metod pro potřeby jejich budoucího použití v prostředí HÚ.

Jedná se o externí projekt programu TRIO, jehož poskytovatelem bylo MPO (č. projektu: [FV20294](#)).

Cíle

- Vývoj a testování geofyzikálních a geotechnických metod pro získání informací o geologické stavbě ve směru kolmém i podélném k podzemním dílům a o jejím časovém vývoji.
- Definování komplexního souboru metod, které by přispěly k dokonalejšímu popsání geologické stavby horninového masivu v okolí podzemního díla.
- Verifikace naměřených geofyzikálních veličin s daty získanými různými geotechnickými metodami.
- Sestavení algoritmů pro řešení 3D úloh pro geofyzikální odporová a seismická měření a testování programů pro zjišťování měrných odporů a rychlostí podélných vln v okolí báňských děl.

Způsob řešení

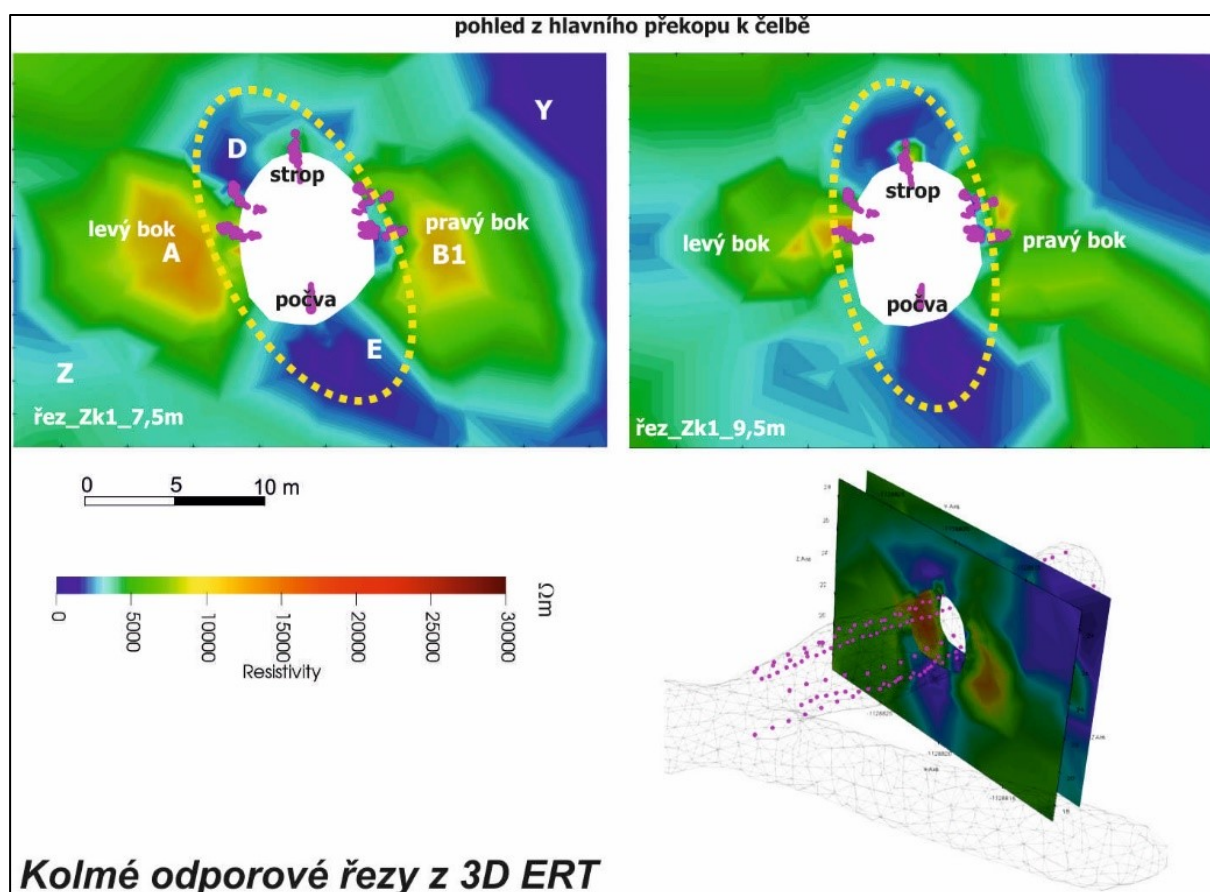
- Aplikace sérií geofyzikálních měření na povrchu stěn podzemních děl, mezi vrty nebo mezi vrty a povrchem podzemního díla (pozemní a vrtný radar, seismická tomografie, elektrická odporová tomografie a proudové prozařování).
- Zkoumání závislostí mezi jednotlivými fyzikálními a geotechnickými vlastnostmi horninového masivu a vývoj softwarových nástrojů pro interpretaci experimentálních měření. Smyslem je pomocí jiných zavedených průzkumných metod ověřit a interpretovat výsledky geofyzikálních měření.
- Využití více podzemních pracovišť v rozdílných litologických a geomechanických podmínkách (Důl Rožná I - PVP Bukov, štola Josef, Modrá štola).
- Mezi klíčové výstupy projektu kromě závěrečné a průběžných technických zpráv patří „ověřená technologie“ a software (GenieERT a GenieST).

Výsledky

- Sledování rozložení fyzikálních vlastností v širším okolí lokality Bukov ukázalo, že objemová hmotnost, měrný odpor a rychlost podélných vln nevykazují výrazné rozdíly mezi jednotlivými litologickými typy, ale velikost jednotlivých parametrů záleží v první řadě na mechanickém stavu horniny.
- Vyhodnocené závislosti mezi jednotlivými fyzikálními a mechanickými vlastnostmi hornin prokázaly, že existuje celá řada matematických závislostí, které je možné v jednotlivých případech aplikovat pro získávání dalších potřebných parametrů hornin. Ukázalo se, že je vhodné vlastnosti určovat ne pro jednotlivá místa jejich měření, ale pro jednotlivé kvazihomogenní bloky.
- Aplikace proudového prozařování ukázala, že tuto metodu je možné používat pouze mezi vrty, nikoli mezi vrty a báňskými díly. Důvodem je přítomnost ocelové výztuže v chodbách.
- Měření lehkými geofyzikálními metodami ukázalo, že na stěnách chodeb existují rozdíly ve fyzikálních vlastnostech, které nejsou na stěnách prostým okem viditelné. To platí pro liniové měření po stěnách i o plošném měření na vybraných plochách.
- Měření vrtným radarem přineslo řadu nových poznatků o okolí proměřovaných vrtů, zejména pak při radarovém prozařování mezi vrty a chodbami.
- Velmi zajímavé informace za stěnami chodeb přinesla měření „geologickým“ radarem. Cílem této metody bylo ověření původu ploch porušení (antropogenní či přirozené) a kvality horninového prostředí (stěny a okolní počva). Při měření je potřebné použít

antén s několika frekvencemi, protože každá frekvence je schopna podat informace jen v určitém hloubkové rozmezí, tj. dojde k zobrazení určitého hloubkového rozhraní a indikaci různých vlastností plochy, která danou vyslanou frekvenci odráží. Je velmi pravděpodobné, že plochy nespojitosti zobrazené touto metodou odpovídají plochám vzniklým porušením masivu vlivem ražby (oblast EDZ).

- V rámci projektu byl sestaven postup, jak interpretaci ERT rozšířit tak, že z odporových měření ERT jsou sestaveny křivky VES (Vertikální elektrické sondování). Jejich interpretací jsou pak získávány poznatky o geologické stavbě za stěnou díla. Pozoruhodná je shoda u určování ploch nespojitosti mezi ERT VES a radarem.
- 3D měření ERT a jejich interpretace přinesla poznatky i o rozložení napětí okolo báňského díla. Je však potřebné používat interpretační nástroje, které jsou schopné zpracovat výsledky měření na obecně v prostoru umístěných elektrodách. Výsledky takovýchto měření v chodbě ZK-1 ukazují, jaké informace o horninovém masivu a jeho stavu je možné takto získat (Obr. 19).



Obr. 19 – Svislé odporové řezy chodbou ZK-1 (Bláha et al. 2021)

4.11.2 GEOBARR (2018–2022)

Název zakázky: Dlouhodobý výzkum geochemických bariér pro ukládání jaderného odpadu

Řešitelé: Masarykova Univerzita Brno – hlavní řešitel; DIAMO s.p. – spoluřešitel; SÚRAO – spoluřešitel bez finanční spoluúčasti.

Jedná se o externí projekt řešený v programu OPVVV, jehož poskytovatelem bylo MŠMT (označení projektu: EF16_026/0008459).

Vazba k programu HÚ

Projekt byl založen na principu přírodního analogu. Úložiště vyhořelého jaderného paliva lze do jisté míry (konzervativně) porovnávat s přírodními ložisky uranu, specificky lze srovnávat uraninit a vyhořelé jaderné palivo. Pokud jsou určeny podmínky vedoucí ke vzniku ložiska uranu v zemské kůře, jsou tak stanoveny i podmínky, za kterých je uran v přírodním prostředí mobilní. A při přípravě úložiště je nezbytné právě těmito podmínkám vedoucím k migraci radionuklidů bránit.

Cíle

- Doplnění dosavadních údajů o mechanismech vzniku uranového ložiska a zejména pak studium charakteristiky okolního geologického prostředí, které působilo po celou dobu jako přírodní geochemická bariéra bránící migraci uranu z prostředí ložiska Rožná do okolí.
- Výzkum předpokladu, že horninové prostředí úložiště, které bude blízké horninovému prostředí ložiska, bude působit jako přirozená geochemická bariéra a blokovat migraci uranu do okolí.

Způsob řešení

- Výzkum podmínek primární akumulace uranu na ložisku Rožná.
- Výzkum podmínek dlouhodobé stability uranu na ložisku Rožná s ohledem na využití získaných dat při výzkumu souvisejícího s HÚ. Jednalo se zejména o části zabývající se dlouhodobou tektonickou stabilitou oblasti, geofyzikální detekci hlavních zlomových struktur, datování exhumace hornin metodou *fission track* a *U-Th-He*, datování stáří povrchu pomocí kosmogenních izotopů či seismický monitoring oblasti.
- Tento externí projekt využíval možnosti přístupu do důlního díla Rožná a dostupných dat o ložisku.

Výsledky

- Výsledky projektu jsou dostupné v celkem třech publikacích uveřejněných na stránkách projektu ([ÚGV MUNI, 2023](#)). Jedná se o obrazovou publikaci prezentující vybrané výsledky projektu o chování a mobilitě uranu při vzniku ložisek uranu (2), dále monografie o historii průzkumných a těžebních prací na uranovém ložisku Rožná (1) a výuková skripta zabývající se uranovými ložisky (3).
- Publikace (1) „60. let těžby uranového ložiska Rožná“ přehledně přibližuje poznatky čerpané z poskytnutých záznamů z archivů DIAMO o. z. GEAM. Je zde popsán sled průzkumů území před zahájením těžby, těžební procesy a okrajově je zde popsána geologie a mineralogie ložiska.
- Obrazová publikace (2) „Cesty uranu“ ve snímcích s průvodními komentáři prezentuje selektivně zvolené snímky a výstupy některých analýz, které byly provedeny v rámci projektu GEOBARR. Jsou zde k vidění ukázky spekter LA-ICP-MS (hmotnostní spektrometrie s indukčně vázaným plazmatem spojená s laserovou ablací) a BSE (elektronová mikrosonda s využitím zpětně odražených elektronů) analýz.
- Publikace (3) představuje výuková skripta pro studenty bakalářských oborů a jsou zaměřena na vývoj uranových ložisek, jejich klasifikaci a těžbu uranu v ČR.

5 Probíhající projekty

Tato kapitola obsahuje informace k probíhajícím projektům. Jejich přehled je uveden v Tab. 4.

Tabulka 4 – Přehled probíhajících projektů SÚRAO v PVP Bukov

Název projektu/zakázky	Pracovní označení projektu	Období realizace	Hlavní dotčená oblast programu SÚRAO	Technické zprávy (TZ) SÚRAO
Interakční fyzikální modely in-situ v PVP Bukov	Interakční experiment	2017-2027	VEP4	629/2022 (Svoboda et al. 2022b)
Výzkum puklinové konektivity v PVP Bukov	Puklinová konektivita	2019-2024	VEP3	630/2022 (Zuna et al. 2022)
Geologická a geotechnická charakterizace horninového prostředí – PVP Bukov II	Charakterizace II	2021-2025	VEP1	596/2022 (Bukovská et al. 2022)
Pilotní korozní experiment v PVP Bukov	Korozní experiment	2021-2034	VEP4	576/2022 (Dobrev et al. 2022)
Monitoring teploty horninového masivu v PVP Bukov a dolu Rožná I	Teplotní monitoring	2021-2025 (2030)	VEP2	639/2022 (Dědeček et al. 2022)
EURAD - WP MAGIC	MAGIC	2021-2024	VEP4	-
Stanovení in-situ napjatosti v PVP Bukov II	Napjatost	2023-2025 (2027)	VEP2	-
Obrysová trhací práce při ražbě ZK v PVP Bukov	Obrysová trhací práce	2023	VEP6	-

5.1 Interakční experiment (2017–2027)

Název zakázky: Interakční fyzikální modely in-situ v PVP Bukov

Řešitelé: ČVUT v Praze (Fakulta stavební), Česká geologická služba; ÚJV Řež, a. s.

Vazba k programu HÚ

Pro návrh inženýrských bariér HÚ je důležité porozumět interakcím mezi jednotlivými materiály inženýrských bariér v očekávaných podmínkách v HÚ.

Cíle

- Ověření vlastností bentonitové těsnicí vrstvy ovlivněné přítomností horninového prostředí a podzemní vody a interakcemi s cementovými materiály za zvýšených teplot.
- Popsat a vyhodnotit interakce mezi kandidátními materiály pro inženýrské bariéry HÚ, tedy český Ca-Mg bentonit a beton v prostředí reprezentující HÚ.
- Získat informace a data pro matematické modelování šíření tepla v bentonitové bariéře a hostitelské hornině.

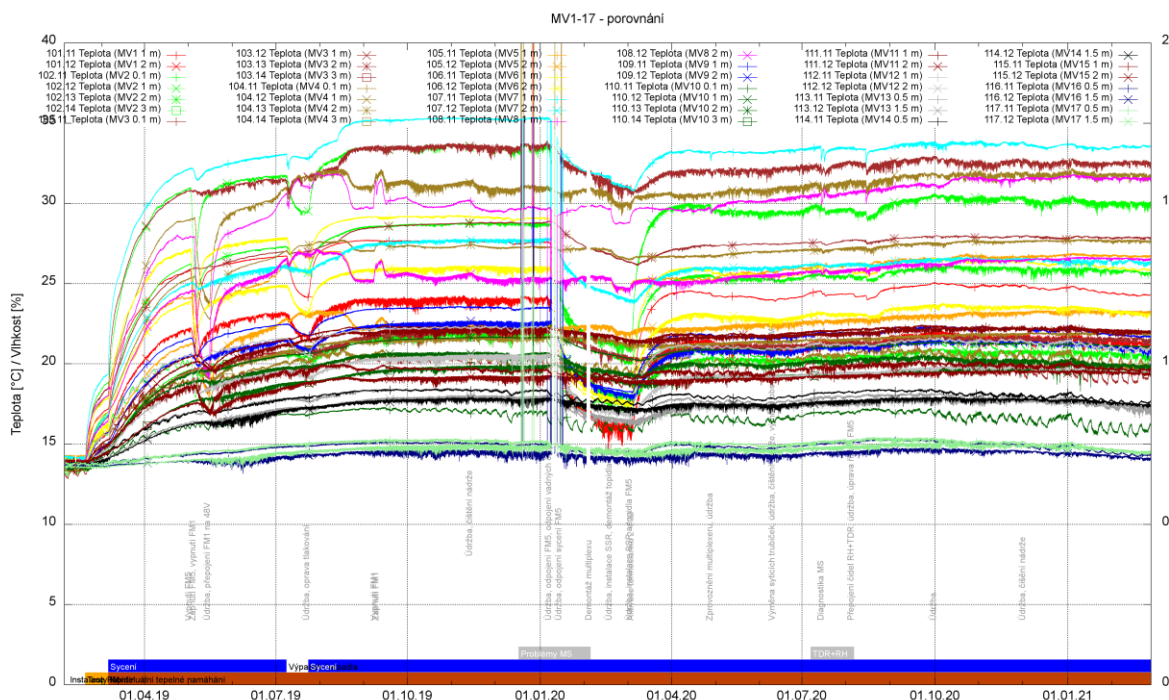
Způsob řešení

- Návrh, výstavba a provozování fyzikálních modelů reprezentujících v měřítku ukládací vrt HÚ. Experiment obsahuje pět nezahříváných a pět zahříváných fyzikálních modelů (čtyři modely zahříváné pomocí elektrických topidel na 100 °C a jeden na 200 °C. Modely byly instalované do vodorovných vrtů (délka 1,5 m, průměr 250 mm) a obsahují bentonitovou výplň v různých formách (lisované segmenty nebo granulovaná směs) a betonové segmenty (běžný beton a beton se sníženým pH).
- Modely jsou vybaveny systémem pro umělou saturaci bentonitové náplně lokální podzemní vodou a instrumentaci pro sledování vývoje teploty a nasycení bentonitu. Teplotní senzory jsou mimo fyzikální modely umístěny také v sérii vrtů vytvořených v různých vzdálenostech v okolní hornině (Obr. 20).
- Zatěžovací fáze (zahřívání a sycení vodou) a monitorovací fáze fyzikálních modelů byly zahájeny v březnu 2019 a budou probíhat minimálně do roku 2024. Po ukončení provozu modelů bude provedeno jejich rozebrání a následovat budou laboratorní analýzy odebraných vzorků materiálů, to vše bude provedeno v rámci samostatné zakázky.

Průběžné výsledky

- Za účelem zrychlení interakčních procesů mezi materiály byla bentonitová náplň od počátku experimentu uměle sycena vodou za zvýšených tlaků vody. Senzory v bentonitu zaznamenaly rychlý nárůst monitorovaných parametrů (vlhkost, bobtnací tlak) a jejich relativní ustálení již po prvních týdnech zatěžovací fáze. Vývoj parametrů prokázal, že bentonit byl plně nasycen již po několika prvních měsících.
- Měření vývoje a distribuce teploty v modelech a hornině ukázalo relativně rychlou stabilizaci teploty v bentonitu a následně probíhal pozvolný nárůst teploty v okolní hornině.
- Součástí projektu bylo i matematické modelování experimentu. První etapa modelování sloužila jako podpora pro rozmístění fyzikálních modelů ve zkušební komoře laboratoře a obsahovala modely šíření tepla v okolí fyzikálních modelů. V druhé fázi byl proveden prediktivní THM (termo-hydro-mechanický) model chování jednotlivých fyzikálních modelů. V poslední fázi byly tyto modely validovány pomocí naměřených dat a slouží pro interpretaci chování experimentu.
- V současnosti pokračuje zatěžovací fáze experimentu se sycením a zahříváním modelů. Monitoring všech parametrů vykazuje dlouhodobé ustálení měřených parametrů. Krátkodobé výkyvy v měřených parametrech je možné pozorovat v reakci na výjimečné události spojené s provozem (například výpadky napájení experimentu).
- Experiment poskytuje důležité zkušenosti s dlouhodobým provozem měřicího systému.

- Na rok 2024 je v plánu zahájení projektu demontáže experimentu. Ten bude založen na doporučeních, které zpracoval Svoboda et al. (2022a).



Obr. 20 – Příklad výstupu monitorování průběhu teplot ve všech monitorovacích bodech v hornině v okolí fyzikálních modelů (Svoboda et al. 2022b)

5.2 Puklinová konektivita (2019–2024)

Název zakázky: Výzkum puklinové konektivity v PVP Bukov

Řešitelé: ÚJV Řež, a. s.; Česká geologická služba; SG Geotechnika, a. s.; PROGEO s.r.o.

Vazba k programu HÚ

Hlavní motivací tohoto projektu je nedostatek informací o hydraulických vlastnostech hornin krystalinika Českého masivu v hloubkách pod povrchem odpovídajících HÚ. Detailní popis konektivity puklinových systémů tvoří jeden z nejdůležitějších příspěvků ke zlepšení porozumění transportu radionuklidů. Pro vývoj a testování modelovacích nástrojů, které budou využity pro prokázání bezpečnosti HÚ, je nezbytné získat reálná data z odpovídajícího horninového prostředí.

Cíle

- Získání dat pro vývoj hydrogeologických a transportních modelů pro simulace proudění vody a přidruženého transportu stopovacích látek.
- Provedení geologické a hydrogeologické charakterizace vybraného horninového bloku (včetně popisu diskretních hydraulicky vodivých struktur) v měřítku metrů až desítek metrů s důrazem na popis konektivity hydraulicky vodivých puklin.
- Vytvoření DFN modelu studovaného horninového bloku.

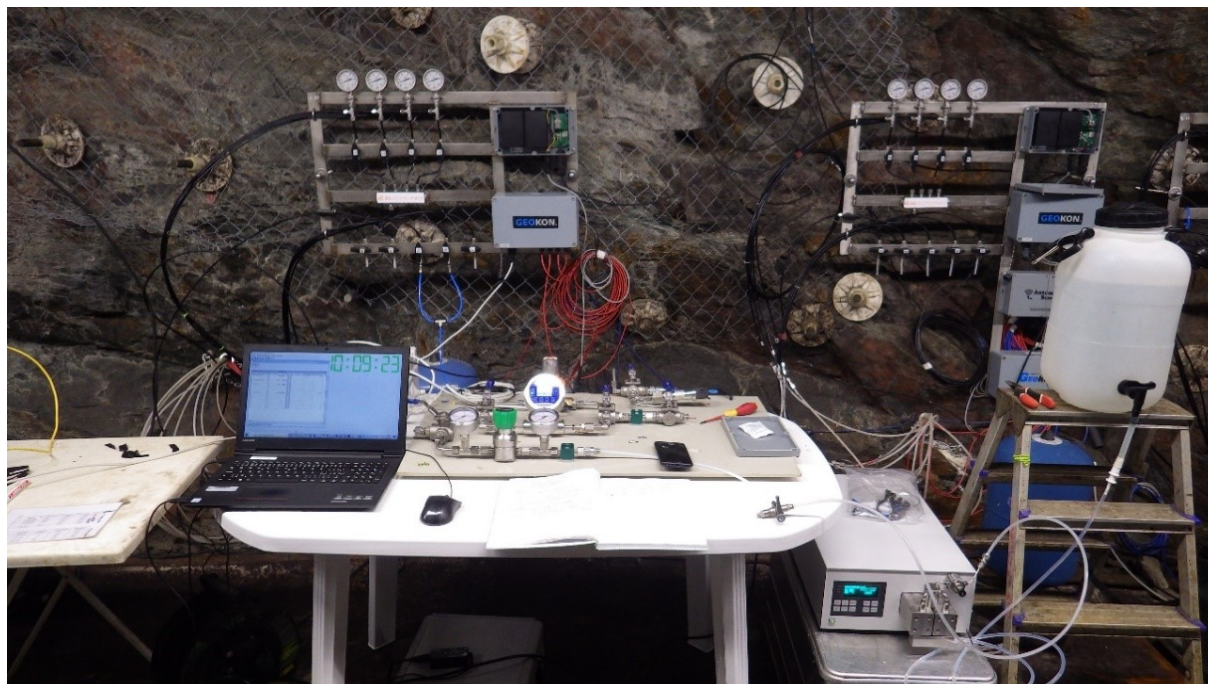
- Získání informací z hydraulických testů v jádrových vrtech (v jednotlivých vrtech, nebo mezi vrty), následných testů s použitím stopovačů a matematické simulace provedených testů.

Způsob řešení

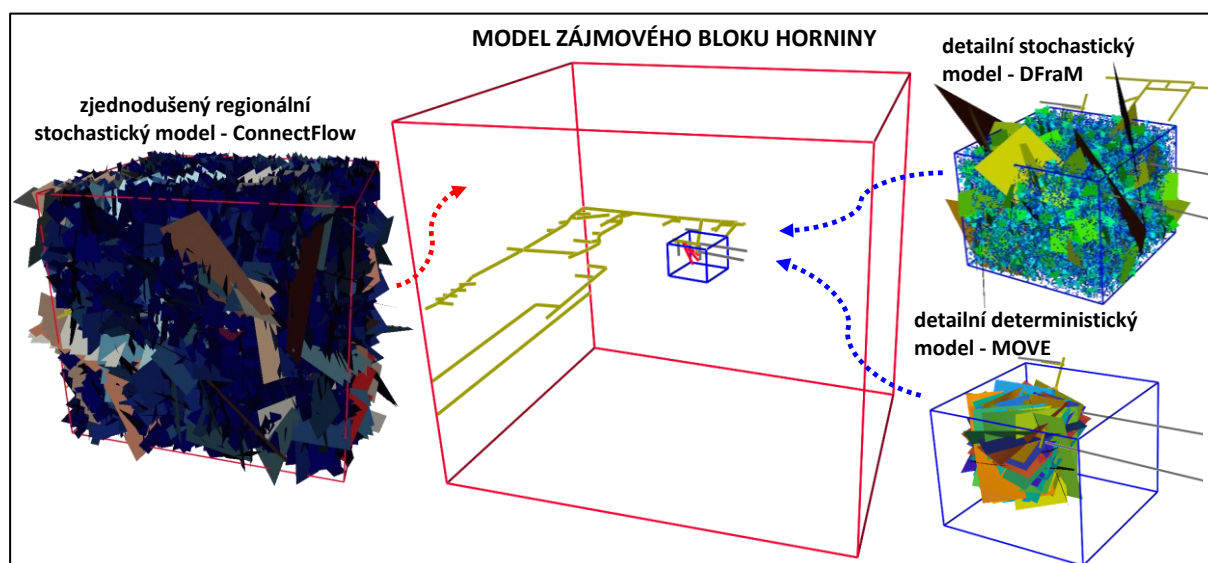
- Postupná tvorba sítě vrtů, které protínají vybraný horninový blok nacházející se mezi chodbami BZ-XIIJ, BZ₁-XII a ZK-2.
- Mapovací práce v podzemích prostorách a aplikace charakterizačních metod pro popis vrtů (inklinometrie, optický a akustický televizor a další karotážní metody, vodní tlakové zkoušky atd.).
- Vystrojení testovacích vrtů multipakovými systémy pro realizaci hydraulických a stopovacích testů. Celkem tři vrty budou vybaveny multipakrem se čtyřmi těsníci segmenty.
- Postupná tvorba a upřesňování strukturního geologického a hydrogeologického modelu studovaného horninového bloku a simulace prováděných hydraulických testů.

Průběžné výsledky

- Stanoviště experimentu obsahuje systém čtyř jádrových vrtů vystrojených multipakry. Celkem 3 vrty vedené z chodby ZK-2 (vrty S-27, S-31 a S-36) s délkami až 70 metrů obsahují každý 4 pakry a 4 monitorovací etáže. Poslední vrt (S-8) se nachází v chodbě Vrk-1, a poté co bylo zjištěno, že hydraulicky komunikuje s ostatními vrty, byl vystrojen dvojitým pakrem a zařazen do monitoringu.
- Po vystrojení všech vrtů multipakry bylo provedeno sledování ustalování tlakových poměrů ve všech monitorovacích intervalech vrtů pro určení přirozeného tlakového pole v horninovém bloku. Následovala fáze jednoduchých testů konektivity se systematickým otevíráním vybraných intervalů a měření tlakových odezev a výtoků. Tlakové pole bylo homogenní a bylo patrné ve všech intervalech in-situ i v modelech. Při otevření všech intervalů bylo naopak pozorována heterogenita puklinového systému a sledovány odtoky z jednotlivých intervalů vrtů, které řádově narůstaly až 4krát. Modelové výstupy otevřených intervalů se pak lišily od in-situ měření.
- Ve vybraných etážích vrtů byly následně provedeny krátké pulsní zkoušky a poté dlouhodobější vodní tlakové zkoušky pro vyhodnocení hydraulických vodivostí testovaných úseků vrtů (Obr. 21).
- Aktuálně na vybraných dvojicích intervalů vrtů s vysokou konektivitou probíhají série stopovacích zkoušek.
- Modelovací část projektu se zaměřovala na vytvoření koncepčního modelu zájmového bloku horniny (Obr. 22). Součástí celku je stochastická puklinová síť ve vnější regionální modelové doméně (z programu ConnectFlow), detailní deterministická puklinová síť (z programu MOVE) a doplňující stochastická síť (z programu DFraM) ve vnitřní detailní doméně. Model obsahuje celkem 43 průběžných deterministických struktur, které byly vyhodnoceny z vrtů a stěn chodeb.
- Pro simulaci proudění byl vytvořen hydrogeologický model (HydroDFN model) ve dvou paralelních větvích: 1. regionální HydroDFN model, 2. detailní HydroDFN model zájmového bloku horniny. Další aktivity v oblasti modelování se soustředí na simulaci prováděných stopovacích zkoušek.



Obr. 21 – Stanoviště Puklinové konektivity v chodbě ZK-2 při provádění pulsních testů (Zuna et al. 2022)



Obr. 22 – Schéma ilustrující skladbu modelu zájmového bloku horniny (Zuna et al. 2022)

5.3 Charakterizace II (2021–2025)

Název zakázky: Geologická a geotechnická charakterizace horninového prostředí – PVP Bukov II

Řešitelé: Česká geologická služba; SG Geotechnika, a.s.; Ústav geoniky AV ČR, v.v.i.; INSET s.r.o.

Vazba k programu HÚ

Program PVP Bukov má výrazně posunout vpřed technický koncept HÚ a získat data pro vývoj modelů potřebných pro prokázání bezpečnosti uvažovaného technického řešení. Vlastní výzkumný program PVP Bukov umožní včasnou přípravu metodických postupů tak, aby ve finální lokalitě bylo možné realizovat všechny práce efektivně a v plánovaném časovém horizontu. Pro naplnění experimentálního programu PVP Bukov je nezbytné vytvořit a připravit nové podzemní prostory. Proto byly v lednu 2021 zahájeny razicí práce PVP Bukov II. Celý proces výstavby laboratoře a s ní spojených charakterizačních prací se dá považovat za výzkumný a vývojový projekt, neboť umožňuje vyvíjet a testovat metody ražby a charakterizační postupy pro jejich budoucí využití v HÚ.

Cíle

- Určení geologických a geotechnických parametrů horninového bloku na 12. patře dolu Rožná I, v kterém se bude nacházet nový laboratorní komplex chodeb. Projekt má, obdobně jako při výstavbě PVP Bukov I (kap. 4.1), poskytnout ucelenou databázi geovědních dat pro její další použití. Konkrétně budou tato data využita pro sestavení a ověření vyvíjených popisných a matematických modelů.
- Komplexní geologický popis zájmového bloku horniny s důrazem na strukturní elementy důležité jak pro bezpečnost HÚ, tak pro výběr vhodných míst pro jednotlivé plánované experimenty.
- Popis a charakterizace EDZ/EIZ v okolí nově vyražených chodeb a komor a vytvoření základní báze informací a dat pro další monitorování vývoje této zóny.
- Vytvoření klasifikačního systému pro budoucí využití při výstavbě HÚ. Klasifikační systém má být využit pro charakterizaci a definování vhodných bloků pro umístění ukládacích prostor HÚ.
- Vytvoření postupů, metodik a doporučení pro charakterizační a klasifikační práce při budování HÚ.

Způsob řešení

Předmět plnění je rozdělen na následující oblasti:

- Geologická a strukturně-geologická dokumentace.
- Petrografická a geochemická charakterizace hornin.
- 3D strukturně-geologický model; Hydrogeologická charakterizace.
- Charakterizace transportních vlastností hornin.
- Geomechanické a geotechnické in-situ a laboratorní zkoušky hornin.
- Geofyzikální charakterizace (Georadar, ERT – elektrická odporová tomografie, Mělká refrakční seismika – povrchová refrakční tomografie; Seismické účinky trhacích prací.
- Charakterizace porušené (EDZ) a ovlivněné zóny (EIZ).

- Systém klasifikace horninových bloků.
- 3D sken vyraženého podzemního díla PVP Bukov II.

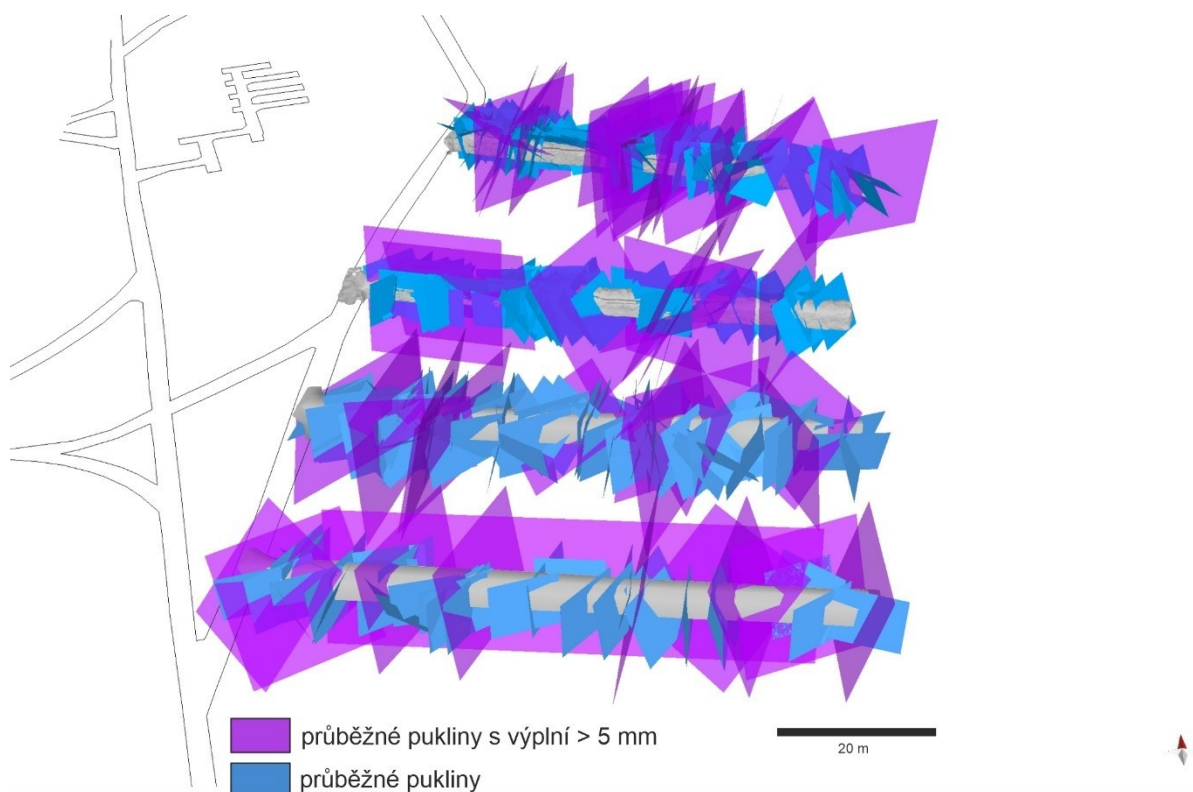
Průběžné výsledky

- Součástí prací je mapování (strukturní a petrografická dokumentace) čeleb (Obr. 23) a stěn ražených podzemních děl (Obr. 6).
- Pro charakterizační práce byly dále vytvořeny dvě geotechnické stanice (v chodbách L4a a L7). Každá z nich obsahuje systém jádrových vrtů určených pro geotechnické zkoušky a geofyzikální metody. Tyto vrty byly vytvořeny vrtnou soupravou DIAMEC Smart 4 s nástrojem pro orientované vrtání s nástavcem DEVICORE BBT. K dispozici jsou tedy orientovaná vrtná jádra. Díky nástroji je určena orientace jádra pomocí linky kreslené na hřbetnici, z čehož se dá odvodit nejistota orientace jádra. Tato linka také slouží dále k přenosu zakreslení jader do softwaru pro jejich vyhodnocení.
- Pro dokumentaci vrtů jsou sestaveny vrtné kolonky kombinující data ze scanneru vrtných jader a výsledků metod ABI/OBI ve vrtech. Z analýz stěn tří geotechnických vrtů v chodbě L7 provedených na základě metod OBI a ABI byly generelně identifikovány tři výraznější puklinové systémy. Nejvýraznější puklinový systém je prostorově shodný s metamorfní foliací s generelním směrem úklonu k JZ a úklony 20° až 80°. Většina puklin otevřených je tak metamorfní foliací predisponována. Druhý systém puklin s generelním směrem úklonu k VSV až SV je tvořen zejména otevřenými puklinami s proměnlivým úklonem od velmi plochých struktur s úklony kolem 5° až po strmější pukliny s úklonem až 80°. Třetí systém je tvořen zejména uzavřenými puklinami vyplněnými mineralizací s úklonem k SSZ případně k JV a poměrně strmými úklony 70° až 85°. Vysokou kvalitu horninového masivu dokumentuje také minimální výskyt porušených zón.
- V chodbách L5 až L8 dochází k pozvolným přechodům podél ploch foliace mezi pararulami a amfibolity, které podléhají v různé míře migmatitizaci a často přechází až do migmatitu či migmatitizovaného amfibolitu. Vzhledem k charakteru litologického prostředí, kde biotitem bohaté litologie často přechází do amfibolom bohatých litologií už na velmi malém měřítku, je přechod mezi definovanými litologiemi obtížně mapovatelný.
- Geofyzikální charakterizace rozčlenila horninový masiv v trase laboratorních chodeb na úseky relativně málo narušené a na úseky částečně oslabené. Detailní sledování horninového prostředí ve vrtech geotechnických stanic a v jejich okolí bylo realizováno především aplikací seismické tomografie mezi jednotlivými vrty. Získané rychlostní řezy jsou podkladem pro následnou interpretaci, která vymezuje výskyt částečně oslabené horniny. Dobře je také dokumentováno indukované oslabení horniny v nadloží laboratorní chodeb.
- Míra zvodnění podzemí v prostoru PVP II je velmi nízká. Výraznější zvodnění je vázáno na subvertikální zlomy a pukliny s převládajícím směrem zapadání 250° až 310° a sklonem 70° až 90°. Podzemní vody v prostoru PVP Bukov II jsou typu Na-HCO₃ až Na-SO₄, převládají smíšené typy vod (Na-HCO₃-SO₄, Na-SO₄-HCO₃). Mezi kationty jednoznačně u všech odebraných vzorků převažuje sodík. Celkový obsah rozpuštěných látek je v rozmezí od 200 do 370 mg/l.
- Metody měření napjatosti pro zkoumanou oblast kolem vrtu L7-87D stanovily tento sumární výsledek: maximální složka horizontálního napětí $SH = 42$ MPa, minimální složka horizontálního napětí $Sh = 19$ MPa a vertikální složka napětí $Sv = 14$ MPa.

Poměr hodnot naměřených a přijatých vertikálních a horizontálních složek napětí horninového masivu $S_v : S_H : S_h$ vychází 1,0 : 3,0 : 1,4; poměr horizontálních složek napětí horninového masivu $S_H : S_h$ byl stanoven $\sim 2,2 : 1$. Azimut hlavního horizontálního napětí S_H se pohybuje v intervalu $123^\circ \pm 15^\circ$. Zjištěná orientace hlavních složek horizontálního napětí určených pomocí hydraulického štěpení stěn vrtu dobře koreluje s analýzou deformace průřezu geotechnického vrtu L7-87D odvozenou z měření pomocí karotážní metody ABI.



Obr. 23 – Příklad fotodokumentace a zakreslení čelby při geologické dokumentaci



Obr. 24 – Zobrazení významnějších puklin zastižených v laboratorních chodbách

5.4 Korozní experiment (2021–2034)

Název zakázky: Pilotní korozní experiment v PVP Bukov

Řešitelé: ÚJV Řež, a. s.

Vazba k programu HÚ

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 (například zajistit odvod přebytečného tepla, znemožnit vznik nadkritického a podkritického stavu, minimální životnost ovlivněná mechanickou stabilitou a korozní odolností). Pro tyto potřeby bude nutné ověřit a demonstrovat chování materiálů navržených pro UOS v podmínkách blízkých HÚ. Korozní odolnost UOS a rychlost koroze patří v tomto ohledu mezi nejdůležitější parametry.

Cíle

- Vypracování metodiky pro testování korozního chování kovových vzorků a získání znalostí o korozní odolnosti kandidátních materiálů pro UOS v odpovídajícím prostředí.
- 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. Popis ovlivnění mikrobiální aktivity v experimentu zvýšenou teplotou.

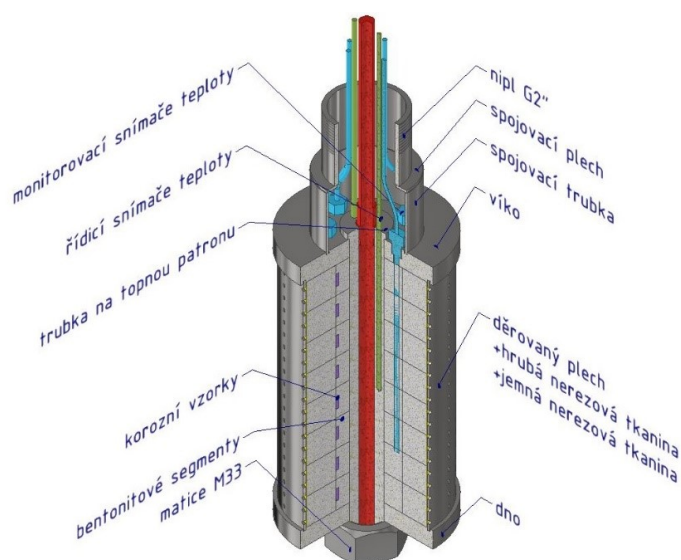
Způsob řešení

- Charakterizace vybrané zkušební komory, vytvoření 10 experimentálních vrtů, jejich charakterizace (geologická dokumentace, chemické složení vody, obsah kyslíku, Eh, pH a mikrobiologické osídlení) a následný monitoring. Vytvoření jednoho monitorovacího vrtu (bez vzorků uvnitř). Detailní charakterizace materiálů experimentu v laboratorních podmínkách.
- Příprava metodiky a technického řešení korozního experimentu. Příprava sestav (fyzikálních modelů) s korozními moduly (obsahující korozní vzorky), jejich instalace do vrtů, zatěžovací fáze (zahřívání, aby teplota na povrchu korozních vzorků byla 70 až 95 °C) a vyjmutí sestav z vrtů pro laboratorní analýzy materiálů (Obr. 25).
- Pět vrtů bylo vybaveno sestavami obsahujícími bentonit BCV s práškovým železem, vzorky uhlíkové oceli – základní materiál a vzorky uhlíkové oceli – svar. Dalších pět vrtů bude obsahovat sestavy bez přidaného práškového železa a vzorky mědi a uhlíkové oceli – základní materiál. Každý z modulů obsahuje dostatečné množství korozních vzorků pro statistické vyhodnocení korozní rychlosti. Sestavy obsahují topidla pro zahřívání materiálů a simulaci prostředí HÚ. Prostor uvnitř modulů kolem korozních vzorků je vyplněn lisovaným bentonitem s objemovou hmotností sušiny větší než 1500 kg/m³. Materiál pro vzorky uhlíkové oceli vycházel z projektu Výzkum a vývoj ukládacího obalového souboru pro hlubinná úložiště (Kotnour et al. 2019). Jednotlivé sestavy budou rozebrány v následujících časových intervalech: 1, 3, 5, 7 a 10 let.

- V průběhu celého řešení experimentu bude prováděn hydrogeologický a mikrobiologický monitoring vod. Všech deset vrtů je určeno pro případnou instalaci dalších korozních sestav po vyjmutí původních, jejichž potřeba vyplyne v průběhu řešení projektu.
- Uvažovaná je také instalace 11. modulu, který by byl bez topného systému a poskytnul by srovnávací vzorky neovlivněné zahříváním.

Průběžné výsledky

- Momentálně je tento experiment ve fázi přípravy korozních modulů a jejich instalace do vrtů. Výsledky hydromonitoringu a mikrobiologického monitoringu shrnují charakteristiku podmínek pro pilotní korozní experiment v jednotlivých vrtech.
- Průběhy hodnot Eh mají variabilní charakter jak v čase, tak v jednotlivých profilech vrtů. Po odvrtání a během prvního měsíce monitoringu se hodnoty pohybovaly mezi 222 mV (vrt K6) a 396 mV (vrt K2). Elektrická vodivost (EC) se ve vrtech K1-10 pohybuje mezi 480–660 $\mu\text{S}/\text{cm}$.
- Ve vybraných vrtech byl sledován časový vývoj koncentrací kyslíku. U vrtu K3 došlo po cca 5 dnech k poklesu koncentrace kyslíku z 1,2 mg/l až na mez detekce (<0,02 mg/l). Podobný trend poklesu kyslíku byl sledován u vrtu K5, kdy počáteční koncentrace byla kolem 6 mg/l a během cca 8 dnů postupně klesla až na hodnoty <0,02 mg/l. Rozdílný průběh vývoje kyslíku byl pozorován u vrtu K6, kdy během cca 14 dnů došlo pouze k mírnému poklesu z hodnoty 6,2 na 5,7 mg/l.
- Ze současných výsledků mikrobiálních analýz je patrné, že nedochází k nárůstu obligátních (striktních) anaerobů ve sledovaných vrtech a není ani patrný trend vývoje parametrů v jednotlivých vrtech v čase. V současné době dominují ve vrtech mikroorganismy využívající kombinaci kyslíku a dusičnanů jako TAE. Po doposud provedených třech odběrech nelze pozorovat mikrobiologické ustálení vázané na nastolení redukčních podmínek ve vrtech. Výsledky mikrobiologických analýz tak odpovídají hydrochemickým měřením. Z výsledků měření je možné pozorovat značně rozdílné hydrochemické podmínky v jednotlivých vrtech (především koncentraci kyslíku a oxidačně-redukční potenciál).



Obr. 25 – Návrh modulu pro korozní experiment (Dobrev et al. 2022)

5.5 Teplotní monitoring (2021-2025/2030)

Název zakázky: Monitoring teploty v PVP Bukov a dolu Rožná I

Řešitelé: Technická univerzita v Liberci, Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií; Geofyzikální ústav AV ČR, v. v. i.

Vazba k programu HÚ

Jeden ze základních předpokladů pro prokázání dlouhodobé bezpečnosti a technické proveditelnosti HÚ je detailní znalost procesů, které se odehrávají v hloubce úložiště. Znalosti teplot horninového masivu v různých hloubkách pod povrchem a teplotního vývoje horninového masivu v okolí důlních děl jsou nezbytné vstupy pro projektové činnosti. Jedná se také o vstupní parametry potřebné pro modelovací aktivity nutné k bezpečnostním hodnocením lokalit. Tento program má přinést informace o teplotním vývoji horninového masivu v okolí otevřených podzemních prostor, které jsou potřebné pro experimenty zabývající se šířením tepla.

Cíle

- Získání reálných dat potřebných pro vývoj matematických modelů pro simulace šíření tepla v hostitelské hornině v HÚ a dimenzování podzemních chodeb HÚ.
- Získání hodnot teploty horninového masivu od povrchu do hloubky 500 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.

Způsob řešení

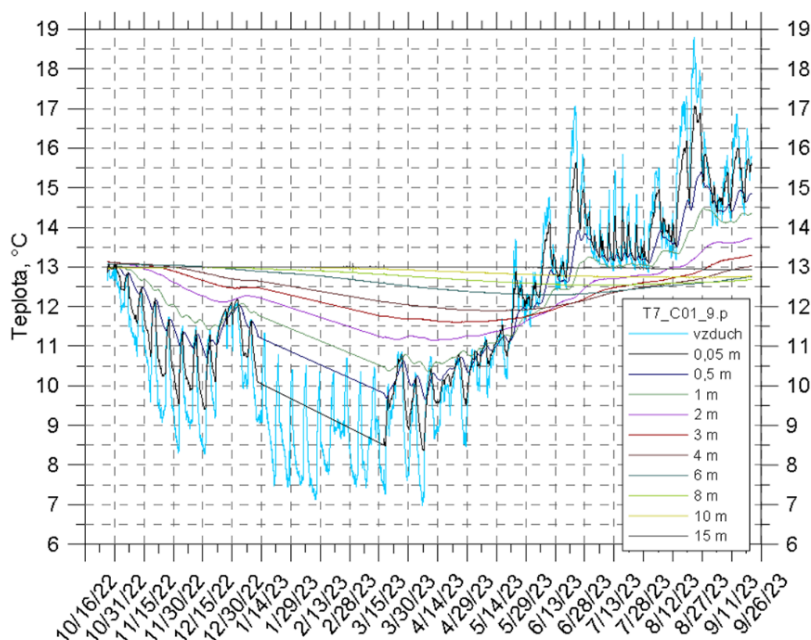
- Příprava monitorovacích stanovišť s vrtly vystrojenými teplotními čidly. Předpokládá se vytvoření několika stanovišť v patrech nad úrovní PVP Bukov poblíž jámy B-1 a větší hustota stanovišť bude uvnitř laboratorních chodeb na 12. patře, kde je možnost napojení instrumentace na datovou síť.
- Vystrojení vrtů teplotními senzory do hloubky až 15 m tak, aby byla zachycena předpokládaná křivka vývoje teploty se vzdáleností od větrané podzemní chodby. Kromě monitoringu teploty ve vrtech bude také měřena teplota a vlhkost vzduchu v chodbách u monitorovacích stanovišť. Minimální doba monitoringu teplot bude 4 roky.
- Matematické modelování s prioritami vytvoření modelu vývoje teploty v masivu v zájmových místech a zjištění původní teploty masivu před vytvořením podzemních prostor.
- Návrh kalibračního ventilačního experimentu. Účelem tohoto navazujícího in-situ experimentu bude za přesně definovaných podmínek poskytnout data pro kalibraci vytvořeného modelu. Experiment pomůže snížit nejistoty a bude tak dosaženo objektivnějších výsledků modelu šíření tepla v horninovém masivu. Technické řešení bude založeno na izolaci části speciální zkušební komory, kde bude možné regulovat teplotu ovzduší za pomoci ventilačního systému.

Průběžné výsledky

- V říjnu 2022 byla zprovozněna síť prvních osmi vrtů. Tři patnáctimetrové vrty byly odvrtnuty a instrumentovány na stanovištích na 3., 5. a 9. patře u jámy B-1. V PVP Bukov I byly osazeny 2 starší vrty a 2 nově odvrtné pro tento účel. Poslední osazený vrt se nachází poblíž jámy B-2.
- Každý z vrtů je osazen deseti teplotními čidly. Na každém ze stanovišť je zároveň měřena teplota a vlhkost vzduchu.
- Pro všechna stanoviště byl vytvořen geologický model. Dále probíhají přípravné fáze pro tvorbu matematických modelů stanovišť.
- Pro získání tepelných vlastností horninové matrice jsou prováděna laboratorní měření na vzorcích hornin z vrtů. Parametry jsou určovány pomocí metody optického skenování a metodě „Hot Disk“ (Dědeček et al. 2022).
- V současnosti je k dispozici datová řada o délce jeden rok, na které jsou patrné sezónní fluktuace a vliv ventilace v dole (Obr. 27).
- V říjnu 2023 byly osazeny další dva vrty v prostorách PVP Bukov II.



Obr. 26 – Zhlaví monitorovacího vrtu a měřící ústředny



Obr. 27 – Průběh teplot ve vrtu na stanovišti na 9. patře jámy B-1

5.6 EURAD WP MAGIC (2021 – 2024)

Název zakázky: EURAD - Chemo-Mechanical AGIng of Cementitious materials under coupled disturbances based on a multiscale approach

Řešitelé: Český tým – SÚRAO, ČVUT v Praze, ÚJV Řež, Technická univerzita Liberec, CVŘ

Vazba k programu HÚ

Beton se sníženým pH se v HÚ plánuje použít primárně jako konstrukční materiál (např. pro stabilizaci chodeb a zátky). Jeho hlavní výhodou je, že díky sníženému pH nebude negativně ovlivňovat chování bentonitu, který bude mít v HÚ zásadní bezpečnostní funkci. SÚRAO si nechala v roce 2019 vyvinout beton se sníženým pH (Pernicová et al. 2019), v rámci čehož byla odlita i zkušební tělesa pro ověření stability materiálu v čase. Experiment MAGIC simuluje materiálové interakce v podmínkách odpovídajících prvním letům po výstavbě betonových konstrukcí na ukládacím horizontu HÚ.

Cíle

- Studium mechanických, chemických a strukturních vlastností betonu se sníženým pH v rozdílných podmínkách relevantních pro HÚ včetně speciálního zaměření na vliv mikroorganismů.
- Ověření vlastností a stability nově vyvinutého betonu specifického svým sníženým pH na zkušebních tělesech (viz Pernicová et al. 2019).

Způsob řešení

- Laboratorní testy zkušebních těles na začátku projektu MAGIC (po 3 letech od odlití těles) a po 2 letech trvání projektu (5 let od odlití těles). Vzorky na vzduchu jsou umístěny v PVP Bukov I na konci chodby BZ1-XII (Obr. 28).
- Příprava vzorků pro testování vlivu prostředí (válce, disky, drť).
- „Stažení“ vzorků ve třech různých prostředích – podzemní voda, bentonitová suspenze a přirozená vlhkost v podzemí. Tyto vzorky jsou umístěny na stanovišti v dopravní chodbě spojující PVP Bukov I a PVP Bukov II (Obr. 29). Pro testování vlivu přítomnosti pozemní vody byly zkonstruovány průtočné boxy, ke kterým je napojen zdroj podzemní vody z vrtu S-25. Instalace proběhla v březnu 2022.
- Laboratorní testy vzorků ze stařících procedur ve 4 obdobích (po 6, 12, 18 a 24 měsících).

Průběžné výsledky

- První výsledky na zkušebních tělesech prokázaly rostoucí pevnost v tlaku v čase a trend mírně klesajícího pH.
- Průběžné výsledky jsou prezentovány v rámci projektu EURAD. Zpráva shrnující konečné výsledky bude zpracována na konci projektu (v roce 2024).



Obr. 28 – Uskladnění svědečných vzorků na vzduchu



Obr. 29 – Stanoviště projektu MAGIC s průtočnými nádobami

5.7 Napjatost (2023-2025/2027)

Název zakázky: Stanovení in-situ napjatosti v PVP Bukov II

Řešitelé: Ústav geoniky AV ČR, v.v.i.

Vazba k programu HÚ

V horninovém masivu HÚ bude nutné ověřit velikosti a orientace hlavních směrů geostatického napětí. Do té doby je nutné vyvinout, otestovat a navrhnout způsob monitoringu napětí, který bude aplikován při výstavbě a provozu HÚ. Metody, které jsou stále ve fázi vývoje, je ideální testovat v hloubce odpovídající HÚ s příslušnou geostatickou napjatostí.

V PVP Bukov bylo v minulosti použito několik různých metod pro získání dat pro určení tenzorů napjatosti. V rámci projektů Charakterizace I (kap. 4.1), EDZ (kap. 4.2) a Hluboké horizonty (kap. 4.4) byly v různých místech aplikovány metody pro určení napjatosti a dlouhodobé monitorování změn napětí v okolí podzemních chodeb. Jednalo se o měření s využitím tenzometrických svorníků, metodu odlehčení vrtného jádra, metodu hydraulického porušování stěn vrtů, nebo dlouhodobý monitoring napětí pomocí kuželových tenzometrických sond ve vrtech. Další informace přineslo i inverzní modelování s daty z konvergenčních měření. Veškeré doposud použité metody na PVP Bukov přinesly relativně rozličné hodnoty směrů a velikostí složek napětí. Tyto rozdíly byly částečně dány heterogenitou vlastností místních hornin, ale také nejistotami a nepřesnostmi metod samotných. Tento projekt má přinést nové informace z oblasti PVP Bukov II a celkově vyhodnotit tuto problematiku.

Cíle

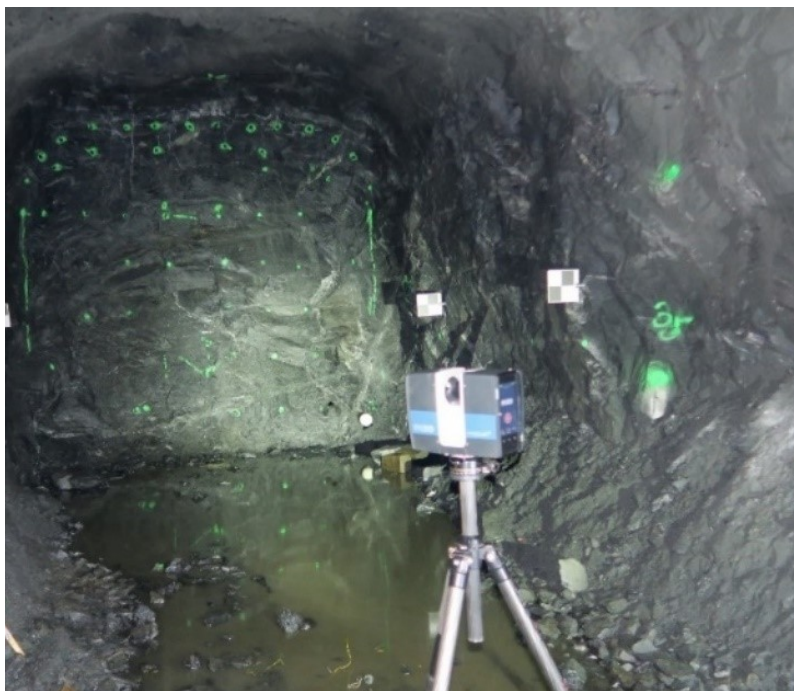
- Návrh a realizace vhodného postupu prací pro získání dat a vyhodnocení napjatosti horninového masivu v prostoru PVP Bukov II s aplikací metod použitých v minulosti v PVP Bukov I a jiných částech dolu (konvergenční měření a související inverzní analýza, metody měření deformací ve vrtech s kuželovými tenzometrickými sondami, hydraulické štěpení stěn vrtů).
- Kompilace všech dostupných dat (z jiných projektů a tohoto projektu) a vyhodnocení tenzoru napjatosti v prostoru PVP Bukov II.
- Návrh a realizace experimentální metody určení napjatosti pomocí měření deformací s využitím velkoprofilových jádrových vrtů.
- Zpracování rešerše metod a studie využití metod měření napjatosti v procesu výstavby a provozu HÚ.
- Návrh případného dalšího výzkumného programu a in-situ experimentů týkajících se in-situ napjatosti.

Způsob řešení

- Monitorování a analýza vývoje napětí v napjatostním pilíři (blok horniny mezi chodbami L4a, L4b, L4c a L4d) a jeho okolí pomocí metody konvergenčního měření a kuželových tenzometrických sond (metody CCBO a CCBM).
- Testování nové metody měření deformací jádrových vrtů průměru 300 mm vrtaných do stěn chodeb poblíž čelby raženého díla.
- Podpůrné matematické modelování.

Průběžné výsledky

- S předstihem před zahájením ražby chodby L4b v PVP Bukov II byly z prostoru chodby L4a provedeny dva jádrové vrty. Ve vrtech byla provedena metoda s obvrtáním kuželové tenzometrické sondy (metoda CCBO) a na konec vrtů instalovány sondy pro dlouhodobý monitoring. Půdorysné umístění obou sond je ve středu napjatostního pilíře. Sondy umožní sledovat změny napjatosti vlivem ražby okolních chodeb.
- Při ražbě chodby L4b byly instalovány první konvergenční stanice. Konvergence chodeb jsou měřeny pomocí běžného konvergenčního pásma a dále také opakováním laserscanů chodeb v místech stanic (Obr. 30).
- V chodbě L4b byly vytvořeny první 2 experimentální jádrové vrty průměru 300 mm určené pro měření deformací.



Obr. 30 – Pohled na stanoviště konvergenční stanice v chodbě L4b se zařízením pro laserscan

5.8 Obrysová trhací práce (2023)

Název zakázky: Obrysová trhací práce při ražbě ZK na PVP Bukov

Řešitelé: Montanika z.s.

Vazba k programu HÚ

V případě použití trhacích prací pro ražbu důlních děl v HÚ bude klíčové použití odzkoušených postupů s co nejmenším vlivem na porušení okolního horninového masivu (rozsah a parametry oblasti EDZ a EIZ). Ražba PVP Bukov II poskytuje jedinečnou příležitost k odzkoušení různých metod obrysových trhacích prací a jejich srovnání.

Cíle

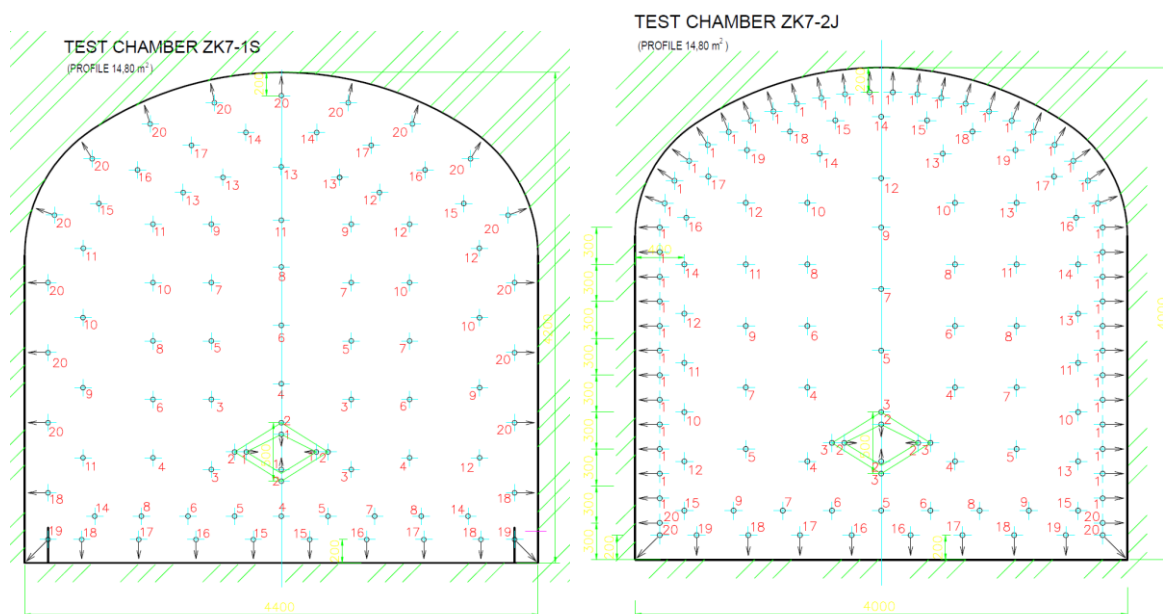
- Realizace výlomu horniny různými modifikacemi technologie trhacích prací s ohledem na ovlivnění horninového masivu v okolí výrubu.
- Vyhodnocení a vzájemné srovnání chodeb ražených rozdílnými postupy.

Způsob řešení

- Zpracování různých vrtných schémat a nabíjecích plánů pro trhací práce pěti zkušebních komor ražených z chodby L7 (ZK7-1S, ZK7-1J, ZK7-2J, ZK7-2S, ZK7-3J). Modifikace spočívají například v úpravě uspořádání vrtů (vrtných schémat), v použití jiných druhů náloží, nebo úpravě pořadí a časování odstřelů jednotlivých vrtů (Obr. 31).
- Realizace ražeb.
- Vyhodnocení kvality provedení výrubu a stavu horniny v okolí chodeb. Pro vyhodnocení parametrů a rozsahu oblasti EDZ se předpokládá využití geofyzikálních prací. Srovnání modifikovaných postupů s obvyklým postupem aplikovaným pro ražbu laboratorních chodeb.

Průběžné výsledky

- Všechny zkušební komory v chodbě L7 byly úspěšně vyraženy v období března až června 2023.
- V současnosti probíhají charakterizační a vyhodnocovací práce.



Obr. 31 – Srovnání dvou vybraných použitých vrtných schémat

6 Oblasti plánu V&V a stav jejich řešení

V této kapitole jsou popsány všechny aktuální oblasti výzkumných prací, které jsou již částečně v řešení (jsou naplňovány prostřednictvím zakázek popsaných v předchozí kapitole) anebo se u nich předpokládá potřeba nové zakázky (je plánován nový nebo doplňující experiment). Oproti první verzi plánu V&V z roku 2021 (Smutek et al. 2021) byla provedena úprava strukturování jednotlivých oblastí a přibyla část s popisem vývoje stavu řešení. Tab. 5 obsahuje přehled všech dílčích oblastí s uvedením hlavních dotčených oblastí programu SÚRAO (viz kap. 2.4).

Tabulka 5 – Přehled řešených oblastí plánu V&V

Název oblasti	Hlavní dotčená oblast programu SÚRAO
Kap. 6.1.1 Horninové klasifikační systémy	VEP1
Kap. 6.1.2 Charakterizace EDZ a EIZ	VEP5
Kap. 6.2.1 Procesy advekčně-disperzního transportu	VEP3
Kap. 6.2.2 Procesy difuze	VEP3
Kap. 6.2.3 Modelové koncepce v oblasti proudění podzemních vod	VEP3
Kap. 6.2.4 Nejistoty in-situ transportních parametrů	VEP3
Kap. 6.2.5 Proudění v EDZ a EIZ	VEP5
Kap. 6.3 Testování realizace a charakterizace ukládacích vrtů	VEP6
Kap. 6.4.1 Beton se sníženým pH	VEP4
Kap. 6.4.2 Dlouhodobá laboratoř	VEP4
Kap. 6.4.3 Experimentální studium THM(C) procesů – Experiment HEAT	VEP4
Kap. 6.4.4 Eroze bentonitu a transport koloidů (ERO)	VEP4
Kap. 6.4.5 Expanze bufferu do backfillu a zatížení UOS (EXP)	VEP4
Kap. 6.4.6 Demonstrační experiment prototypového úložiště (DEMO)	VEP7

6.1 Charakterizace horninového prostředí

Na základě vývoje programu přípravy HÚ v posledních letech související se zkrácením doby celého procesu přípravy HÚ byla z plánu pro PVP Bukov vypuštěna aktivita zahrnující realizaci testovacího hlubinného vrtu z povrchu (oblast: Technologie popisu izolační části úložiště vrtnými pracemi). Vzhledem k blízkému se termínu zahájení vrtných prací v kandidátních lokalitách pro HÚ byla tato aktivita zhodnocena jako neúčelná a vyřazena z plánu. Obě dále zmíněné oblasti zabývajícími se horninovými klasifikačními systémy a charakterizací EDZ a EIZ jsou již částečně v řešení v rámci některých probíhajících zakázek popsaných v Kap. 5.

6.1.1 Horninové klasifikační systémy

Vazba k programu HÚ

Klasifikační systémy horninového prostředí definují základní požadavky na uspořádání HÚ na lokalitě a základní parametry jeho izolační části (Andersson et al. 2000; Hagros et al. 2005). K definování tohoto systému je důležité použití dat z odpovídající hloubky úložiště. Tato oblast souvisí s kapitolou 9.2.2 Plánu V&V SÚRAO 2020.

Cíle

- Odvození horninového klasifikačního systému určeného pro popis prostředí HÚ a pro definování vhodnosti horninového prostředí, který vedle geologických charakteristik zahrne i geomechanické, hydrogeologické a hydrogeochemické požadavky.
- Otestování klasifikačního systému, upraveného dle specifik horninového prostředí českého masivu, v PVP Bukov.

Způsob řešení

Pro vytvoření vlastního klasifikačního systému budou přehodnoceny používané klasifikační systémy (např. Barton 1987; Bieniawski 1989; Andersson et al. 2000; Hagros et al. 2005). Budou posuzovány parametry prostředí, které mají vliv na dlouhodobou bezpečnost (pole blízkých a vzdálených interakcí), design úložiště a náročnost při výstavbě (razitelnost, vrtatelnost, mechanická stabilita horniny, přítoky podzemní vody atd.) s ohledem na vyvíjený systém řízení požadavků na HÚ a respektující bezpečnostní cíle HÚ.

Klíčové parametry, které budou použity pro sestavení klasifikačního systému, jsou litologie hostitelské horniny (minerální složení, foliace, zrnitost, pórovitost a jiné), regionální a lokální poruchové zóny, individuální křehké deformace, mechanické vlastnosti horninového materiálu a poruch (pevnostní a deformační), napjatostní stav, termální vlastnosti hornin, teplota prostředí, hydrogeologické parametry (hydraulické parametry, viskozita vody apod.), hydrogeochemie a transportní vlastnosti.

Stav řešení

V rámci probíhající zakázky Charakterizace II (kap. 5.3) se výzkumný tým zabývá návrhem a testováním systému označovaného jako Klasifikace Horninových Bloků (KHB). Program využívá postupného získávání dat při ražbě PVP Bukov II. V průběhu řešení vznikla první verze klasifikace založená na zkušenostech finského konceptu. Testovaný klasifikační systém má dva stupně. Cílem prvního stupně je zhodnotit, zda je vhodné vůbec přístupovou (zavážecí) chodbu k ukládacím vrtům vůbec razit, a to na základě informací z pilotních vrtů. Hodnocenými parametry v prvním stupni jsou: klasifikační index RQD, rychlost šíření seismických vln a hydraulická vodivost horniny. V druhém stupni hodnocení jsou pak určujícími parametry: počet bodů klasifikačního indexu Q (Barton 1974) a rychlost šíření seismických vln. Druhý stupeň hodnocení má přímo definovat vhodná místa pro lokalizaci ukládacích vrtů. Vhodné úseky jsou u obou stupňů hodnocení redukovány „kritickými objemy“ okolo „kritických struktur“ (termíny zavedené ve finském klasifikačním systému: Hagros et al. 2005), případně geochemickými limitami prostředí.

6.1.2 Charakterizace EDZ a EIZ

Vazba k programu HÚ

V okolí ražených důlních děl dochází k poškození a ovlivnění přilehlé části horninového masivu. V HÚ bude nutné aplikovat odzkoušené metody pro ověření rozsahu a charakterizaci poškozené (EDZ) a narušené/ovlivněné (EdZ, EIZ) oblasti hornin v okolí podzemních děl, přičemž tyto metody jsou v současné době ve fázi vývoje. Důležitá je především oblast EDZ, protože ta může mít o jeden až tři řády vyšší propustnost než nepoškozený horninový masiv a tvořit preferenční cesty pro proudění vod a transport látek.

Tato problematika je na PVP Bukov průběžně řešena a byla k ní získána relevantní data. Jednalo se především o projekt EDZ (kap. 4.2) a projekty zabývající se geofyzikálními metodami (kap. 4.6 a 4.11.1). Nedostatkem doposud realizovaných aktivit je nemožnost interpretovat výsledky geofyzikálních měření ve smyslu přesnějšího určení rozsahu poškozené oblasti. Pro to by bylo vhodné tato měření doplnit některými metodami s přímým pozorováním. Některé další informace přinese projekt Charakterizace II (kap. 5.3), kde je v plánu provádění hydrotestů v krátkých vrtech pro sledování změn propustnosti poškozené oblasti horniny.

Cíle

- Doplnění znalostí o vlastnostech a rozsazích poškozené a ovlivněné oblasti hornin na PVP Bukov pomocí metod nepoužitých v předešlých projektech a probíhajícím projektu Charakterizace II (kap. 5.3).
- Zhodnocení a návrh metod pro charakterizaci poškozené a ovlivněné oblasti hornin při různých fázích výstavby a provozu HÚ.

Způsob řešení

Tento program obnáší realizaci speciálních metod pro získání přímých měření pro interpretaci rozsahů a vlastností poškozené a ovlivněné oblasti horniny. Pro tyto činnosti se předpokládá příprava zvláštní zkušební komory, kde bude možné nerušeně provádět dlouhodobá měření pro sledování vývoje poškozené a ovlivněné oblasti. Důraz bude kladen na oblast EDZ, jejíž rozsah se v horninách krystalinika pohybuje v řádu decimetrů až prvních metrů.

Mezi potenciální metody vhodné pro zařazení do programu patří například zmapování puklinového systému pomocí injektáže pryskyřice do horniny v oblasti EDZ, odvrtání vzorků (například pomocí lanové pily) a laboratorní analýzy zainjektovaného pórového prostoru. Součástí prací bude i zhodnocení a návrh metod pro použití v HÚ, kde bude především v průběhu výstavby nezbytné provádět dostatečně rychlá měření aplikovatelná v celém prostorovém rozsahu podzemí.

Stav řešení

V rámci probíhající zakázky Charakterizace II (kap. 5.3) bylo navrženo a odzkoušeno zařízení určené pro vodní tlakové zkoušky ve velmi krátkých úsecích jádrových vrtů. V prostorách PVP Bukov II je postupně tvořena série krátkých subvertikálních jádrových vrtů o délkách 1 nebo 2 m, ve kterých jsou prováděny systematické vodní tlakové zkoušky pro určení hydraulické vodivosti různých úseků. Injektážní zařízení s dvojítm pakrem umožňuje testovat hydraulickou vodivost v různých hloubkových úrovních vrtů, a to včetně části těsně za ústím vrtu nacházející se v EDZ. Součástí plánované interpretace této aktivity je srovnávání výsledků

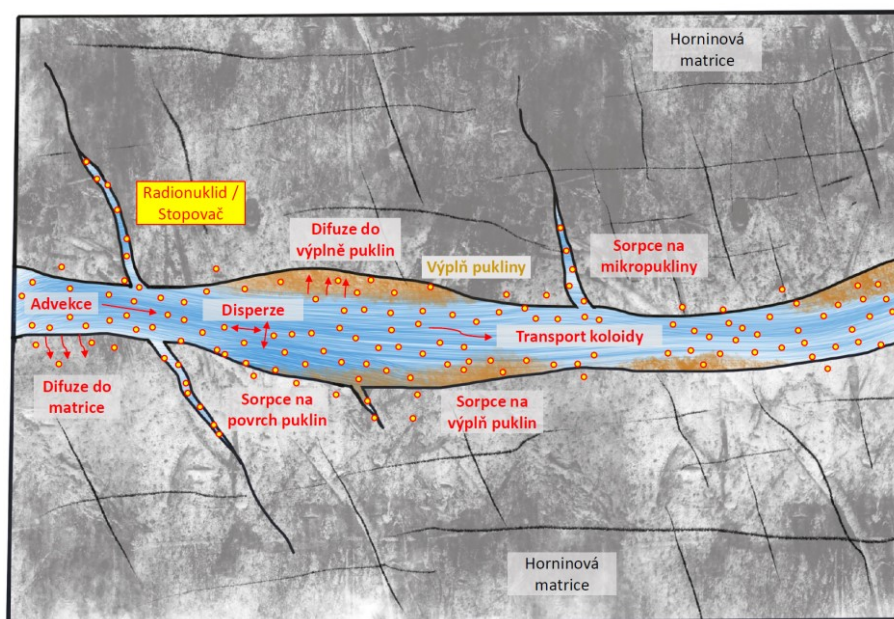
hydraulických vodivostí s výsledky geofyzikálních měření na stěnách chodeb v místech testovacích vrtů.

6.2 Migrace látek v horninovém prostředí

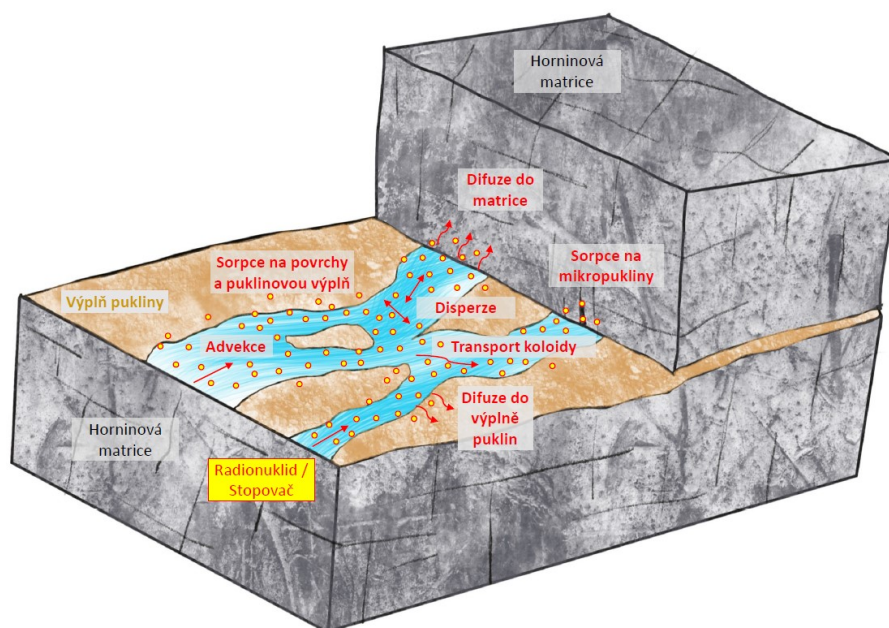
Tyto experimenty jsou určeny pro naplnění cíle č. 4 z Plánu V&V SÚRAO 2020, a to Ověření predikce transportu mobilních radionuklidů v izolační části úložiště. Program zahrnuje pokračování ve studiu transportních procesů látek v puklinovém prostředí hornin krystalinika s použitím aktivních i neaktivních stopovačů a související program matematického modelování.

Základními transportními procesy v horninovém prostředí jsou advekce, hydrodynamická disperze, sorpce/retardace a difuze do matrice (Obr. 32 a Obr. 33). Advekce je daná rychlostí pohybu vody v horninovém prostředí a její hodnotou je podíl specifického průtoku a efektivní pórovitosti. Hydrodynamická disperze je způsobena molekulární difuzí ve vodě a mechanickou disperzí, která je důsledkem nerovnoměrností toku v podélném, příčném a vertikálním směru. Difuze do matrice probíhá z pukliny do nasycené horniny s neproudící vodou. Do popisu difuze do matrice vstupují kromě difuzního koeficientu ve vodě také parametry horniny jako jsou tortuozita a pórovitost. Posledním hlavním procesem je sorpce na povrch puklin a puklinové výplně. V případě sorbujících radionuklidů bude sorpce pravděpodobně tvořit hlavní zádržní mechanismus. Transportní mechanismy závisí na vlastnostech mobilních fází, jež se mohou v čase a prostoru měnit (chemismus, teplota, hustota, dynamická viskozita). Mezi další procesy patří transport koloidy, který může zejména u silně sorbujících radionuklidů tvořit hlavní mechanismus migrace na dlouhé vzdálenosti. V závislosti na mobilitě koloidů bude mít pak tento mechanismus buď retardační nebo v případě mobilních koloidů urychlující transportní funkci.

Výše uvedené procesy jsou kromě distribuce puklin, tradičně reprezentované sítí polygonů, silně ovlivněny nehomogenitami v rámci jednotlivých puklin (tzv. *channeling*; Obr. 33). Vnitřní nehomogenity puklin ovlivňují dobu zdržení radionuklidů, jednak variabilitou objemových průtoků uvnitř pukliny, která může v závislosti na propojenosti vnitřních struktur dobu zdržení zkracovat nebo prodlužovat. Oproti homogenním puklinám také dochází ke změnám kontaktní plochy migrujících radionuklidů, což se projeví na poměru nasorbovaných radionuklidů na povrch pukliny či puklinové výplně a rovněž tak může měnit hodnoty difuze do matrice (poměr množství difundovaných radionuklidů k celkovému množství).



Obr. 32 – Schéma transportních procesů v puklinovém prostředí ve 2D



Obr. 33 – Schéma transportních procesů v puklinovém prostředí ve 3D

Program výzkumu migrace látek byl zahájen realizací projektu Puklinová konektivita (kap. 5.2). Jeho průběžné výsledky prokázaly významné tektonické porušení vybraného horninového bloku s přítomností některých poruchových zón v mocnosti řádu decimetrů. Zároveň zde byly zjištěny velmi nízké hodnoty pórového tlaku vody ve zvodněných strukturách, což poukazuje na propojenost puklinových systémů s komplexem chodeb. Stanoviště tohoto projektu je vhodné pro naplnění základních cílů projektu, což je především studium propojenosti puklinových systémů. Zkoumaný blok jako celek pravděpodobně nebude dostačující reprezentací pro ukládací místo v HÚ (izolační část), a proto je na programu výběr nového místa pro migrační zkoušky v prostorách PVP Bukov II.

Pro studium difuzního transportu jsou uvažovány dva způsoby. Jednou cestou je samostatný dlouhodobý difuzní experiment ve zvláštních vrtech (minimálně 3) tak, jak je popsáno v dokumentu s plánem experimentů z roku 2019 (Svoboda et al. 2019). 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 zvážení možnosti kombinovaného experimentu sledujícího procesy advekce, difuze a sorpce (příp. disperze, která nemusí být uvažována v případě usměrněného proudění puklinou). Tento způsob by obnášel nalezení vhodné diskrétní pukliny (uvnitř nového stanoviště pro stopovací zkoušky mezi vrty), která by po detailní charakterizaci mohla být použita pro testy s koktejly radionuklidů (popřípadě jiných stopovačů reprezentujících různě sorbující radionuklidy) podobným způsobem jako je plánováno v projektu LTD (Fáze 4) v Grimsel Test Site. Zde je ve vybrané střížné zóně vyplněné minerální výplní připravována stopovací zkouška s radionuklidy na vzdálenost cca 1,2 m. Projekt LTD se v této fázi snaží přejít od studia prosté difuze do granitové horninové matrice ke komplikovanějšímu systému minerálů a porušených hornin v puklině, kdy difuze přispívá k retenci radionuklidů při advektivním transportu puklinou. Jsou zde uvažovány jak procesy difuze a sorpce na minerální výplň a horninovou matrici tak i procesy advekce. LTD experiment se tak snaží přiblížit reálnému chování migrace radionuklidů v kvalitně charakterizované puklině.

Ideální podmínky pro kombinovaný typ experimentu:

- Diskrétní, vhodně ohraničená puklina v saturované zóně monotónní části horninového masivu s minerální výplní a pomalým prouděním podzemní vody.
- Dostupnost testované pukliny s možností odvtání a vyjmutí vzorku horniny.
- Možnost nastavení dostatečně dlouhé stopovací zkoušky s 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.

Z hlediska modelování je tato oblast experimentů 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. Hlavními procesy ovlivňujícími migraci a zdržení radionuklidů jsou advekce, sorpce a difuze. Dalším přidruženým transportním médiem pak mohou být plyny a koloidy. Výsledky plánovaných in-situ experimentů budou uplatněny pro tvorbu modelů geosféry části transportní cesty, do kterého budou jako vstupní parametry vstupovat vlastnosti průtokových cest (pukliny) a zádržné vlastnosti horninové matrice.

Níže jsou rozpracovány zvlášť obě zájmové oblasti programu pro případ jejich oddělené realizace (kap. 6.2.1 a kap. 6.2.2).

6.2.1 Procesy advekčně-disperzního transportu

Vazba k programu HÚ

Viz společná úvodní část kapitoly.

Cíle

- Zlepšení porozumění procesům transportu a zadržování vybraných stopovačů v puklinovém prostředí PVP Bukov a testování modelů, kterými lze tyto procesy popsat.
- Věrohodné nasimulování proudění v izolační části hlubinného úložiště s využitím příslušných matematických prostředků.
- Realizace stopovacích experimentů s využitím neaktivních stopovačů a barviv a případně i radioaktivních stopovačů, jejichž významnou výhodou je jejich dobrá detekce ve velmi nízkých koncentracích a věrnější simulace reálných procesů transportu radionuklidů uvolněných z UOS.

Způsob řešení

Program bude obnášet výběr místa a postupnou přípravu nového stanoviště pro tyto druhy testů. Ve vybraném místě bude zahájeno budování laboratorního zázemí, mapovací a charakterizační práce. Cílovými parametry horninového bloku pro realizaci testů je nízká propustnost a nepřítomnost výrazných hydraulicky vodivých zón takových, jaké nesmějí křížit ukládací vrty v HÚ. Horninový blok by měl být také co nejméně ovlivněn okolními otevřenými prostory chodeb. Masiv by měl být nasycený podzemní vodou, pórový tlak vody by měl být co nejvyšší a zvodnělé puklinové systémy by neměly výrazně komunikovat s chodbami laboratoře.

Ve vybraném horninovém bloku bude postupně tvořena síť jádrových vrtů pro počáteční charakterizační práce. Vrtů budou v první fázi sloužit pro dlouhodobý monitoring hydraulických poměrů v horninovém bloku a budou v nich realizovány základní hydraulické testy. Hydrotesty bude také možné doplnit zkouškami plynopropustnosti. Zároveň bude sestavován geologický a hydraulický model horninového bloku, který bude sloužit pro simulaci následných testů. Před provedením stopovacích zkoušek je nutné zevrubné zmapování a detailní pochopení hydraulického chování horninového bloku, doložené validovaným hydraulickým modelem.

Testovací vrty budou osazeny multipakry oddělovacími vybrané zájmové struktury. Pro studium transportních procesů je vhodná přítomnost oddělené hydraulicky vodivé pukliny protnuté více vrty, podrobně zmapované a zcharakterizované sítě puklin a také anaerobní podmínky. Po provedení základních hydrotestů mezi etážemi multipakrů, které definují hydraulickou konektivitu a hydraulické parametry horniny, bude přistoupeno ke stopovacím zkouškám. Obvyklá stopovací zkouška zahrnuje vtlačení vybraného stopovače nebo směsi stopovačů do vybrané etáže vrtu a monitoring koncentrace stopovače v monitorovacích etážích vrtů a sledování průnikových křivek. Obecně v tomto programu patří mezi základní sledované veličiny rychlost proudění, difúze do matrice, disperze a případně smáčený povrch pukliny. In-situ práce budou doplněny laboratorním programem a provázány s modelováním.

Zkoušky s aktivními stopovači je možné provádět pouze v kontrolovaném pásmu pro nakládání se zdroji ionizujícího záření dle požadavků Atomového zákona a vyhlášky 422/2016 Sb. a před zahájením těchto aktivit je nezbytné získání povolení od SÚJB pro konkrétní typy experimentů.

Stav řešení

V současnosti probíhá ražba nové části laboratoře PVP Bukov II. Charakterizační a monitorovací práce v průběhu ražby prokázaly přítomnost velmi kompaktní horniny s některými oblastmi bez výrazně hydraulicky vodivých puklinových zón. Vodní tlakové

zkoušky realizované v některých vrtech prokázaly přítomnost velmi dlouhých etází vrtů s extrémně nízkou hydraulickou vodivostí. Monitoring hydrostatických tlaků vody v pilotních vrtech ražených chodeb zase prokázal, že horninový masiv je nasycený podzemní vodou a zjištěné hodnoty tlaků vody dosahují hodnot až 1,2 MPa. Jedná se především o jižní část komplexu kolem chodeb L7 a L8 s velmi kvalitní horninou. Právě zkušební komory v chodbě L8 byly vyhodnoceny jako vhodné zázemí pro další plánované aktivity v této oblasti. Další směřování a specifikace navazujících aktivit bude také záviset na výsledcích a doporučeních zakázky Puklinová konektivita (kap. 5.2).

6.2.2 Procesy difuze

Vazba k programu HÚ

Viz společná úvodní část kapitoly.

Cíle

- Zlepšení porozumění procesu difuze jako migračního procesu do horninové matrice nebo do puklinového prostředí (odhad zádržných funkcí horninového masivu).
- Získání dat pro matematické modely popisující proces difuze do horninové matrice a v puklinovém nebo zlomovém prostředí.
- Porovnání výsledků in-situ dat s výsledky laboratorních programů na vzorcích hornin (*upscaling*) a porovnání výsledků z PVP Bukov s výsledky obdobných testů v Grimsel Test Site a Äspö HRL.

Způsob řešení

Možný experiment obnáší injektáž roztoku stopovačů ze vtláčecího vrtu do horninového masivu, kde je roztok ponechán po definovanou dobu. V průběhu této doby je v okolních monitorovacích vrtech sledována změna koncentrace/aktivity stopovačů a vyhodnocován proces difuze. Pro tento typ experimentu je nutné nalézt neporušený blok horniny bez přítomnosti tektonických struktur s advektivním prouděním vody v puklinách. Dále je potřebné plné nasycení horninového bloku a případně anaerobní podmínky (důležité pro redox-senzitivní radionuklidy). Experiment je vhodné provést na soustavě tří vrtů, kdy jeden slouží jako injektážní a zbylé dva jako monitorovací. V injektážním vrtu je pomocí multipakru oddělen interval zvolený pro injekci stopovače a připraven cirkulační systém pro injektáž roztoku stopovačů a odběry vzorků vody. Monitorovací vrty jsou také vystrojeny multipakry a jsou určeny pro sledování příchodu stopovačů. Po injektáži stopovače jsou ve všech etážích multipakrů prováděny odběry vzorků a měřeny hydrochemické parametry vody. V případě aplikace radioaktivních stopovačů je vhodné použít systém online detekce aktivity ve vrtech.

Výběr stopovačů bude proveden s ohledem na požadované výstupy experimentu. Vhodná je kombinace konzervativního nesorbujícího stopovače, aniontu, a slabě a silně se sorbujících kationtů. Koncentrace (aktivity) stopovačů budou voleny s ohledem na lokální vlastnosti horniny, citlivosti analytických metod a legislativní podmínky těchto druhů testů platné pro dané místo. Délka stopovací zkoušky se předpokládá v řádu měsíců až prvních roků. Experiment bude zakončen vyjmutím multipakru z injektážního vrtu a zajištěno setrvání stopovacího roztoku v hornině pomocí zainjektování pryskyřicí. Vrt bude následně převrtán větším průměrem a odebraná jádra zaslána k laboratorním analýzám. Pro sorbující se stopovače bude stanoven difuzní profil.

Veškeré in-situ práce budou doprovázeny laboratorním programem a modelováním. V případě použití radiostopovačů bude nejprve získáno povolení pro tento druh testů a zajištěna bezpečnost pracovníků, dalších osob pohybujících se v podzemí i životního prostředí.

Stav řešení

Rozhodnutí o zařazení tohoto zvláštního experimentu a upřesnění jeho technické specifikace je ovlivněné vývojem dalších probíhajících aktivit, které jsou v řešení.

6.2.3 Modelové koncepce v oblasti proudění podzemních vod

Vazba k programu HÚ

V rámci charakterizace kandidátních lokalit pro HÚ a tvorby jejich 3D popisných modelů budou data z horizontu HÚ získávána z hlubokých vrtů. Proto je potřeba získat a otestovat postupy extrapolace bodových a vrtných dat do 3D modelů. V rámci několika projektů SÚRAO zabývajících se popisem puklinového prostředí (Gvoždík et al. 2020; Kabele et al. 2017; Zuna et al. 2022) byl vypracován postup přenosu terénních dat do tvorby DFN modelů a postup samotné tvorby těchto modelů. Většina modelů byla optimalizována na datech z povrchových výchozů a podzemních chodeb, poskytujících kromě údajů o četnosti a orientaci puklin, také informaci o délkách jejich stop, umožňujících optimalizaci parametrů pravděpodobnostního rozdělení velikosti puklin. V době průzkumu lokalit se mimo rozšíření datasetu měřených puklin pro DFN modely plánuje získání informací o puklinách z hloubky HÚ z vrtů, kde budou údaje o délkách puklin chybět. Z tohoto důvodu není možné optimalizovat parametry mocninného rozdělení velikosti puklin v hloubkové úrovni HÚ tak, jak je to v modelech založených na datech z chodeb a zřejmě bude nutné tyto parametry odhadovat. Je tedy potřeba testovat možnosti postupů modelování pro vytvoření DFN modelu na základě kombinace povrchových a vrtných dat.

Cíle

- Validace modelů geometrie puklinových sítí a proudění v puklinovém prostředí, které budou přenositelné pro popis proudění na kandidátních lokalitách.

Způsob řešení

V první fázi bude vytvořen prediktivní model. Puklinová síť zde bude modelována jako slepá predikce s využitím vrtných dat (distribuce puklin podél vrtu a jejich orientace a rozevření, případně další) imitující situaci na lokalitě v době provádění průzkumných prací za účelem popisu lokalit. Hydraulické parametry (transmisivita) puklin budou pravděpodobně interpretovány na základě známých korelačních vztahů, zejména korelace velikosti puklin a transmisivity. Při aplikaci geomechanického přístupu (tj. s využitím in-situ naměřených dat, například napětí) při modelování puklin bude možné původní statistická data z vrtů doplnit také o data z monitoringu napětí. Pokud se v okolí PVP Bukov nachází nějaké výchozy, budou do modelu vstupovat i informace o puklinách a stopách puklin z těchto výchozů.

V rámci validace modelu pak budou pro účely vyhodnocení modelu zpracována data z mapování stěn chodeb a data z monitoringu napětí, která jsou využitelná například pro interpretaci propustnosti v závislosti na směrech napětí, nebo i přímo pro upřesnění puklinové sítě. Dále bude pro srovnávací účely vytvořen DFN model s využitím všech dat, včetně nově získaných dat v rámci mapovacích prací. Stejně jako v případě prediktivního modelu budou

interpretovány také hydraulické parametry puklin a provedena hydraulická simulace, jejíž výsledky (zejména průtoky), budou v následném kroku předmětem kalibrace. Pomocí vhodné metody bude model kalibrován a vyhodnocen vůči dodatečným datům, zejména průtokům a tlakům z kampaně měření pomocí PFL (Komulainen et al. 2023).

Stav řešení

V současnosti je v přípravě zakázka pokrývající modelovací aktivity, která bude využívat data ze zájmové oblasti modelování PVP Bukov II z měření ve vrtech metodami PFL (Komulainen et al. 2023), OBI a ABI (Bukovská et al. 2022) nebo data z dokumentace stěn chodeb a geofyzikální měření získávané průběžně s ražbami PVP Bukov II.

6.2.4 Nejistoty in-situ transportních parametrů

Vazba k programu HÚ

Vzhledem k omezeným možnostem podrobného přímého pozorování procesů v hloubce HÚ, budou transportní modely vždy zatížené velkou mírou nejistot. V technických oblastech (ne nutně ve spojitosti s HÚ) dlouhodobě probíhá vývoj různých metod pro hodnocení propagace nejistot, ať už hodnot vstupních parametrů, nebo nejistot samotného zavádění parametrů a výsledků pozorování do modelu. Potřeba je i v rámci programu HÚ systematicky rozvíjet a implementovat přístupy, které umožňují snižovat nebo alespoň kvantitativně hodnotit propagaci nejistot v transportních modelech. PVP Bukov poskytuje prostředí, které vzhledem k možnostem přímého pozorování v masivu, umožňuje validovat přístupy hodnocení nejistot převodu výsledků měření do modelových parametrů.

Cíle

- Demonstrace postupu hodnocení nejistot spojených s přenosem in-situ měření do modelu využitelná i pro další výzkumné týmy a projekty.
- Zhodnocení propagace nejistot jednotlivých vstupních parametrů a prioritizace transportních parametrů pro migrační modely.
- Praktická implementace výsledků projektu při přenosu dat (vždy zatíženými nejistotami) z geologických průzkumů a výzkumů do modelu transportu radionuklidů.

Způsob řešení

Prvním krokem je vytvoření prediktivního transportního modelu, kde budou nejisté vstupní hodnoty zadány jako funkce pravděpodobnostního rozdělení, mapující rozsah a velikost těchto nejistot. Model bude vytvořen pro různé relevantní transportní varianty (např. transport konzervativní látky, sorbující látky). V rámci modelu budou zhodnoceny rozptyly, dané stochastickou povahou modelu, komplexně ukazující na rozvoj nejistot napříč řešením. Potřebné je získání experimentálních vzorků v rozsahu, napodobujícím možnosti odběrů a monitoringů, které jsou reálné a očekávané na lokalitách, doplněny o laboratorní vyhodnocení vzorků.

V další fázi bude upřesněn předešlý model, kdy budou zužovány nejistoty (pravděpodobnostní distribuce) vstupních parametrů, například podmiňováním modelů změřenými daty. Následně bude provedeno ověření predikcí výsledného modelu vůči nezávislému, dobře popsanému stopovacímu experimentu v PVP Bukov. Pro funkčnost celého postupu je důkladná dokumentovatelnost experimentu důležitější než jeho komplexnost. Model bude

ověřován vůči předem definovaným sledovaným kvantitám. V případě úspěchu projektu bude možné navázat projektem modelu složitějšího systému a ve větším měřítku.

Stav řešení

Řešení této oblasti je v přípravě.

6.2.5 Proudění v EDZ a EIZ

Vazba k programu HÚ

V důsledku vyražení závazných chodeb a ukládacích vrtů v HÚ se předpokládá ovlivnění proudění vody a transportu látek v důsledku zvýšení propustnosti horniny v okolí chodby vlivem přítomnosti EDZ a EIZ. Proto je potřeba věnovat část výzkumných aktivit potvrzení/vyvrácení efektu EDZ a EIZ na proudění, včetně jeho zapracování do transportních modelů.

Cíle

- Ověření metodiky modelování ovlivnění hydrauliky mechanickými změnami v důsledku ražby chodeb, s využitím in-situ měření v PVP Bukov a aplikace této metodiky na model transportu v podmínkách české lokality a ukládacího konceptu.
- Navržení a realizace vhodného in-situ experimentu pro získání dat a vyhodnocení změn pórových tlaků a hydraulické vodivosti v okolí vybrané ražené chodby za pomoci instrumentovaných vrtů.

Způsob řešení

Uvažovaný program obnáší realizaci vhodného postupu prací v jádrových vrtech pro získání informací o pórových tlacích podzemní vody v horninovém masivu PVP Bukov II a jejich vývoje v souvislosti s ražbou blízko situovaných podzemních chodeb. Ve vrtech budou provedeny a vyhodnoceny vodní tlakové zkoušky a vyhodnoceny změny hydraulické vodivosti monitorovacích úseků vrtů před a po ražbě příslušné podzemní chodby. Plánovaný in-situ experiment je založen na zkušenostech z experimentů TSX z Whiteshell URL (Rutqvist et al. 2009) a GREET v Mizunami URL (Iwatsuki et al. 2019).

Program in-situ prací má poskytnout vhodné datasey pro specialisty na matematické modelování zabývající se modelováním oblasti EDZ a EIZ. Program modelování bude zahrnovat vytvoření inverzního hydro-mechanického modelu, který bude ověřován vůči datům z monitoringu vývoje pórových tlaků v průběhu ražby a dalším hydraulickým datům (průtoky).

Stav řešení

V současnost jsou v přípravě zakázky na in-situ experiment i přidružené modelovací aktivity.

6.3 Testování realizace a charakterizace ukládacích vrtů

Vazba k programu HÚ

Aktuální koncept českého HÚ je založen na umístění UOS s VJP do vertikálních nebo horizontálních ukládacích vrtů. Technologie ražby a umístění velkoprofilových vrtů je nejprve nutné otestovat a přizpůsobit konkrétnímu technickému řešení ukládacích vrtů. Z plánovaného

programu pro PVP Bukov vyplynula potřeba jejich přípravy nejen pro experimenty související především s výzkumem šíření tepla (kap. 6.4.3), testováním inženýrských bariér (kap. 6.4.5, kap.6.4.6), kde budou budovány fyzikální modely ukládacích míst, ale i pro ověření samotného způsobu provedení velkoprofilových vrtů v podmínkách HÚ.

Cíle

- Vytvoření vertikálních (a případně horizontálních) vrtů pro uložení modelů UOS dle aktuálních ukládacích konceptů zvažovaných pro HÚ v ČR, přednostně v reálném měřítku.
- Ověření možností technologických postupů a postupů charakterizace horniny při výběru místa pro vrty, vrtném procesu a vyhodnocení přesnosti a kvality provedeného vrtu.
- 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.

Způsob řešení

Pro realizaci testů se předpokládá využití nových chodeb v PVP Bukov II. Pro výběr a charakterizaci místa bude aplikován systém Klasifikace Horninových Bloků (KHB) vyvíjený v rámci projektu Charakterizace II. Prioritní je příprava svislých ukládacích vrtů. V první fázi prací bude připravena chodba, kdy bude očištěna počva a bude provedeno detailní zmapování všech povrchů chodby. Bude provedena lokalizace vrtných prací a vytvoření prediktivního DFN modelu horninového bloku. Z hlediska rozměrů se předpokládá vytvoření vrtů s reálným průměrem 1650 mm. Hloubka vrtu bude případně zkrácena oproti reálným rozměrům svislých ukládacích vrtů v závislosti na možnostech použitých technologiích, a to z důvodu daných rozměrů chodeb v PVP Bukov II (šířka a výška 4,0 m). Po odvrtání vrtů bude provedeno jejich zaměření a vyhodnocení kvality provedení. Současně budou také zmapovány povrchy stěn vrtů a aktualizován DFN model. Ihned po vytvoření vrtů bude také zahájen monitoring přítoků podzemní vody pomocí předem připravených metod.

Vrty bude dále možné využít pro další aktivity. Například jako stanoviště s modely ukládacích míst pro vizuální prezentaci veřejnosti, a dále především pro další experimenty z oblasti inženýrských bariér.

Stav řešení

Na základě tržních konzultací budou nejprve zjištěny technologické a finanční podmínky v současnosti dostupných technologiích pro velkoprofilové vrtné práce. Následně pak bude připravena zakázka na samotnou realizaci prací.

6.4 Inženýrské bariéry HÚ

Do této oblasti jsou zařazeny aktivity, které řeší například kompatibilitu konstrukčních materiálů (např. beton, injektážní hmoty, kotvicí materiály) s materiály ukládacího systému (výplňové materiály, materiály UOS). Základním požadavkem všech materiálů v HÚ je, aby nedocházelo k jejich vzájemným interakcím do takové míry, že by ohrozily plnění své funkce a tím bezpečnost HÚ. V současnosti je řešena problematika použití betonu se sníženým pH (kap. 6.4.1). Dále je nově v přípravě program označovaný jako „Dlouhodobá laboratoř“ (kap. 6.4.2). Ten má sloužit jako podpora dalším in-situ experimentům. Varianta formy výplňových materiálů (bentonitové pelety nebo lisované segmenty) bude upřesněna a volena dle potřeb dané zakázky.

V souvislost s výzkumem materiálů ukládacího obalového souboru, jehož koncept byl řešen v rámci projektu Výzkum a vývoj ukládacího obalového souboru pro hlubinné ukládání vyhořelého jaderného paliva do stádia realizace vzorku (Forman et al. 2021), probíhá v současnosti Korozní experiment popisovaný v kap. 5.4. Na základě výsledků z tohoto pilotního in-situ testu bude v případě potřeby navržen doplňující výzkumný program.

Do této oblasti jsou dále zařazeny experimenty, jejichž doporučení technického řešení vzniklo jako výstup projektu Výplně (Svoboda et al. 2023). Jedná se o experimenty se zkratkami HEAT (kap. 6.4.3), ERO (kap. 6.4.4), EXP (kap. 6.4.5) a DEMO (kap. 6.4.6).

Z plánu experimentů byla vyřazena zvláštní část věnující se vývoji a testování topidla simulujícího UOS. Tento úkol pravděpodobně nebude řešen odděleně jak bylo uvažováno, ale bude součástí zakázek na konkrétní experimenty (např. HEAT).

6.4.1 Beton se sníženým pH

Vazba k programu HÚ

V HÚ se předpokládá použití betonu jako konstrukčního materiálu například pro stabilizace podzemních chodeb nebo pro zátky ukládacích a přístupových chodeb. Z důvodu snížení rizika negativního ovlivnění vlastností bentonitu interakcemi s betonem se výzkum v této oblasti zaměřuje na vývoj a testování betonových směsí se sníženým pH (pH rovno nebo nižší než cca 11). V roce 2019 byl zakončen pilotní projekt SÚRAO zaměřený na vývoj směsi pro beton a maltu se sníženým pH (Pernicová et al. 2019).

Cíle

- Ověření dlouhodobé stability nově vyvinutého betonu se sníženým pH.
- Ověření možností použití navrženého materiálu pro jeho aplikaci v podzemních stavbách ve větším měřítku (jako litý a stříkaný beton, případně jako injektážní materiál).

Způsob řešení

V první fázi bude vyhodnocena dříve navržená směs pro stříkaný beton a dle výsledků proběhne případná další úprava receptury. Aplikace nové směsi bude nejprve odladěna v kontrolovaných podmínkách na povrchu a po dosažení požadovaných parametrů bude provedena testovací aplikace nástřiku v podzemí. Z aplikovaného materiálu v podzemí budou v daných časových intervalech odebírány vzorky na laboratorní analýzy převážně

mechanických vlastností a pH. Navrženou směs je ale dále nutné upravit tak, aby vyhovovala požadavkům na konstrukční beton v podzemních stavbách. Budoucí program bude také případně zaměřen na vývoj a testování směsi s nízkým pH pro injektáže. V této oblasti se také předpokládá testování dalších vybraných injektážních směsí pro zlepšování kvality horninového prostředí nebo těsnění vrtů.

Stav řešení

V roce 2019 byl dokončen projekt SÚRAO zaměřený na vývoj směsi pro beton a maltu se sníženým pH (Pernicová et al. 2019). První částí projektu byl vývoj receptury na litý beton, která byla ukončena průmyslovou výrobou 1 m³ litého betonu, ze kterého byla vyrobena zkušební tělesa. Tato tělesa jsou uložena v PVP Bukov a jsou průběžně testována pro ověření stability jejich mechanických vlastností při vystavení podmínkám v podzemí (vysoká vzdušná vlhkost). Druhým úkolem byl pilotní test nástřiku navržené směsi, jejíž receptura byla upravena právě pro aplikaci nástřikem (Čítek et al. 2020). Pilotní test nástřiku proběhl s přijatelným výsledkem. Stejně jako u zkušebních těles litého betonu uložených na vzduchu v podzemí jsou prováděny odběry vzorků stříkaného betonu (jádrovým vrtáním) a laboratorní analýzy jejich fyzikálně-mechanických vlastností.

V roce 2023 byly dále připraveny směsi pro výrobu stříkaného i litého betonu. V laboratorní chodbě L7 v PVP Bukov II byla pak úspěšně provedena aplikace stříkaného betonu pro stabilizaci přístropí. Dodanou směs pro výrobu litého betonu je pak v plánu použít pro výstavbu opěrných pilířů na křiženích laboratorní chodby L7 s některými ze zkušebních komor.

6.4.2 Dlouhodobá laboratoř

Vazba k programu HÚ

Program obnáší vytvoření zásoby referenčních vzorků kandidátních materiálů pro inženýrské bariéry a dalších konstrukčních materiálů a jejich uložení v různých podmínkách a kombinacích pro studium jejich dlouhodobého chování a interakcí. Účelem je také mít k dispozici dostatečnou zásobu materiálu (nezatíženého i vystaveného interakcím) pro možné budoucí analýzy materiálu, které budou sloužit jako doplňkové pro účely hodnocení dalších in-situ experimentů.

Cíle

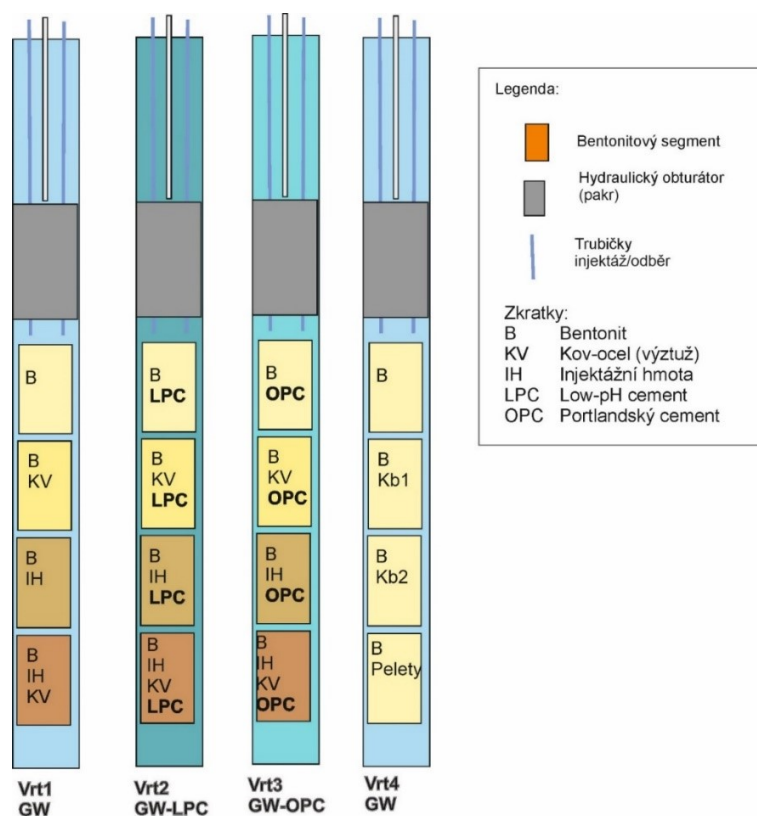
- Vyhodnocení procesu přirozeného zrání volně uložených referenčních materiálů na vzduchu v PVP Bukov s použitím srovnávacích vzorků shodné míry ovlivnění prostředím.
- Stanovení vlastností prostředí, které mají přímý i nepřímý vliv na materiály a jejich přirozené (i umělé) interakce.
- Charakterizace a analýzy vstupních materiálů a následné porovnání ovlivněných materiálů v určitých časových intervalech od zahájení experimentu.
- Vyhodnocení interakcí probíhajících mezi materiály a prostředím (na vzduchu nebo ve vrtech v PVP Bukov).
- Uchování zásoby dlouhodobě ovlivněných referenčních materiálů ve vrtech s možností jejich případného dalšího využití pro jiné experimenty.

Způsob řešení

První část programu se soustředí na uložení konstrukčních a výplňových materiálů, které jsou standardně testovány v rámci jiných zakázek, jednak na vzduchu v podzemí PVP Bukov a také v inertních nádobách bez vzájemných interakcí. Materiály v inertním prostředí jsou určeny pro vyloučení vlivů prostředí PVP Bukov na jeho vlastnosti. Mezi testované materiály patří beton se sníženým pH a běžný beton, kovová výztuž, injektážní hmoty (organické a minerální), bentonit v různých formách (prášek, pelety, lisované segmenty, suspenze) a také kamenivo pro výrobu betonových těles. V průběhu let jsou plánovány pravidelné odběry materiálů a laboratorní analýzy.

Doplňující program, který už není přímo vázán na jeho realizaci v prostředí PVP Bukov, obnáší studium interakcí materiálů uložených v nádobách v anaerobních i aerobních podmínkách. Studovány budou například anaerobní interakce materiálů v bentonitové suspenzi a simulováno stažení bentonitu jeho kontaktováním se syntetickými vodami s vysokým obsahem kationtů za tepelné zátěže.

Pro sledování interakcí a vlivů horninového masivu na materiály bude sloužit série vrtů v PVP Bukov vyplněných zájmovými materiály. Svislé vrty průměru 150 mm budou naplněny referenčními materiály v předem určených kombinacích. Materiály nebudou zahřívány a budou vystaveny přirozenému syčení podzemní vodou. Jiným typem experimentu bude uložení materiálů v kovových perforovaných modulech (Obr. 34), které budou umožňovat umělé syčení podzemní vodou a případně i zahřívání. Modulární systém bude umožňovat postupné odběry.



Obr. 34 – Návrh modulů do svislých vrtů s nezahříváním materiálem

Stav řešení

Detailní popis doporučeného technického řešení je obsaženo ve zprávě obsahující doporučení pro experimenty související s vývojem inženýrských bariér HÚ (Svoboda et al. 2023).

6.4.3 Experimentální studium THM(C) procesů – Experiment HEAT

Vazba k programu HÚ

Potřeba tohoto programu vychází z plánu 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 modelů vývoje inženýrských bariér. Konkrétně pak program slouží pro naplnění cílů č. 3 a 6 z Plánu V&V SÚRAO 2020, a to:

- Ověření šíření teploty v úložišti od zdrojů simulujících VJP;
- Ověření predikce THMC procesů v reálných podmínkách úložiště.

Program se zaměřuje především na modelování šíření tepla a vývoje teploty, distribuci vlhkosti a mechanické odezvy, tedy THM procesy, a případně i procesy chemické (C).

Cíle

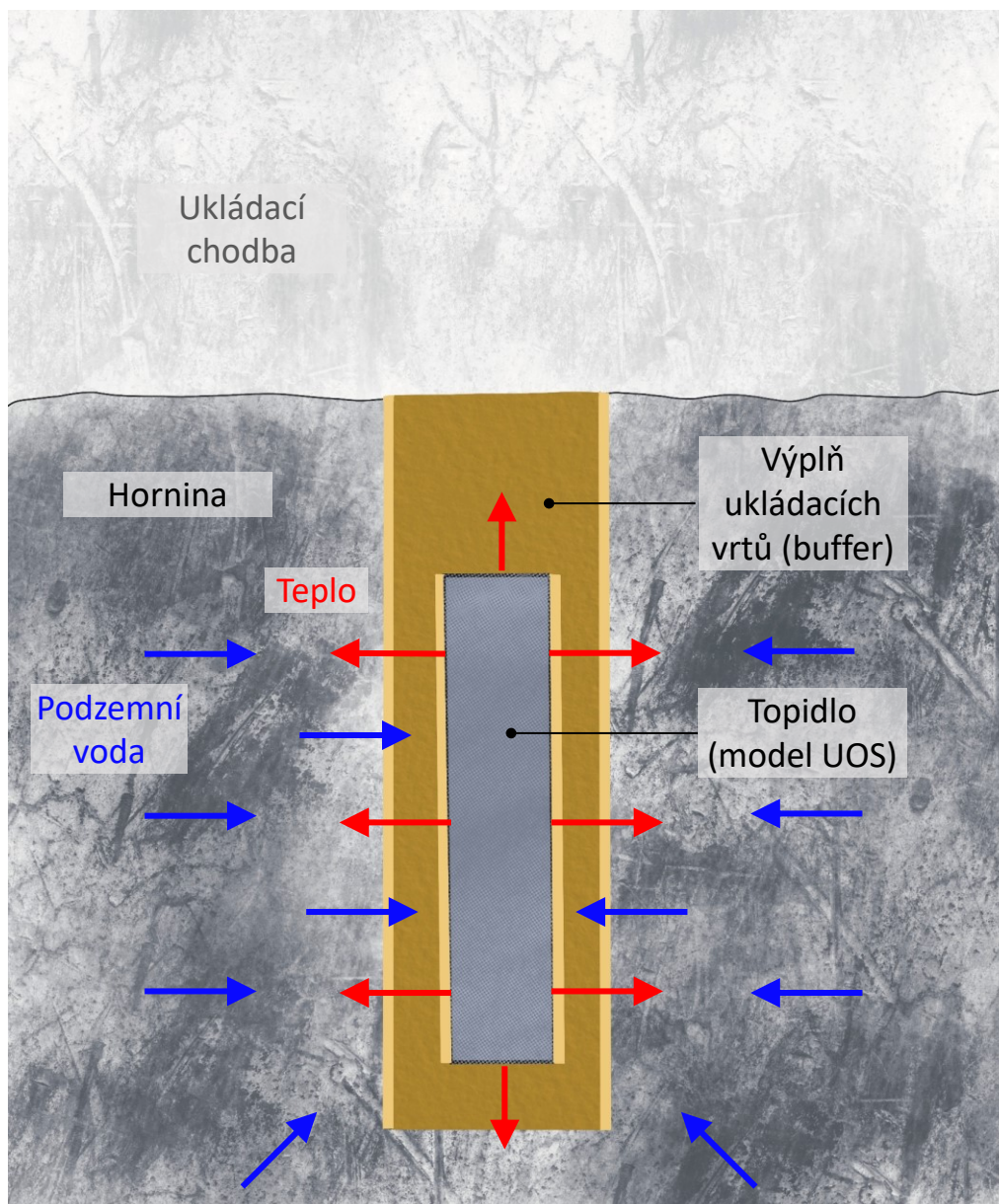
- Ověření chování bentonitové bariéry v podmínkách HÚ, při případném porovnání více technických řešení.
- Experimentální ověření šíření tepla od UOS skrz bentonitovou bariéru a horninu.
- Získání dat pro validaci matematických modelů zaměřených na simulace procesů v úložném prostoru a blízkém okolí během doby saturace výplňových materiálů.
- Získání dat pro validaci matematických modelů používaných pro tepelné dimenzování HÚ.
- Ověření rozsahu plochy HÚ a zpřesnění cenových odhadů.

Způsob řešení

Program obnáší výstavbu a provozování fyzikálních modelů bentonitové bariéry zahřívané maketou UOS, která bude bariéru zatěžovat stejným výkonem jako UOS v HÚ. Předpokládá se výstavba několika fyzikálních modelů výplně ukládacích vrtů (buffer; Obr. 35) tepelně zatěžovaných jako v podmínkách HÚ. Fyzikální modely se budou lišit technickým řešením a množstvím instrumentace. Data z in-situ experimentů budou využívána pro kalibraci a validaci matematických modelů. Měřítka fyzikálních modelů vůči reálnému bufferu v HÚ a uspořádání monitoringu bude založeno na požadavcích specialistů na matematické modelování. Preferované měřítka modelů se bude blížit reálné situaci v HÚ. Během experimentu bude monitorována teplota, vlhkost a totální napětí či přetvoření ve fyzikálních modelech a v okolní hornině. Každý fyzikální model bude mít své monitorovací schéma založené na konkrétním cíli.

Pro realizaci tohoto experimentu jsou nezbytné následující vstupy:

- Navržené a otestované topidlo.
- Výstupy matematického THM modelování (program Výplně).
- Připravené velkoprofilové vrty pro instalaci fyzikálních modelů (kap. 6.3).



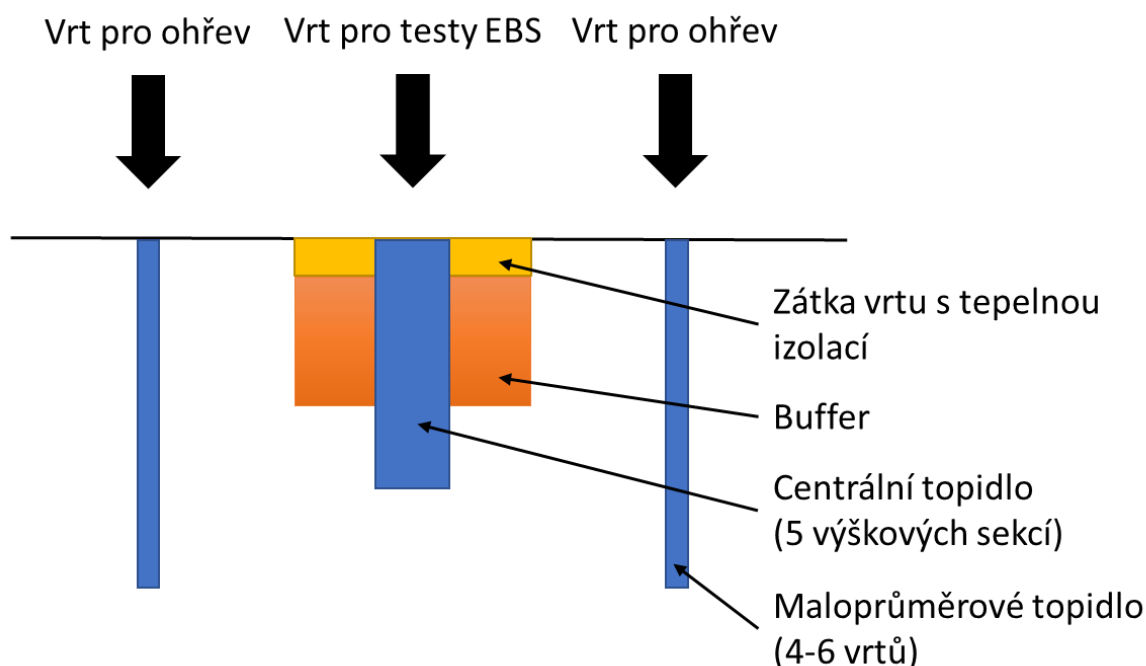
Obr. 35 – Ilustrační schéma fyzikálního modelu ukládacího místa pro vertikální způsob ukládání

Stav řešení

Prvním in-situ experimentem spadající do této oblasti je Interakční experiment situovaný v PVP Bukov I. Přestože jeho hlavní cíle nebyly prioritně zaměřeny na studium šíření tepla, tyto informace přinesl. Sít teplotních čidel umístěných do bentonitové výplně zahříváných fyzikálních modelů a do okolní horniny poskytuje informace o šíření teploty v průběhu zatěžovací fáze experimentu probíhající už od roku 2019. Celkové uspořádání a rozměry experimentu neposkytly informace přímo aplikovatelné na reálné měřítko ukládacích prostor HÚ, ale experiment poskytl data pro validaci a verifikaci vytvořeného matematického modelu oblasti experimentu.

Dalším krokem v této oblasti je experiment „HEAT“, jehož navrhované technické řešení obnáší výstavbu modelu ukládacího místa s reálnými průměry ukládacího vrtu (1650 mm) a modelu

UOS (914 mm). Experiment obsahuje jedno centrální topidlo (model UOS) umístěné do svislého velkoprofilového vrtu částečně obklopeného bufferem a několik topidel umístěných do vrtů menšího průměru v okolí (Obr. 36). Topidlo v centrálním vrtu rozdělené do více sekcí bude umožňovat simulaci různých tepelných scénářů s řízením podle konstantní teploty na povrchu topidla nebo dle výkonu. Účelem maloprofilových vrtů je simulace ovlivnění tepelného pole od ostatních UOS na sledovaný model UOS umístěný ve středu. Monitoring experimentu bude zaměřen především na distribuci tepla. Program předpokládá více fází experimentu na jednom stanovišti, kdy může být měněna bentonitová výplň s různou počáteční vlhkostí. Po každé fázi bude bentonitová výplň vyjmuta a podrobena laboratorním analýzám (určení vlhkosti, objemové hmotnosti sušiny, tepelná vodivost a kapacita). Přesné scénáře jednotlivých fází budou navrženy na základě předběžných numerických simulací.



Obr. 36 – Schéma experimentu HEAT (Svoboda et al. 2023)

6.4.4 Eroze bentonitu a transport koloidů (ERO)

Vazba k programu HÚ

Eroze bentonitu představuje jedno z možných ohrožení bentonitových bariér HÚ. Advektivní proudění vody v puklinových systémech hostitelské horniny by mohlo způsobovat mechanickou i chemickou erozi, a tím částečnou degradaci bentonitových bariér. Kromě zhoršení těsnící schopnosti existuje také riziko vzniku koloidů, které mohou významně ovlivnit transport látek z HÚ. Transport koloidy může být hlavním mechanismem migrace na dlouhé vzdálenosti především pro silně sorbující se radionuklidy. Pro český koncept HÚ je důležité prověření chování kandidátního Ca-Mg bentonitu.

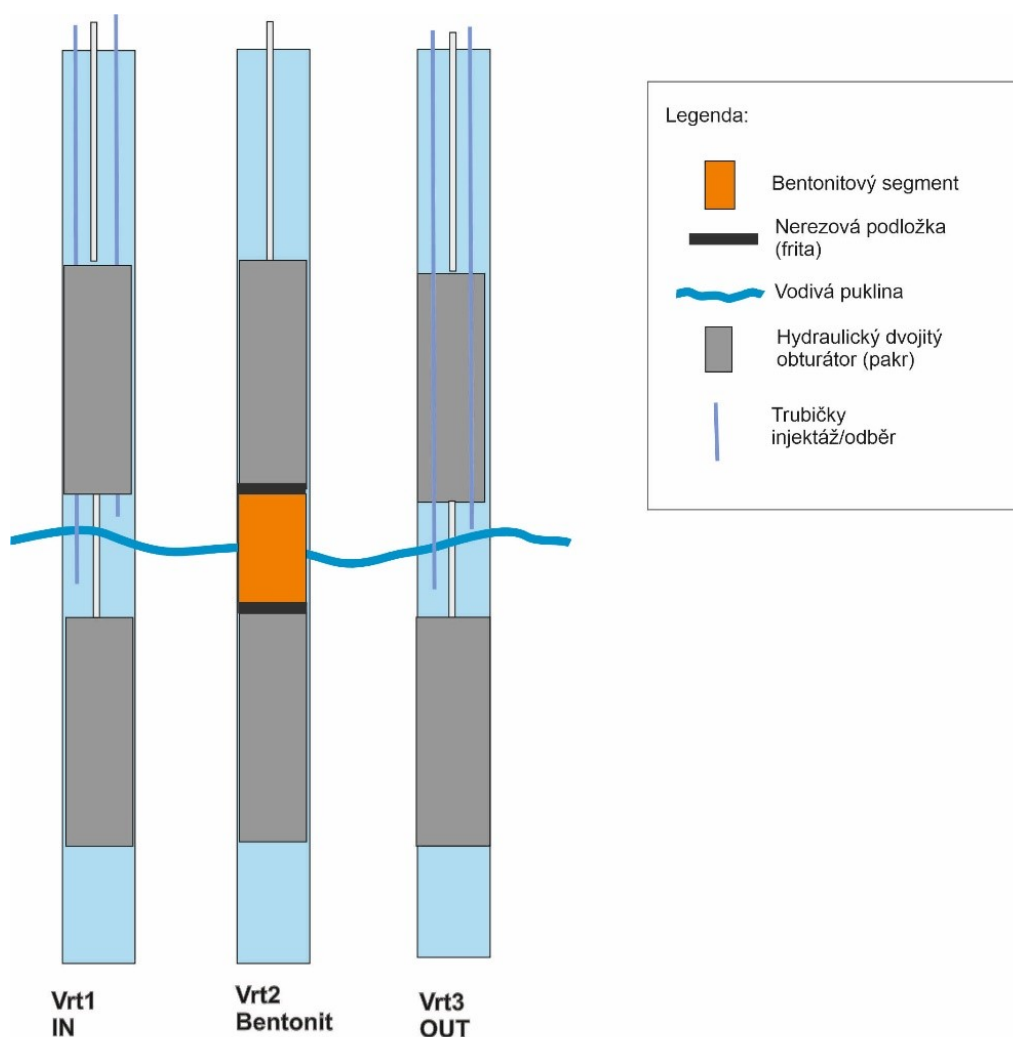
Cíle

- Stanovení míry a rychlosti eroze bentonitové bariéry vlivem advektivního proudění v puklinových systémech hostitelské horniny pro český Ca-Mg bentonit.

- Zhodnocení stability a těsnících schopností bentonitu a definování podmínek vzniku koloidních částic v reprezentativních podmínkách horninového masivu.

Způsob řešení

Navrhovaný in-situ experiment se zkratkou ERO (Svoboda et al. 2023) obnáší přípravu stanoviště s celkem třemi jádrovými vrty (průměru 90 mm a délkách 5-10 m) protínajícími diskrétní hydraulicky vodivou puklinu (puklinovou zónu). Vrtů budou obsahovat dvojité pakry oddělující úseky vrtů s puklinou. V centrálním vrtu budou umístěny bentonitové segmenty (Obr. 37). V první fázi experimentu se provede studium eroze bentonitu a uvolňování bentonitových koloidů. Mezi vrty bude zajištěna cirkulace vody v puklinovém systému způsobující erozi bentonitu. Po zatěžovací fázi bude sonda s bentonitem z vrtu vyjmuta pro laboratorní analýzy. V druhé fázi budou prováděny stopovací zkoušky s injektáží stopovací látky tak, aby stopovač procházel skrz bentonitovou výplň do puklinové zóny. Související modelovací část projektu má za cíl zhodnotit vliv přítomnosti bentonitu na transport vybraného stopovače. V poslední fázi se uvažuje o využití radioaktivních stopovačů, kde může být sledována sorpce na bentonit.



Obr. 37 – Konceptní návrh experimentu eroze bentonitového těsnění (Svoboda et al. 2023)

Stav řešení

Detailní popis doporučeného technického řešení je obsaženo ve zprávě obsahující doporučení pro experimenty související s vývojem inženýrských bariér HÚ (Svoboda et al. 2023).

6.4.5 Expanze bufferu do backfillu a zatížení UOS (EXP)

Vazba k programu HÚ

Technické řešení vertikálního konceptu ukládání počítá s použitím distančního bloku z bentonitu, který bude sloužit jako zátka ukládacího vrtu. V souvislosti s touto technologickou součástí byl identifikován problém nedostatečné znalosti chování oblasti styku výplně ukládacího vrtu s výplní ukládací chodby. Problém souvisí s rozdílnou objemovou hmotností sušiny jednotlivých bentonitových komponent ovlivňující mechanické chování celého úložného místa. Dalším souvisejícím bodem k řešení je mechanické zatížení ukládacího obalového souboru, které může být ovlivněno rozdílnými scénáři sycení bufferu.

Cíle

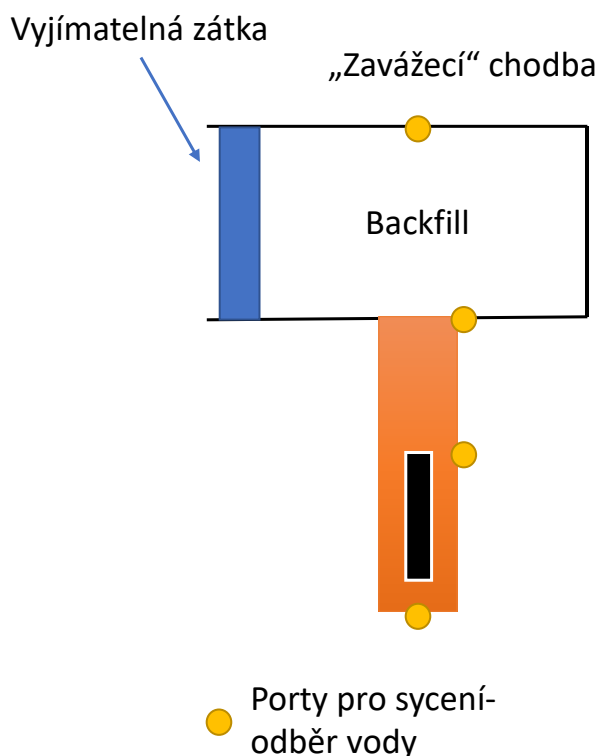
- Návrh a realizace in-situ experimentu s vertikálním modelem ukládacího místa včetně přílehlé části ukládací chodby.
- Ověření možných instalačních technik makety UOS, bufferu, distančního bloku a backfillu.
- Vyřešení velikosti a provedení distančního bloku.
- Ověření mechanického namáhání UOS vlivem bobtnání bentonitu při různých scénářích sycení bufferu.

Způsob řešení

Technické řešení experimentu vychází z vertikálního konceptu ukládání. Zjednodušené schéma experimentu je na Obr. 38. Jedná se o svislý vrt reálného průměru 1,65 m a hloubky co nejvíce se blíží reálné hloubce ukládacího vrtu v HÚ (hloubka vrtu je závislá na možnostech vrtacích technologií a daných rozměrech a uspořádání chodeb PVP Bukov II). Do vrtu bude umístěn model UOS (s rozměry a hmotností co nejbližší reálným parametrům UOS pro VVER 440), pro zjednodušení bez topného tělesa, a bentonitová výplň (buffer a distanční blok). Chodba bude vyplněna backfillem a uzavřena vyjímatelnou ocelovou zátkou.

Chodba i vrt budou na vybraných místech vybaveny sytíci a monitorovacími porty. Ty budou využity v závislosti na druhu testovaného scénáře buďto pro injektáž vody, nebo monitoring pórového tlaku vody, nebo výtoků s možnou detekcí eroze bentonitu. Důležitou součástí bude monitoring polohy a namáhání modelu UOS a sledování vývoje saturace bentonitu.

Předpokládá se několik běhů experimentu s různým scénářem sycení způsobující nerovnoměrné bobtnání bentonitu. Například sycení ve dně, která má způsobit posun UOS směrem vzhůru, dále sycení v horní úrovni UOS nebo simulaci vysokého přítoku vody do backfillu způsobující erozi bentonitu.



Obr. 38 – Schéma experimentu EXP (Svoboda et al. 2023)

Stav řešení

Základní technické řešení pro tento experiment je rozmyšleno. Tento experiment je důležitým předstupněm demonstračního experimentu a vytvořené stanoviště může být případně použito i pro tento experiment.

6.4.6 Demonstrační experiment prototypového úložiště (DEMO)

Vazba k programu HÚ

Celý program českého HÚ je založen na včasné přípravě vlastního technického řešení a jeho otestování v odpovídajících podmínkách v příslušné hloubce pod povrchem ještě předtím, než započnou práce ve vybrané finální lokalitě pro HÚ. Klíčovou aktivitou celého programu PVP Bukov je demonstrace proveditelnosti a funkčnosti zvažovaných technických řešení pro HÚ.

Cíle

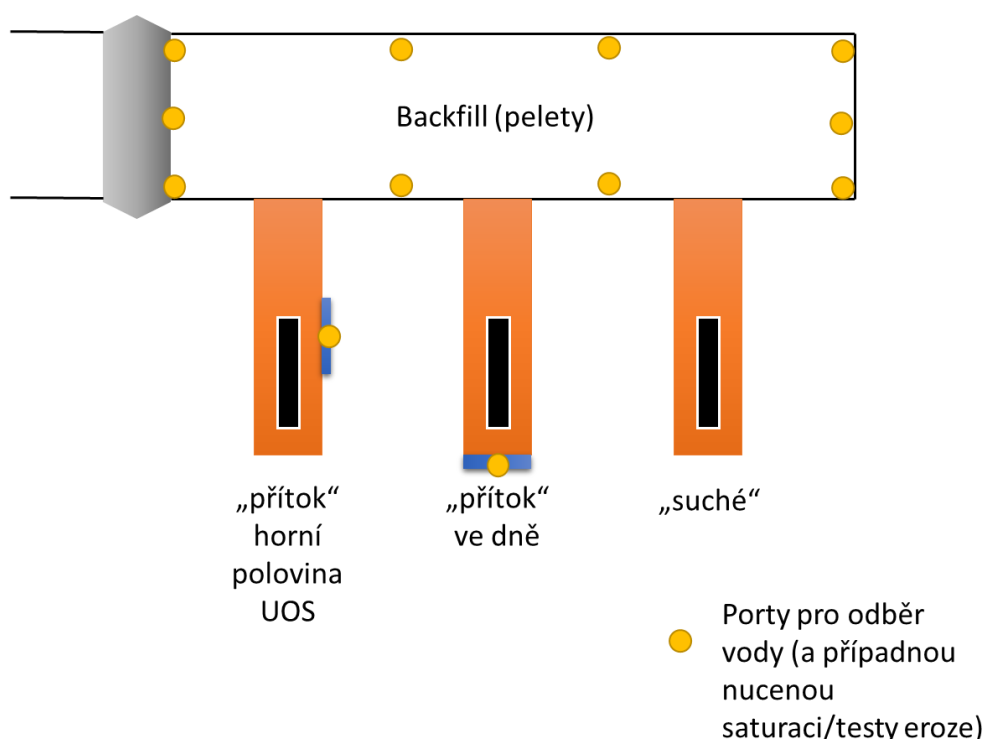
- Prokázání technické proveditelnosti připravovaného konceptu HÚ.
- Demonstrace funkčnosti konceptu (dlouhodobý provoz experimentu s jeho monitorováním).
- Ověření stability použitých materiálů.

Způsob řešení

Program bude obnášet výstavbu modelu určitého úseku HÚ na základě syntézy znalostí získaných v předchozích projektech, a to v době kdy bude již přesněji definován ukládací

koncept. Pro výstavbu prototypového úložiště se předpokládá využití koncové části některé z experimentálních chodeb v PVP Bukov.

V současnosti je uvažována demonstrace vertikálního systému ukládání UOS. Bližší specifikace experimentu označovaného jako „DEMO“ je popsána v TZ 684/2023. Experiment bude obnášet přípravu několika ukládacích vrtů se vzájemnými vzdálenostmi odpovídajícími HÚ. Do ukládacích vrtů budou uloženy modely UOS s topidly, bentonitová výplň (buffer) a distanční blok. Ukládací chodba bude zatěsněna výplňovým materiálem (backfill) a uzavřena betonovou zátkou. Experiment bude obsahovat instrumentaci pro monitorování chování jednotlivých inženýrských komponent a hostitelské horniny. Obr. 39 obsahuje zjednodušené schéma doporučeného řešení demonstračního experimentu. Experiment obsahuje celkem 3 svislé ukládací vrty s modely UOS, každý simulující jiný scénář situace v HÚ (různé sycení bufferu).

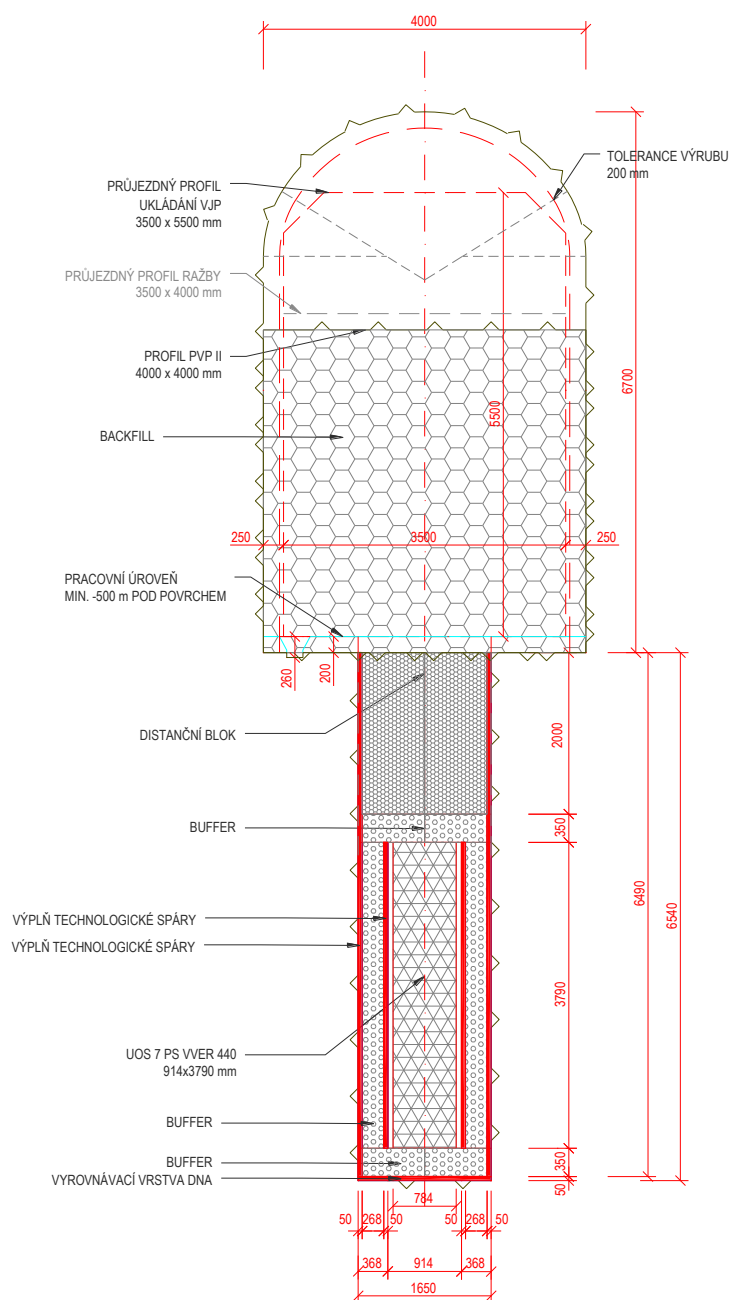


Obr. 39 – Schéma demonstračního experimentu (Svoboda et al. 2023)

Obr. 40 obsahuje ilustrační vzorový řez ukládacím místem v HÚ pro v současnosti uvažovanou variantu svislého ukládání v konvenčně vyraženém tunelu. Demonstrační experiment bude navržen tak, aby se jeho rozměry co nejvíce blížily reálným rozměrům v HÚ, respektive aby jednotlivé rozměry a vzdálenosti poměrově odpovídaly ukládacím místům v HÚ, s přihlédnutím k prostorovým a technologickým možnostem v PVP Bukov. Předpokládá se například možná kratší délka modelu UOS kvůli menší výšce chodeb v PVP Bukov apod.

Stav řešení

Základní technické řešení pro demonstrační experiment vertikálního systému ukládání je připraveno. Tento experiment bude vyvrcholením celého výzkumného programu a musí mu předcházet úspěšně provedené experimenty zabývající se vývojem inženýrských bariér (HEAT, EXP, ...) vyvinuté a otestované manipulační techniky pro modely UOS, nebo instalační techniky výplní.



Obr. 40 – Vzorový řez ukládacím místem v HÚ (Svoboda et al. 2023)

7 Závěr

Tento dokument je strategickým dokumentem SÚRAO s popisem dokončených, probíhajících a plánovaných činností pro PVP Bukov. Jedná se o aktualizaci první verze dokumentu z roku 2021. Úroveň podrobnosti popisu aktivit odpovídá současnému stavu připravenosti programu HÚ. PVP Bukov poskytuje ojedinělou možnost získávat data pro vývoj, validaci a verifikaci nástrojů matematických modelů potřebných při realizaci projektu HÚ. Investice do změny a vylepšení infrastruktury a ražba nové části laboratoře přináší další prostorové možnosti pro naplnění experimentálního plánu.

V současné době probíhá příprava nových zakázek na konkrétní experimenty. Jedná se především o projekty zabývající se dlouhodobými interakcemi materiálů a vlivy prostředí na tyto materiály. Důležité je vyřešení problematiky provádění velkoprofilových vrtů, jejichž realizace je podmínkou výstavby in-situ fyzikálních modelů ukládacích míst v měřítku co nejbližšímu reálným rozměrům budoucího HÚ. Prioritním tématem je ověření šíření tepla z ukládacího obalového souboru skrz bentonitovou výplň do horniny. Plánuje se pokračovat i v problematice studia mechanismů transportu látek puklinovými systémy i skrz inženýrské bariéry. Tento dokument bude v budoucnu opět aktualizován dle potřeb tak, aby reflektoval vývoj stavu programu českého HÚ a obecně vývoj vědy a výzkumu v oblasti geologického ukládání RAO. Základní program popisovaný v tomto dokumentu může být vždy doplněn o některé další experimenty, uváděné například v doporučeních obsažených v externích studiích, pokud budou vyhodnoceny jako potřebné a přínosné.

Reference

- ANDERSSON J., STRÖM A., SVEMAR C., ALMÉN K.-E. AND ERICSSON L. O. (2000): What requirements does the KBS-3 repository make on the host rock? Geoscientific suitability indicators and criteria for siting and evaluation. SKB Technical report TR-00-12. SKB Stockholm.
- AALTONEN I., HAGROS A., PIRJO H. (2020): Experience from other URF projects and recommendations for Bukov URF Phase II. TZ 534/2020, SÚRAO, Praha.
- 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.
- BÁRTA J., SLAVÍK L., VILHELM J. (2022): Závěrečná zpráva o poznatcích z geofyzikálních měření na PVP Bukov – Etapa 1-4. TZ 636/2022, SÚRAO, Praha.
- BARTON N. (1987): Rock mass classification and tunnel reinforcement selection using the Q-system. In: Kirkaldie, L. (ed.) (1987): Rock classification systems for engineering purposes: papers from the symposium on rock classification systems for engineering purposes, Cincinnati, OH, June 25, 1987. American Society for Testing and Materials. ASTM-STP-984, p. 59-84.
- BIENIAWSKI Z. T. (1973): Engineering classification of jointed rock masses. Transactions of the South African Institution of Civil Engineers, No. 15: 335-344.
- BLÁHA P. et al. (2021): Rozvoj geotechnických a geofyzikálních metod pro získání 2D a 3D obrazu geologické stavby: Závěrečná zpráva etapy B - Výzkum použití geofyzikálních metod (GEOtest, a.s.). Brno.
- 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., JELÍNEK J., KAŠPAR V., KOLOMÁ K., KOPAČKOVÁ V., KOUCKÁ L., KUČERA P., LAUFEK F., LNĚNIČKOVÁ Z., KOČERGINA J., MYŠKA O., NAHODILOVÁ R., NOVOTNÁ I., PERTOLDOVÁ J., RUKAVIČKOVÁ L., SOEJONO I., ŠVAGERA O., TOMEK F., VESELOVSKÝ F., ZUNA M. (2017): Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov - Závěrečná zpráva. TZ 191/2017, SÚRAO, Praha.
- 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., KNĚSL 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, TZ 464/2020, SÚRAO, Praha.
- BUKOVSKÁ Z., RUKAVIČKOVÁ L., CHABR T., MORÁVEK R., LEVÝ O., SOSNA K., SOUČEK K., VAVRO M., ZELINKOVÁ T., DOBEŠ P., ŠVAGERA O., KRYL J., SOEJONO I., ŘIHOŠEK J., HOLEČEK J., HANÁK J., ČERMÁK F., KAŠPAR R., MAREČEK L., NEDVĚD J., VAVRO L., WACLAWIK P., STAŠ L., MYŠKA O. (2023): Geologická a geotechnická charakterizace horninového prostředí – PVP Bukov II – druhá průběžná zpráva. TZ 664/2023, SÚRAO, Praha.

- BUTOVIČ A., ČERVENKA F., KOPŘIVA R., NOHEJL J., FIEDLER F., HAVLOVÁ V., SVOBODA J., PACOVSKÝ J., VAŠIČEK R., ŠTÁSTKA J., KOBYLKA D., BITTNAR Z., ČERNÝ R., DRTINOVÁ B., ZAHRADNÍK O., VEVERKA A., BAIERLE T. (2018): Rešerše experimentů pro potřeby PVP Bukov. TZ 372/2019, SÚRAO, Praha.
- ČERNÁ K., HLAVÁČKOVÁ V., STEINOVÁ J., PUSZTAI M. (2021): Mikroorganismy ve vztahu k hlubinným úložištím radioaktivního odpadu. TZ 552/2021, SÚRAO, Praha.
- ČÍTEK D., DOBIÁŠ D., HURTIG K., KRATOCHVÍLE L., KOLÍSKO J. (2020): Zkoušky betonu – dlouhodobě uložené vzorky a zkoušky stříkaného betonu. TZ 480/2020, SÚRAO, Praha.
- DĚDEČEK P., HOKR M., FRANĚK J., KRYL J., BUKOVSKÁ Z., ŠVAGERA O., ZELINKOVÁ T., SOEJONO I., PEŘESTÝ V., HÁJEK T., KINCLER R. (2022): Monitoring teploty horninového masivu v PVP Bukov a dolu Rožná I – Instalace měření a geologická dokumentace, TZ 639/2022, SÚRAO, Praha.
- DOBREV D., HOFMANOVÁ E., MENDOZA MIRANDA A. N., KAŠPAR V., KOUŘIL M., PUSZTAI M., STEINOVÁ J., STOULIL J., ZELINKOVÁ T., ZUNA M. (2022): Metodika a technické řešení korozního experimentu. TZ 576/2022, SÚRAO, Praha.
- FORMAN L., PICEK M., DOBREV D., GONDOLLI J., MENDOZA MIRANDA A.N., STRAKA M., KOUŘIL M., STOULIL J., MATAL O., ČERMÁK J., KRÁL L., ŽALOUDEK J., VÁVRA M., ČUPR M. (2021): Závěrečná zpráva - Výzkum a vývoj ukládacího obalového souboru pro hlubinné ukládání vyhořelého jaderného paliva do stadia realizace vzorku. TZ 544/2021, SÚRAO, Praha.
- GVOŽDÍK L., KABELE P., ŘÍHA J., ŠVAGERA O., TRPKOŠOVÁ D., VETEŠNÍK A. (2020): Transport radionuklidů z hlubinného úložiště – Testování koncepčních a výpočetních modelů. TZ 463/2020, SÚRAO, 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.
- HAUSMANNOVÁ L., HANUSOVÁ I., DOHNÁLKOVÁ M. (2018): Shrnutí výzkumu českých bentonitů pro hlubinné úložiště – do roku 2018. TZ 309/2018, SÚRAO, Praha.
- HAUSMANNOVÁ L., DOHNÁLKOVÁ M., MATUŠKOVÁ E., LAHODOVÁ Z., AUGUSTA J. (2023): Technické řešení hlubinného úložiště 2023. TZ 711/2023, SÚRAO, Praha.
- HAVLOVÁ V. et al. (2015): Příprava experimentů v PVP Bukov. TZ 06/2015, SÚRAO, 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. TZ 121/2017, SÚRAO, Praha.
- HAVLOVÁ V., HOFMANOVÁ E., KOLOMÁ K., TRPKOŠOVÁ D. (2018): Realizace a vyhodnocení LTD III. Experimentu Grimsel Test Site. TZ 345/2018, SÚRAO, Praha.
- HOKR M., BALVÍN A., BÁRTA J., DĚDEČEK P., HOFMANOVÁ E., HOLEČEK J., MÁLEK J., MARTÍ X., PETRUŽÁLEK M., RÁLEK P., ROWBERRY M. D., ŠAFANDA J., ŽANDA L. (2018): Vývoj a ověřování metodik pro charakterizaci horninového prostředí – Výsledky monitoringu v přivaděči Bedřichov. TZ 289/2018, SÚRAO, Praha.

- HOKR M. ET AL. (2020): Testování transportních modelů s využitím in-situ zahraničních experimentů. TZ 481/2020, SÚRAO, Liberec.
- CHABR T., FILIPSKÝ D. (2021): Zjištění prostorové homogenity horninového prostředí před provedením trhacích prací pomocí seismické tomografie. TZ 548/2021, SÚRAO, Praha.
- IWATSUKI T., ONOE H., ISHIBASHI M., OZAKI Y., WANG Y., HADGU T., JOVE-COLON C. F., KALININA E., HOKR M., BALVÍN A., ZEMAN J., LANDA J., ŠEMBERA J. (2019): DECOVALEX-2019 Task C: GREET Intermediate Report.
- 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. TZ 286/2018, SÚRAO, 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. TZ 411/2019, SÚRAO, Praha.
- KOMULAINEN J., HEIKKINEN P., VENCL M. (2019): Posiva Flow Log measurements from boreholes Mel-1 and Mel-2 at the Melechov site in the Czech Republic. TZ 443/2019, SÚRAO, Praha.
- KOMULAINEN J., HEIKKINEN P., JÄNKÄVAARA H., VENCL M. (2023): Posiva Flow Log measurements in four boreholes at the Bukov underground research facility in the Czech Republic. TZ 646/2022, SÚRAO, Praha.
- KUMPULAINEN S., KARVONEN T., KOHO P. (2018): R&D plan for the Engineered Barrier System in the Czech DGR. TZ 416/2019-ENG, SÚRAO, Praha.
- LEHTOLA K., AALTONEN I. (2020): Experience from other URF projects and recommendations for Bukov URF phase II. – MS SÚRAO, TZ 535/2020, Praha.
- LÖFGREN M., NILSSON K. (2020): Task description of Task 9B – Modelling of LTDE-SD performed at Äspö HRL. SKB report P-17-30. Dostupný z: <https://www.skb.se/publikation/2495657/P-17-30.pdf>.
- MIKLÁŠ O. (2023): Modelovací strategie pro vývoj hlubinného úložiště. TZ 698/2023, SÚRAO, Praha.
- Mikláš, O., Vrba, T., Lukin, D., Lahodová, Z., Popelová, E. (2023): Modelovací strategie pro vývoj hlubinného úložiště. TZ 698/2023, Praha.
- OECD-NEA, 2013. Underground Research Laboratories (URL). Dostupné z: <https://www.oecd-neo.org/rwm/reports/2013/78122-rwm-url-brochure.pdf>
- PERNICOVÁ R., ČÍTEK D., DOBIÁŠ D., MANDLÍK T., KRATOCHVÍLE L., KOLÍSKO J. (2019): Vývoj betonu se sníženým pH. TZ 415/2019, SÚRAO, Praha.
- POSPÍŠKOVÁ I., Vokál A., Vondrovic L., Dusílek P., Dvořáková M., Hanusová I., Kováčik M., Vencel M., Vokál A., Woller F. (2015): Střednědobý plán výzkumu a vývoje pro potřeby umístění hlubinného úložiště v ČT 2015 – 2025. TZ 1/2015, SÚRAO, 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. TZ 488/2020, SÚRAO, 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. TZ 494/2020, SÚRAO, 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. TZ 496/2020, SÚRAO, Praha.
- POSPÍŠKOVÁ I., VOZÁR M., KRAJŇÁK M. (2023): Návrh plánu výzkumu a vývoje obalového souboru pro ostatní RAO. TZ 675/2023, SÚRAO, 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. TZ 501/2020, SÚRAO, 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. TZ 502/2020, SÚRAO, Praha.
- RUKAVIČKOVÁ L., BLÁHA V., OTRUBOVÁ D. (2006): Hydrogeologický výzkum ve vrtech Mel-1, Mel-2, Mel-3, Mel-4 a Mel-5 2. etapy výběru testovacích polygonů. SÚRAO, Praha.
- RUTQVIST J., BÖRGESSON L., CHIJIMATSU M., HERNELIND J., JING L., KOBAYASHI A., NGUYEN S. (2009): Modeling of damage, permeability changes and pressure responses during excavation of the TSX tunnel in granitic rock at URL, Canada. *Environmental Geology*, 57(6):1263–1274.
- SMUTEK J., VONDROVIC L., VOKÁL A., HAUSMANNOVÁ L., DOHNÁLKOVÁ M., AUGUSTA J., URÍK J., MAREDA L., MIKLÁŠ O., VENCL M., LUKIN D. (2021): Program výzkumu, vývoje a demonstračních aktivit pro Podzemní výzkumné pracoviště Bukov 2021. TZ 546/2021, SÚRAO, Praha.
- SCHNEEBERGER R., KOBER F., LANYON G.W., MÄDER U.K., SPILLMANN T., BLECHSCHMIDT I. (2019): Grimsel Test Site: Revisiting the site-specific geoscientific knowledge. Nagra Technical Report 19-01.
- 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>.
- SOUČEK K., VAVRO M., STAŠ L., KALÁB Z., KONÍČEK P., GEORGIOVSKÁ L., KALÁB T., KONEČNÝ P., KOLCUN P., KRÁLOVÁ L., KUBINA L., LEDNICKÁ M., MALÍK J., MARTINEC P., PTÁČEK J., VAVRO L., WACLAWIK P., ZAJÍCOVÁ V. (2018): Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov – část II: Geotechnická charakterizace - Závěrečná zpráva. TZ 221/2018, SÚRAO, Praha.
- SPOLEČNOST „ČVUT-SATRA-MOTT MACDONALD CZ“. (2016): Studie realizace výzkumného programu PVP Bukov, část II: Technicko-ekonomická studie. TZ 62/2016, SÚRAO, Praha.

- STAŠ L., BLÁHA P., DURAS R., GEBAUER J., GEORGIOVSKÁ L., KAJZAR V., KALÁB T., KOHUT R., KOLCUN A., KUKUTSCH R., MALÍK J., NOVOTNÁ J., SOUČEK K., VAVRO M., ZAJÍCOVÁ V. (2019): Vznik a monitoring EDZ při výstavbě PVP Bukov - závěrečná zpráva. TZ 351/2019, SÚRAO, Praha.
- STEINOVÁ J., BURKARTOVÁ K., MIKEŠ J., ZUNA M., ČERNÍK M. (2019): Mikrobiální screening PVP Bukov a dolu Rožná - závěrečná zpráva projektu. TZ 382/2019, SÚRAO, Praha.
- STEINOVÁ J., ZUNA M., ČERNÁ K. (2021): Mikrobiologický monitoring vybraných podzemních vod PVP Bukov a dolu Rožná. TZ 547/2021, SÚRAO, Praha.
- STEMBERK J., MAŠÍN D., BRIESTENSKÝ M., HARTVICH F., FUČÍK Z. (2022): Monitoring aktivity křehkých struktur PVP Bukov a dolu Rožná - závěrečné vyhodnocení a numerický model. TZ 640/2022, SÚRAO, Praha.
- SÚJB (2021) Zajištění kvality při tvorbě a užívání výpočetních programů pro hodnocení bezpečnosti: Bezpečnostní návod BN-JB-2.4 (Rev.0.0). Praha: Státní úřad pro jadernou bezpečnost. Dostupné také z: https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/dokumenty/publikace/9Shl_222122020_BN_JB_2.4_final.pdf.
- SVOBODA J., HAUSMANNOVÁ L., NÁDHERNÁ D., PACOVSKÝ J., PACOVSKÁ D., VAŠÍČEK R., SMUTEK J., ŠTÁSTKA J. (2016): Navržení, zajištění provedení a vyhodnocení experimentu EPSP v rámci projektu DOPAS - Závěrečná zpráva. TZ 63/2016, SÚRAO, Praha.
- SVOBODA J., BUTOVIČ A., ZAHRADNÍK O., HAVLOVÁ V. et al. (2019): Aktualizace plánu experimentů v PVP Bukov. TZ 397/2019, SÚRAO, Praha.
- SVOBODA J. ET AL. (2022a): Výplně a ostatní inženýrské komponenty HÚ – Projekt demontáže Interakčního experimentu v PVP Bukov, TZ 595/2022, SÚRAO, Praha.
- SVOBODA J., VAŠÍČEK R., RUKAVIČKOVÁ L., ŘIHOŠEK J., VEČERNÍK P. (2022b): Interakční experiment – Průběžná zpráva etap 7-9 č. 5. TZ 629/2022, SÚRAO, Praha.
- SVOBODA J., ČERNOCHOVÁ K., ŠTÁSTKA J., VAŠÍČEK R., ZUNA M., ŠACHLOVÁ Š., VEČERNÍK P., ČERNÁ K., HLAVÁČKOVÁ V., PUSZTAI M. (2023): Návrh experimentů z oblasti inženýrských bariér HÚ v PVP Bukov, TZ 684/2023, Praha, SÚRAO.
- ŠTÁSTKA J., PACOVSKÝ J., KUČEROVÁ M., SVOBODA J., VAŠÍČEK R. (2020): Souhrnná zpráva MOCK-UP Josef (2011-2020). TZ 533/2020, SÚRAO, Praha.
- ÚGV MUNI. Dlouhodobý výzkum geochemických bariér pro ukládání jaderného odpadu. Online. Dostupné z: <https://ugv.sci.muni.cz/geobarr>. [cit. 2023-09-28].
- VAVRO M., SOUČEK K., STAŠ L., VAVRO L. (2016): Shrnutí zahraničních poznatků o vzniku a vývoji EDZ v krystalinických horninách – rešerše. TZ 50/2016, SÚRAO, 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. TZ 525/2020, SÚRAO, Praha.
- VONDROVIC L., POSPÍŠKOVÁ I., AUGUSTA J., et al. (2016): Studie realizace výzkumného programu PVP Bukov, část I: Technická rozvaha. Interní technická zpráva, SÚRAO, Praha.

VYLAHOVÁ P., KOCMAN T., MUSIL R., PRŮCHA P., BARTOŇ J. (2023): Hydrogeologický a hydrochemický monitoring podzemních a důlních vod v prostoru PVP Bukov, závěrečná zpráva. TZ 679/2023, SÚRAO, Praha.

ZUNA M., JANKOVÝ F., ŠVAGERA O., SOSNA K., GVOŽDÍK L., KABELE P., SKÁLA V., MILICKÝ M., POLÁK M., HOLEČEK J., ŘIHOŠEK J., KRYL K., ZELINKOVÁ T., HAVLOVÁ V. (2022). Výzkum puklinové konektivity v PVP Bukov – Průběžná zpráva č. 4. TZ 630/2022, SÚRAO, Praha.



SÚRAO

SPRÁVA ÚLOŽIŠŤ
RADIOAKTIVNÍCH
ODPADŮ

NAŠE
BEZPEČNÁ
BUDOUCNOST

info@surao.cz | www.surao.cz