

Technická zpráva číslo 546/2021

PROGRAM VÝZKUMU,
VÝVOJE A
DEMONSTRAČNÍCH
AKTIVIT PODZEMNÍHO
VÝZKUMNÉHO
PRACOVIŠTĚ BUKOV
2021

Autoři: J. Smutek, L. Vondrovic a kol.

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

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

Bibliografický zápis: Smutek J., Vondrovic L., Vokál A., Hausmannová L., Dohnálková M., Augusta J., Urík J., Mareda L., Mikláš O., Vencel M., Lukin D. (2021): Program výzkumu, vývoje a demonstračních aktivit pro Podzemní výzkumné pracoviště Bukov 2021. – MS SÚRAO, TZ 546/2021, Praha.

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

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

Obsah

1	Úvodní informace	8
1.1	Program vývoje a přípravy hlubinného úložiště	8
1.2	RD&D aktivity SÚRAO v podzemních pracovištích.....	8
1.3	Struktura zprávy	10
2	PVP Bukov	11
2.1	I. Etapa výstavby PVP Bukov	11
2.2	Rekonfigurace infrastruktury dolu Rožná I.....	12
2.3	II. Etapa výstavby PVP Bukov	13
2.4	Předchozí studie a plány experimentů pro PVP Bukov	14
3	Přehled dokončených a probíhajících projektů	17
3.1	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov (2013 – 2017).....	18
3.2	Vznik a monitoring EDZ při výstavbě PVP Bukov (2015-2018).....	19
3.3	Mikrobiologie I (2017 – 2019).....	20
3.4	Hluboké horizonty (2017 – 2020).....	21
3.5	Interakční experiment (2017 – 2022).....	23
3.6	Hydro-monitoring (2018 – 2023).....	25
3.7	Nedestruktivní geofyzika (2018 – 2022)	26
3.8	Křehké struktury (2018 – 2022).....	28
3.9	GEOSTAB (2017 – 2021).....	29
3.10	GEOBARR (2018 – 2022).....	30
3.11	Puklinová konektivita (2019 – 2024).....	31
3.12	Mikrobiologie II (2020 – 2021).....	32
3.13	Charakterizace II (2021 – 2025).....	33
3.14	Korozní experiment (2021 – 2034).....	35
4	Cíle výzkumného programu v PVP Bukov	37
5	Plán prioritních oblastí experimentů na nejbližší období provozu	40
5.1	Vývoj metod charakterizace a modelování horninového prostředí	40
5.1.1	Vývoj klasifikačních systémů	40
5.1.2	Technologie popisu izolační části úložiště vrtnými pracemi	40
5.1.3	Vývoj modelových koncepcí v oblasti proudění podzemních vod	42
5.2	Demonstrační experimenty.....	43
5.2.1	Testování postupu realizace a charakterizace ukládacích vrtů	43

5.2.2	Stanoviště úložného systému.....	44
5.3	Experimenty související s šířením tepla v HÚ.....	44
5.3.1	Teplotní monitoring horninového masivu.....	44
5.3.2	Vývoj a testování modelu simulujícího UOS.....	45
5.3.3	Experimentální studium THM procesů.....	46
5.3.4	Experimenty pro ověření THMC procesů.....	47
5.4	Migrace látek v horninovém prostředí.....	49
5.4.1	Procesy advekčně-disperzního transportu.....	52
5.4.2	Procesy difuze.....	53
5.4.3	Vývoj chemismu podzemní vody, hydrochemické testy, paleohydrologie.....	54
6	Plán experimentů pokročilé fáze provozu PVP Bukov	55
6.1	Experimentální ověření českého konceptu inženýrských bariér a ostatních komponent.....	55
6.1.1	Buffer a backfill.....	55
6.1.2	Zátky a výplně ostatních podzemních prostor	55
6.1.3	Ukládací obalový soubor	56
6.2	Výzkum a vývoj konstrukčních materiálů	56
6.2.1	Vývoj a testování stříkaného betonu s nízkým pH	57
6.3	Demonstrační experiment (prototypové úložiště).....	57
6.4	Výzkum a vývoj metod pro charakterizaci poškozené a ovlivněné zóny horniny.....	57
6.5	Výzkum a vývoj metod pro určení napětí v horninovém masivu	58
7	Závěr	59

Seznam použitých zkratk

DFN	Discrete Fracture Network (puklinová síť)
DP	Dobývací prostor
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
Plánu V&V SÚRAO 2020	Technická zpráva SÚRAO č. 525/2020: Střednědobý plán výzkumu a vývoje SÚRAO pro období 2020-2030
PVP Bukov	Podzemní výzkumné pracoviště Bukov
RAO	Radioaktivní odpady
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	Věda a výzkum
VJP	Vyhořelé jaderné palivo

Abstrakt

Tato zpráva je strategickým dokumentem SÚRAO, který navazuje na Střednědobý plán výzkumu a vývoje SÚRAO pro období 2020-2030 (TZ SÚRAO č. 525/2020), a popisuje dokončené, probíhající a plánované aktivity v PVP Bukov. Plánované činnosti jsou rozděleny na experimenty vycházející z cílů definovaných v plánu výzkumu a vývoje SÚRAO, které budou realizovány v následujících letech, a dále na experimenty pokročilejší fáze provozu PVP Bukov. Mezi klíčové oblasti experimentů pro následující roky patří vývoj metod charakterizace a modelování horninového prostředí, testování technologických postupů realizace ukládacích vrtů, vývoj a testování modelů UOS pro jejich použití v experimentech s fyzikálními modely ukládacích míst zabývajících se studiem THM a THMC procesů, nebo také experimenty zaměřené na výzkum migrace látek v horninovém prostředí. V pokročilé fázi provozu PVP Bukov jsou v plánu především experimenty zaměřené na experimentální ověření určeného českého konceptu inženýrských bariér a ostatních komponent ukládacího systému. Jednotlivé plánované dílčí projekty povedou k realizaci komplexního demonstračního experimentu, kterým by měl být zakončen hlavní program provozu laboratoře.

Klíčová slova

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

1 Úvodní informace

1.1 Program vývoje a přípravy hlubinného úložiště

Jednou z hlavních odpovědností Správy úložišť radioaktivních odpadů (SÚRAO) dle Koncepte nakládání s VJP a RAO je projekt přípravy hlubinného úložiště RAO a VJP (dále jen HÚ), které bude sloužit pro uložení všech radioaktivních odpadů, které není možné uložit do povrchových a přípovrchových úložišť. V rámci tohoto rozsáhlého projektu SÚRAO podporuje a provádí potřebné výzkumné, vývojové a demonstrační aktivity. Konkrétní popis těchto aktivit na další roky 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 Koncepte 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.

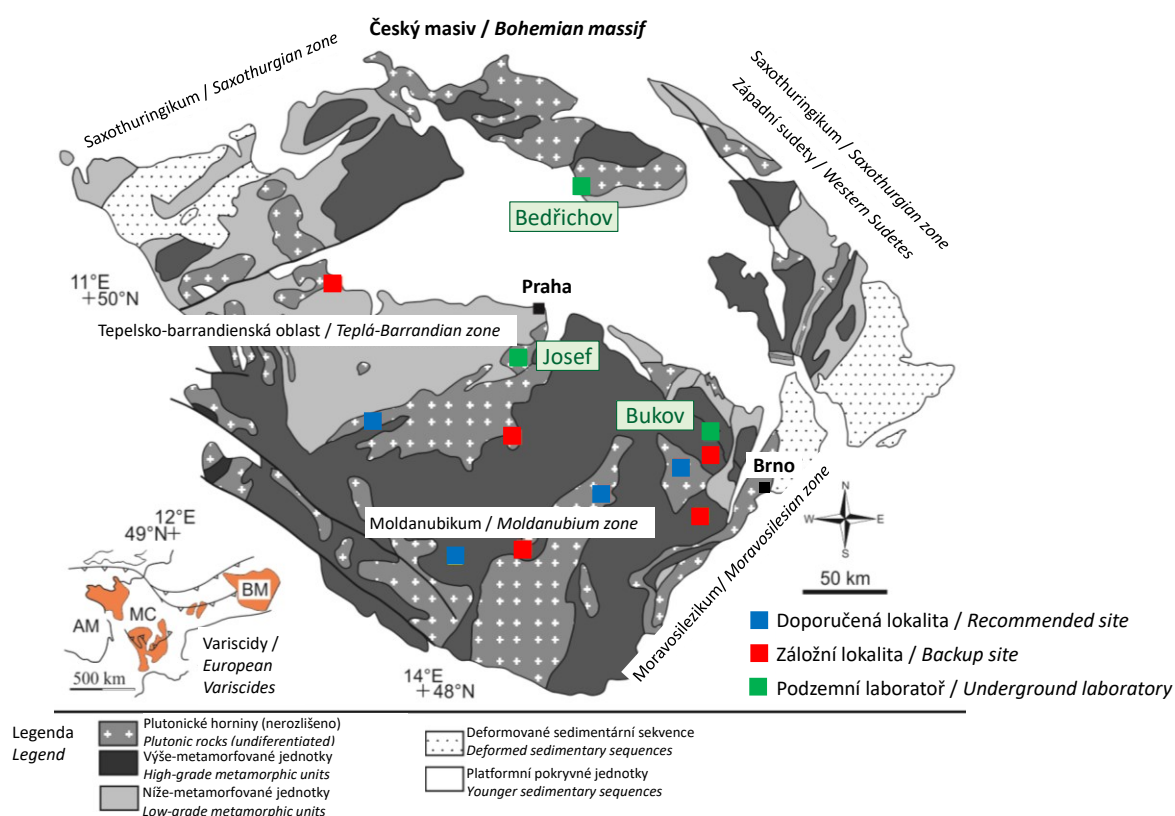
1.2 RD&D aktivity SÚRAO v podzemních pracovištích

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 a postupným využíváním vlastních pracovišť v ČR.

ČR se inspirovala u předních států s nejpokročilejšími programy hlubinného ukládání a následuje ověřený postup přípravy HÚ, jehož nezbytnou součástí je provádění programu ve vlastních generických 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) 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) testujících místní podmínky konkrétní potenciální horninové formace pro výstavbu HÚ, nebo podzemních prostorů uvnitř komplexu HÚ (v ČR označovaných jako konfirmační laboratoř). Jejich hlavním cílem 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 a podzemní laboratoři Josef. Zmínit lze také lokalitu Melechov, která sice není podzemní laboratoří, ale obsahuje síť

hlubokých vrtů z povrchu a je tak vhodná pro výzkum vlastností hornin krystalinika pomocí povrchových metod a měření ve vrtech. Obě zmíněná podzemní pracoviště lze za určitých podmínek využít pro experimenty, nicméně ani jedno není ve vlastnictví SÚRAO a možnost provádění technických prací je zde omezená kvůli jiným původním účelům těchto zařízení. Tunel Bedřichov slouží jako vodárenský přivaděč. Podzemní laboratoř Josef provozovaná Centrem experimentální geotechniky (Fakulta stavební, ČVUT v Praze) se nachází v pronajatých podzemních prostorách, které vznikly v průběhu průzkumu zlatonosných ložisek a není zde možné realizovat nové ražby. Obě podzemní pracoviště se nachází v horninách krystalinika, jejich nevýhodou je ale malá hloubka pod povrchem (experimenty je zde možno realizovat v max. hloubce okolo 150 m), díky čemuž zde proudění vod vykazuje dynamiku mělkého oběhu. Pro co největší přiblížení se reálným podmínkám budoucího HÚ u in-situ experimentů bylo zbudováno Podzemní výzkumné pracoviště (PVP) Bukov, které se nachází v hloubce 550 m. Na Obr. 1 jsou vyznačeny pozice zmiňovaných podzemních pracovišť společně s kandidátními 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, který bude sloužit k průkazu, že v dlouhodobém časovém horizontu nedojde k ozáření reprezentativní osoby ve větší míře, než je přípustné. Součástí celku jsou pak geologický, tektonický, hydrogeologický, geomechanický, geochemický a THMC modely. K vývoji modelovacích nástrojů a ověřování jejich funkčnosti je potřeba využívat dostupná co nejvíce relevantní data, a to nejlépe z in-situ měření. V období realizace prací ve finální lokalitě 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 prověřená s předstihem. Jedinou možností včasného získání relevantních dat pro tyto modely je jejich získání v generických pracovištích.

V rámci souboru studií realizovaných v roce 2020 bylo provedeno zhodnocení jaká data jsou potřeba, ověření možnosti jejich získání na 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 porovnána 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.

Výzkumný program SÚRAO je zajištěn realizací oddělených zakázek/projektů, jejichž dodavatel je vybírán na základě výběrových řízení dle zákona o zadávání veřejných zakázek. Na přípravě záměru projektu, zadávací dokumentace pro výběrová řízení a poté řízení projektu pracují specialisté SÚRAO. Multidisciplinární náplň projektů většinou směřuje k vytvoření konsorcií více dodavatelských firem.

1.3 Struktura zprávy

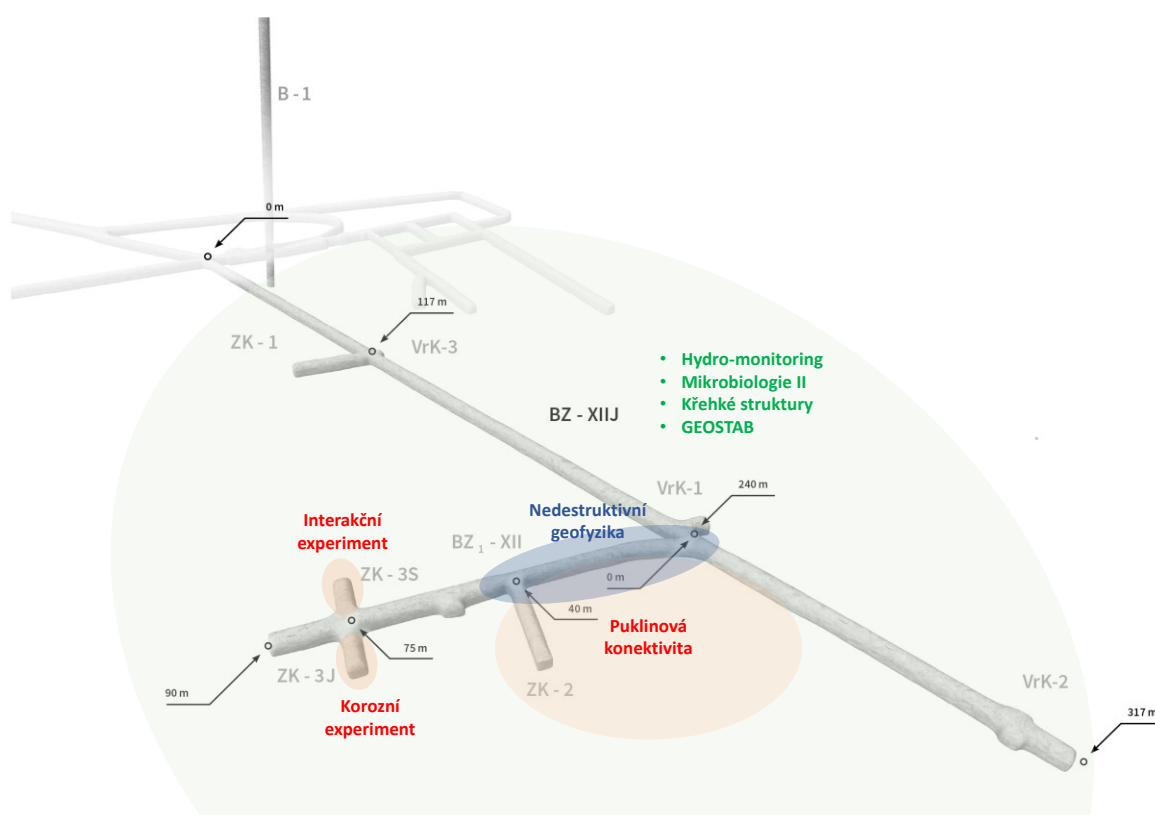
Tato zpráva je dále členěna na kapitoly s následujícím obsahem:

- Kap. 2: PVP Bukov – popis laboratoře a dolu Rožná I, cíle PVP Bukov, přehled předchozích plánů experimentů pro PVP Bukov a dalších realizovaných studií.
- Kap. 3: Přehled dokončených a probíhajících projektů – základní popis vazby projektů k HÚ, cílů a výsledků.
- Kap. 4: Plán experimentů dle prioritních cílů Plánu V&V SÚRAO 2020 – popis aktivit na nejbližší roky provozu laboratoře.
- Kap. 5: Plán experimentů pokročilé fáze provozu PVP Bukov – popis aktivit pro období po roce 2025.

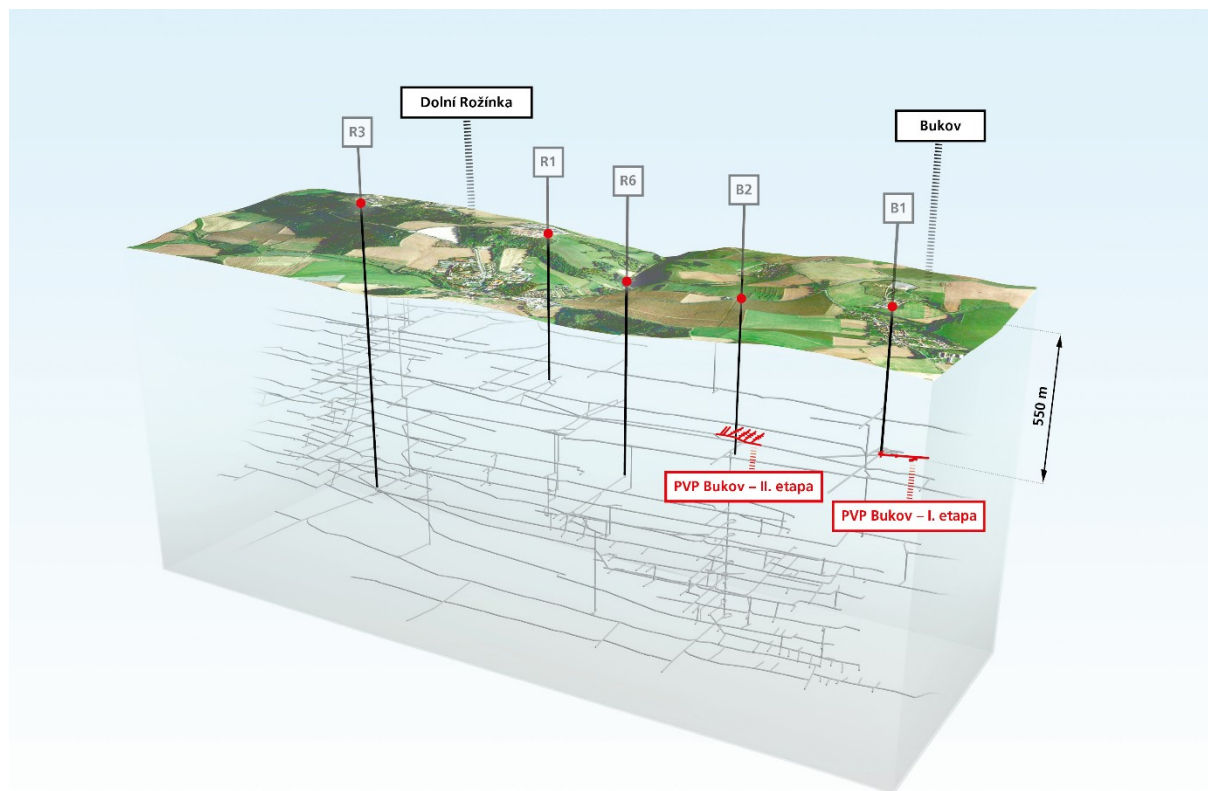
2 PVP Bukov

2.1 I. Etapa výstavby PVP Bukov

Podzemní prostory PVP Bukov vybudované v rámci I. Etapy výstavby laboratoře se nacházejí v úrovni 12. patra bývalého uranového dolu Rožná I v hloubce 550 m poblíž jámy B-1 pod obcí Bukov. Za výstavbu laboratoře a následné zajištění jejího provozu, jakožto i návazné infrastruktury dolu, je zodpovědná společnost DIAMO s.p., o.z. GEAM. Ražba tohoto podzemního komplexu společností DIAMO započala v roce 2013 a dílo bylo kompletně dokončeno v roce 2017, kdy bylo předáno do užívání a zahájena experimentální fáze. I. Etapa obsahuje celkem 470 m chodeb (Obr. 2), které jsou využívány pro experimentální činnosti. Pozice laboratoře v rámci dolu Rožná I je patrná z Obr. 3.



Obr. 2 – Schéma laboratorních chodeb I. Etapy PVP Bukov



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

Z hlediska geologické stavby se laboratoř nachází ve vysoce metamorfovaném vulkano-sedimentárním komplexu tvořeném převážně migmatity a amfibolity. Vzhledem ke zvolené pozici laboratoře nejsou laboratorní chodby kříženy žádnými strukturami s uranovými minerály a monitorovaná aktivita ionizujícího záření je zde téměř nulová.

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, případně byla pro stabilizaci stěn použita svorníková výztuž v kombinaci s tahokovem či pletivem. 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

I po ukončení aktivních těžebních činností v roce 2017 pokračoval provoz podzemního díla v původním režimu, kdy byl udržován přístup na důlní patra pod úroveň laboratoře, a to až na 24. patro do hloubky 1200 m, odkud byla čerpána důlní voda. Přístup do těchto pater byl využíván v rámci některých projektů a byly tak získávána unikátní data.

Do června roku 2020 byl provoz laboratoře zajišťován společností DIAMO v rámci smlouvy o zajištění provozuschopnosti a údržby PVP Bukov. Cílem následného snažení obou smluvních stran bylo najít takové řešení, aby byly v budoucnu sníženy vysoké náklady na provoz důlní infrastruktury.

V průběhu let 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 by bylo efektivnější získat nezbytná data jiným způsobem, např. v zahraničních podzemních pracovištích. Výsledkem bylo doporučení navazujícího provozu za podmínky jeho optimalizace. Navazujícím typem prací byly tedy technickoekonomické studie srovnávající varianty provozu dolu. Ty měly za cíl 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. Výsledky studií jasným způsobem demonstrovaly, že je potřebné pokračovat v experimentech na PVP Bukov a investovat do změn v konfiguraci provozu dolu. Finální, nejlépe ekonomicky výhodné a technicky proveditelné řešení, obnáší zatopení spodních pater dolu, až po úroveň 13. patra, se zachováním provozu čtyř jam (R1, R6, B2 a B1). Mezi výrazné investiční zásahy tohoto řešení patří především změny ve stávajícím kaskádním systému čerpání důlních vod na povrch.

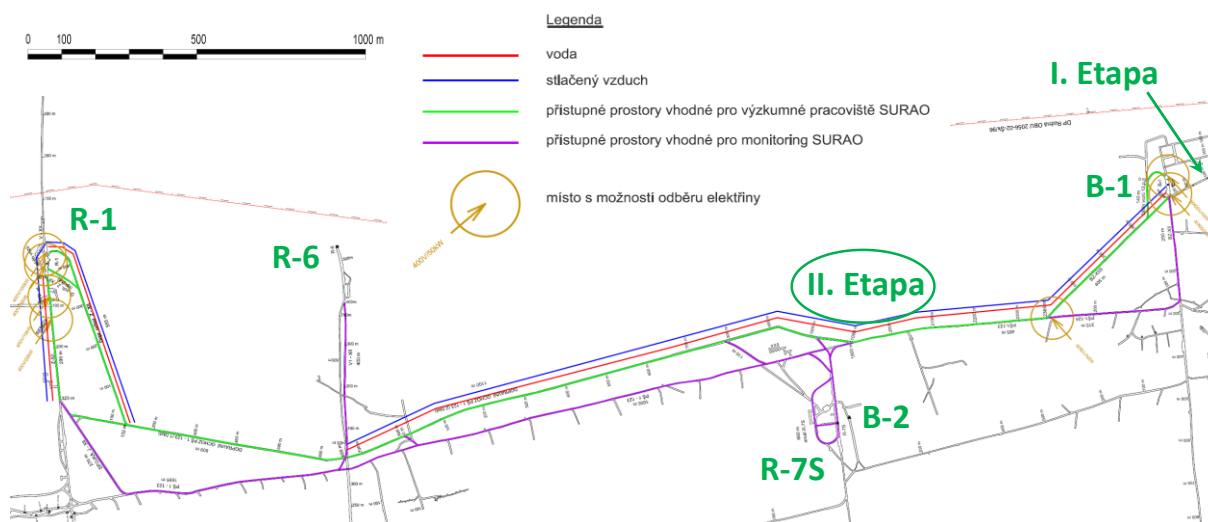
V návaznosti na vyhodnocení výše popsaných studií byla k datu 1.7.2020 uzavřena nová smlouva o spolupráci při provozu PVP Bukov. Smlouva celkově pokrývá zajištění provozu do roku 2030 s opcí do roku 2035. Smlouva zahrnuje období Přípravy na dlouhodobý provoz, kdy budou prováděny práce na rekonfiguraci dolu včetně potřebných investic, po jejichž dokončení naváže režim provozu dolu v optimalizovaném rozsahu. Provozovaná a udržovaná zůstanou pouze ta důlní díla, která jsou nezbytně nutná pro zajištění chodu laboratoře. V rámci smlouvy budou nadále udržovány prostory I. Etapy, a dále je smlouvou pokryta i výstavba nových částí laboratoře (II. Etapa PVP Bukov). Kromě úprav v podzemí je také v plánu příprava povrchového zázemí laboratoře u jámy B-1.

V druhé polovině roku 2020 byly zahájeny práce na rekonfiguraci dolu a od začátku roku 2021 není už přístup na spodní patra dolu možný a v budoucnu nadále nebude.

2.3 II. Etapa výstavby PVP Bukov

Protože pro naplnění výzkumného programu SÚRAO jsou stávající prostory I. Etapy nedostatečné, byla naplánována ražba nového komplexu laboratorních chodeb. Ten bylo rozhodnuto umístit do oblasti východně od jámy B-2, resp. R7-S (Obr. 3, Obr. 4). Důvodem lokalizace v této části bylo nevhodné horninové prostředí v okolí chodeb I. Etapy zastižené průzkumnými vrty a dále skutečnost, že není možné přerušit chod běžících experimentů nebo dokonce způsobit jejich poškození vlivem razících prací.

V plánovaných místech 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 s vyznačením chodeb, které zůstanou v budoucnu přístupné a bude možné je využít pro výzkumné aktivity (například zřízení monitorovacích stanovišť).



Obr. 4 – Mapa provozované části 12. patra dolu

Plán nového komplexu chodeb obnáší ražbu šesti laboratorních chodeb (délka každé do 90 m), z kterých budou raženy desetimetrové zkušební komory. Délky zkušebních komor vycházejí z délek důlních děl, které lze větrat přirozeným větrným proudem bez nutnosti instalace separátního větrání a podle předešlých zkušeností je taková komora dostatečná a vhodná pro poskytnutí technologického zázemí pro experiment nebo realizaci jádrových vrtů. Navržený komplex dále obsahuje větrací chodby, které propojují dvojice laboratorních chodeb a umožňují vytvořit průchozí větrný proud. Lokalizace zkušebních komor bude záviset na zastižené geologické stavbě v rámci laboratorní chodby. V maximalistickém rozsahu je uvažováno s umístěním 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.

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 I. Etapy (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 Hory (Havlová et al. 2017).

Tabulka 1 - Oblasti výzkumného a experimentálního plánu SÚRAO

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, seismičita, 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).

Nejaktuálnějšími podklady jsou výstupy Studie porovnání nákladů na realizaci RD&D aktivit spojených s přípravou HÚ v podzemních výzkumných pracovištích do roku 2035, která byla provedena v období zhodnocení pokračování PVP Bukov v roce 2020 (Pospíšková et al. 2020e). Jejím cílem bylo posoudit využitelnost dat z RD&D programu v PVP Bukov (Pospíšková et al. 2020a), dále posouzení experimentálního plánu PVP Bukov a odhad nákladů

na jeho realizaci (Pospíšková et al. 2020b), zhodnocení technického a ekonomického potenciálu laboratoře (2020c) a provedení SWOT a Cost Benefit Analýzy (Pospíšková et al. 2020d).

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).

V roce 2020 byla také pod vedením Posiva Solutions Oy 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).

3 Přehled dokončených a probíhajících projektů

Tato kapitola obsahuje přehled dokončených a probíhajících projektů na PVP Bukov. Ke každému projektu je zde vždy uvedeno vysvětlení vazby k programu HÚ, cíle projektu, způsob řešení a u dokončených projektů pak vybrané výsledky. U probíhajících projektů jsou uvedeny průběžné výsledky, jsou-li dostupné. Přehled všech projektů je obsahem Tab. 2.

Tabulka 2 - Přehled realizovaných projektů v PVP Bukov

Název projektu/zakázky	Pracovní označení projektu	Stav projektu	Období realizace	Hlavní dotčená oblast programu SÚRAO	Reference
Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Charakterizace I	Dokončený	2013 - 2017	VEP1	Bukovská et al. (2017), Souček et al. (2018)
Vznik a monitoring EDZ při výstavbě PVP Bukov	EDZ	Dokončený	2015 - 2018	VEP5	Staš et al. (2019)
Mikrobiální screening PVP Bukov a dolu Rožná	Mikrobiologie I	Dokončený	2017 - 2019	VEP2	Steinová et al. (2019)
Získání dat z hlubokých horizontů dolu Rožná	Hluboké horizonty	Dokončený	2017 - 2020	VEP1	Bukovská et al. (2020)
Interakční fyzikální modely in-situ v PVP Bukov	Interakční experiment	Probíhající	2017 - 2022	VEP4	Svoboda et al. (2021)
Hydrogeologický a hydrochemický monitoring podzemních a důlních vod v prostoru PVP Bukov	Hydromonitoring	Probíhající	2018 - 2023	VEP2	Vylamová et al. (2020)
Dlouhodobé monitorování horninového masivu v PVP Bukov nedestruktivními geofyzikálními metodami	Nedestruktivní geofyzika	Probíhající	2018 - 2022	VEP2	Bárta et al. (2020)
Monitoring aktivity křehkých struktur PVP Bukov a dolu Rožná	Křehké struktury	Probíhající	2018 - 2022	VEP2	Stemberk et al. (2020)

Rozvoj geotechnických a geofyzikálních metod pro získání 2D a 3D obrazu geologické stavby (externí projekt)	GEOSTAB	Probíhající	2017 - 2021	VEP2	-
Dlouhodobý výzkum geochemických bariér pro ukládání jaderného odpadu	GEOBARR	Probíhající	2018 - 2022	VEP1	-
Výzkum puklinové konektivity v PVP Bukov	Puklinová konektivita	Probíhající	2019 - 2024	VEP3	Zuna et al. (2020)
Monitoring anaerobního mikrobiálního osídlení PVP Bukov a rešerše vztahů horninového prostředí a mikrobů	Mikrobiologie II	Probíhající	2020 - 2021	VEP2	-
Geologická a geotechnická charakterizace horninového prostředí – PVP Bukov II	Charakterizace II	Probíhající	2021 - 2025	VEP1	-
Pilotní korozní experiment v PVP Bukov	Korozní experiment	Probíhající	2021 - 2034	VEP4	-

3.1 Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov (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.

Návaznost na program 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 rozličného souboru metod a měření pro určení geologických, petrologických a petrofyzikálních charakteristik, hydrogeologických a transportních parametrů hornin, geomechanických a geotechnických parametrů horninového masivu.
- Integrace širokého souboru dat do 3D modelů.

Výsledky

- Prostředí vykazuje vysokou variabilitu geologických vlastností vhodných pro realizaci experimentů. Mezi základní typy zastížených hornin patří amfibolity, ruly a migmatity.
- 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).
- 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 CaSO₄, přes CaHCO₃ a NaHCO₃ až k NaCl. Opakované odběry vod z přítoků do chodeb PVP Bukov po dobu 2,5 let odhalily posun ve složení vod z typu NaHCO₃ na vody se zvýšeným obsahem síranů.

3.2 Vznik a monitoring EDZ při výstavbě PVP Bukov (2015-2018)

Název zakázky: Vznik a monitoring EDZ při výstavbě PVP Bukov

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

Návaznost na program HÚ

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

Cíle

- Získání dat souvisejících se vznikem a vývojem zóny poškození (EDZ) a narušení (EdZ) okolo podzemního díla a horninové klenby při výstavbě laboratorních chodeb.
- Aplikování různých metod pro určení rozsahů oblastí EDZ/EdZ 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/EdZ v čase.
- Monitorování změn napjatosti v hornině pomocí kuželových tenzometrických sond instalovaných do vrtů vytvořených s předstihem a vedených ve směru ražby laboratorních chodeb ve vějířovém uspořádání. Sledování změn v napětí v průběhu pokračující ražby v různých kolmých vzdálenostech od laboratorní chodby.

Výsledky

- Výsledky geofyzikálních měření odhalily oblast, která může být interpretována jako oblast narušení (EdZ). 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.
- Tenzometrická měření prokázala 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).
- 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.

3.3 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

Návaznost na program HÚ

Jak je známo, tak 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.

- Navrhnout plán 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.
- 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.
- 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.

3.4 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.

Návaznost na program HÚ

Podzemní prostory, především ukládací chodby, v HÚ nesmí být protnuty zlomovými strukturami velkého měřítká, protože ty mohou tvořit přímou transportní cestu pro radionuklidy z ukládacího místa do geosféry a dále do biosféry. Důl Rožná I poskytl unikátní příležitost pro studium takové zlomové zóny v různých hloubkových úrovních. Jednalo se o 1. zónu (R1) uranového ložiska, což je tektonická zóna o mocnosti až 20 metrů přístupná z chodeb v hloubkové úrovni 550 až 1200 m.

Cíle

- Popis poruchové zóny velkého měřítká 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. 5).
- Definování jak a do jaké vzdálenosti od poruchové zóny velkého měřítká jsou ovlivněny vlastnosti horninového masivu.

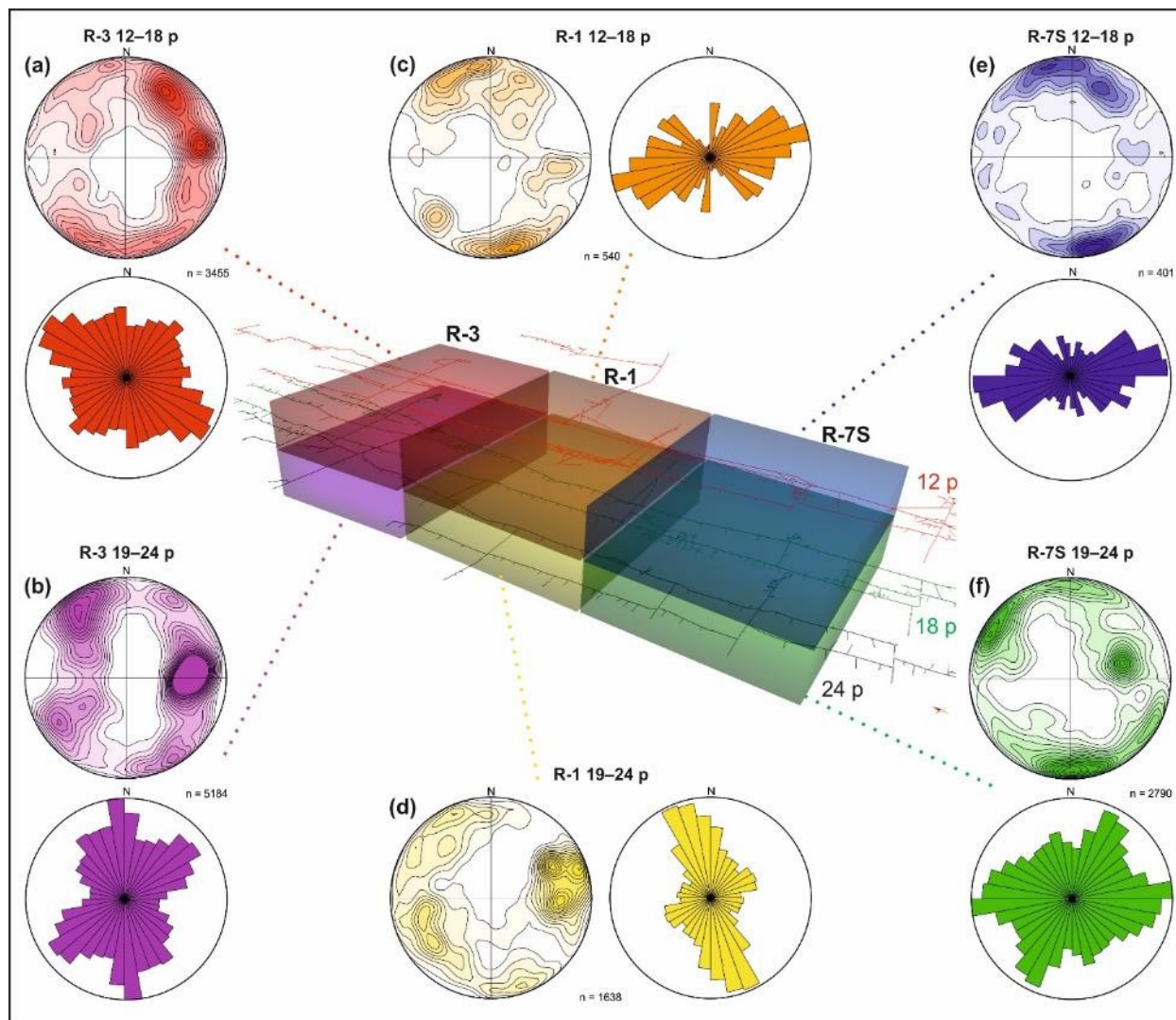
- Rozšíření existující databáze znalostí o místním horninovém prostředí a tím i vědeckého potenciálu podzemní laboratoře.
- Interpretace změn geologických parametrů s hloubkou a získání věrohodných informací z prostředí hornin krystalinika Českého masivu potřebných pro program HÚ.

Způsob řešení

- Studium vlastností poruchové zóny R1 v různých hloubkách.
- Příprava geotechnických stanovišť s výzkumnými vrty 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 reinterpretace 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 použity 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. 5 - Strukturální diagramy zobrazující prostorové změny orientace křehkých struktur v rámci celé studované části dolu Rožná I (Bukovská et al. 2020)

3.5 Interakční experiment (2017–2022)

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

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

Návaznost na program HÚ

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

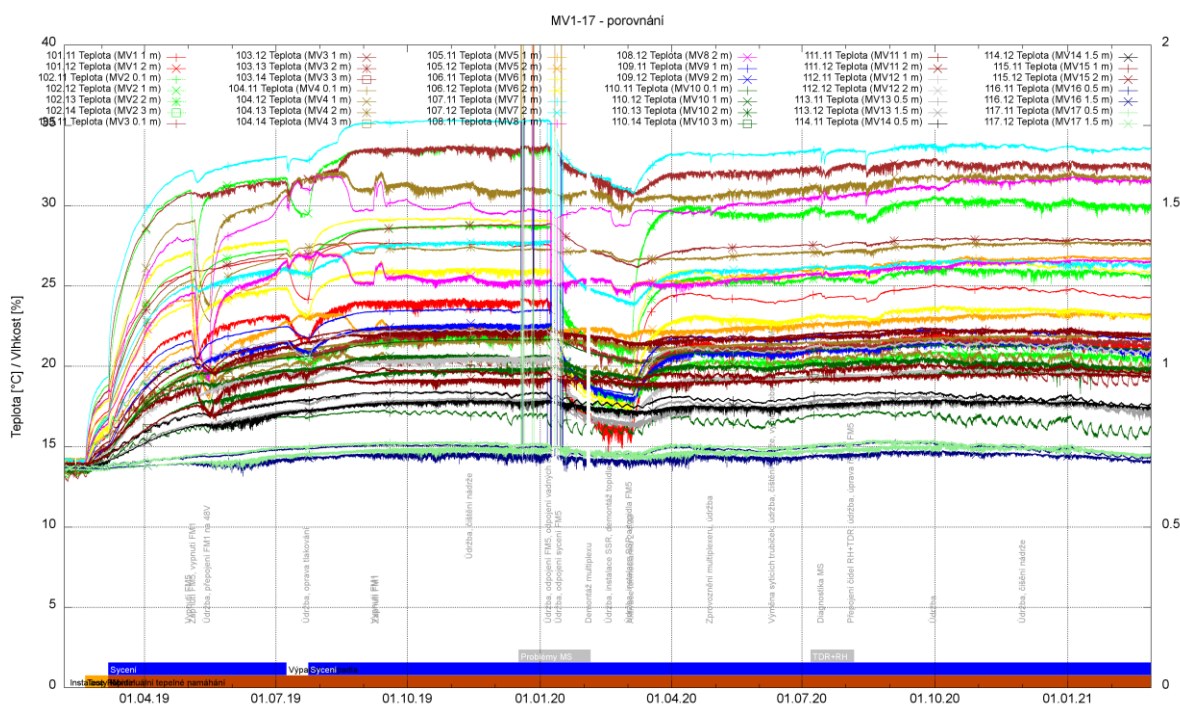
- Získat informace a data pro matematické modelování šíření tepla v bentonitové bariéře a hostitelské hornině.

Způsob řešení

- Návrh, výstavba a provozování fyzikálních modelů reprezentujících v měřítku ukládací vrt HÚ. Experiment obsahuje 5 nezahříváných a 5 zahříváných fyzikálních modelů (4 zahříváné pomocí elektrických topidel na 100°C, 1 na 200°C. Modely instalované do vodorovných vrtů (délka 1,5 m, průměr 250 mm) obsahují bentonitovou výplň v různých formách (lisované segmenty nebo granulovaná směs) a betonové segmenty (běžný beton a beton se sníženým pH).
- Modely obsahují systém 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. 6).
- Zatěžovací fáze (zahřívání a sycení vodou) a monitorovací fáze fyzikálních modelů byly zahájeny v březnu 2019 a budou probíhat minimálně do roku 2022. Po ukončení provozu modelů bude provedeno jejich rozebrání a následovat budou laboratorní analýzy odebraných vzorků materiálů (Pozn. není součástí této zakázky).

Průběžné výsledky

- Za účelem zrychlení interakčních procesů mezi materiály je bentonitová náplň uměle sycena vodou za zvýšených tlaků vody. Senzory v bentonitu zaznamenaly rychlý nárůst monitorovaných parametrů (vlhkost, bobtnací tlak) a jejich relativní ustálení již po několika prvních týdnech zatěžovací fáze. Vývoj parametrů prokázal, že bentonit je již plně nasycen a mohou probíhat interakce.
- Měření vývoje a distribuce teploty v modelech a hornině ukázalo relativně rychlou stabilizaci teploty v bentonitu. Oproti tomu probíhá neustálý pozvolný nárůst teploty v okolní hornině.
- Součástí projektu je 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.



Obr. 6 – Příklad výstupu monitorování – průběh teplot ve všech monitorovacích bodech v hornině v okolí fyzikálních modelů (Svoboda et al. 2021)

3.6 Hydro-monitoring (2018–2023)

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

Řešitelé: Geotest, a.s.; KOCCMAN Envimonitoring s.r.o.

Návaznost na program HÚ

Hydrogeologické vlastnosti horninového masivu a hydrochemické vlastnosti podzemní vody jsou klíčové pro bezpečnost HÚ. Důl Rožná I 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

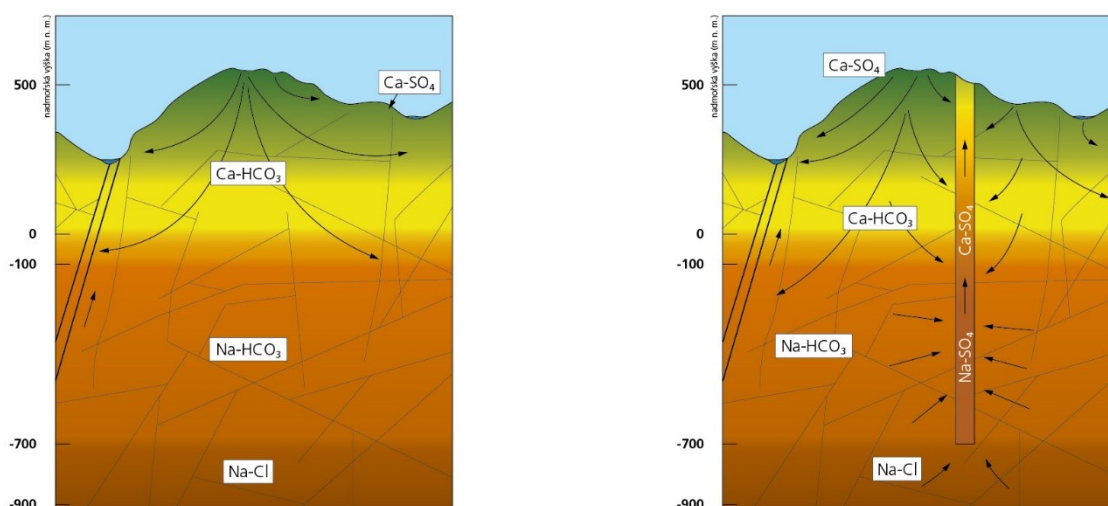
- Získání porozumění o charakteru proudění podzemních vod mělkého i hlubokého oběhu.
- Pokračování v dlouhodobém monitoringu na síti pozorovacích bodů vytvořených během výstavby I. Etapy PVP Bukov v roce 2015. Výměna nefunkčních zařízení na monitorovacích bodech a zařazení nových bodů.
- Vyhodnocení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

Způsob řešení

- Online monitorování a interpretace všech přítoků podzemních vod do prostor I. Etapy (z otevřených vrtů, puklinových systémů).
- Opakované odběry vzorků podzemních vod pro analýzy změn chemismu. Analýzy pro určení stáří vod. Vzorkování probíhá 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.

Průběžné výsledky

- V prostorách laboratoře převažují vody typu Ca-Mg-HCO₃-SO₄, zatímco v hlubších patrech dolu vody typu Na-SO₄-HCO₃ (Obr. 7).
- Monitorované přítoky vod do prostor laboratoře vykazují velmi malé sezónní fluktuace. Celkově mají přítoky postupný klesající trend od zahájení monitoringu po vyražení chodeb laboratoře.



Obr. 7 – 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)

3.7 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.

Návaznost na program HÚ

Nedestruktivní geofyzikální metody poskytují cenné informace o vlastnostech a chování horninového masivu včetně oblasti EDZ/EdZ bez nutnosti realizace vrtných prací. V HÚ se

předpokládá aplikace neinvazivních metod v co největší míře, tak aby by bylo co nejméně narušeno hostitelské horninové 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 pomocí geofonů (Obr. 8).

Průběžné výsledky

- Systém pro dlouhodobý monitoring byl zprovozněn v září 2019, kdy byla zahájena monitorovací fáze s cílem sledování změn vlastností zájmového horninového bloku.



Obr. 8 – Pohled na stanoviště experimentu (Bárta et al. 2020)

3.8 Křehké struktury (2018–2022)

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

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

Návaznost na program HÚ

Za účelem prokázání tektonické stability hostitelské horninové formace HÚ je potřeba zvolit vhodnou metodu pro ověření pohybů po tektonických strukturách.

Cíle

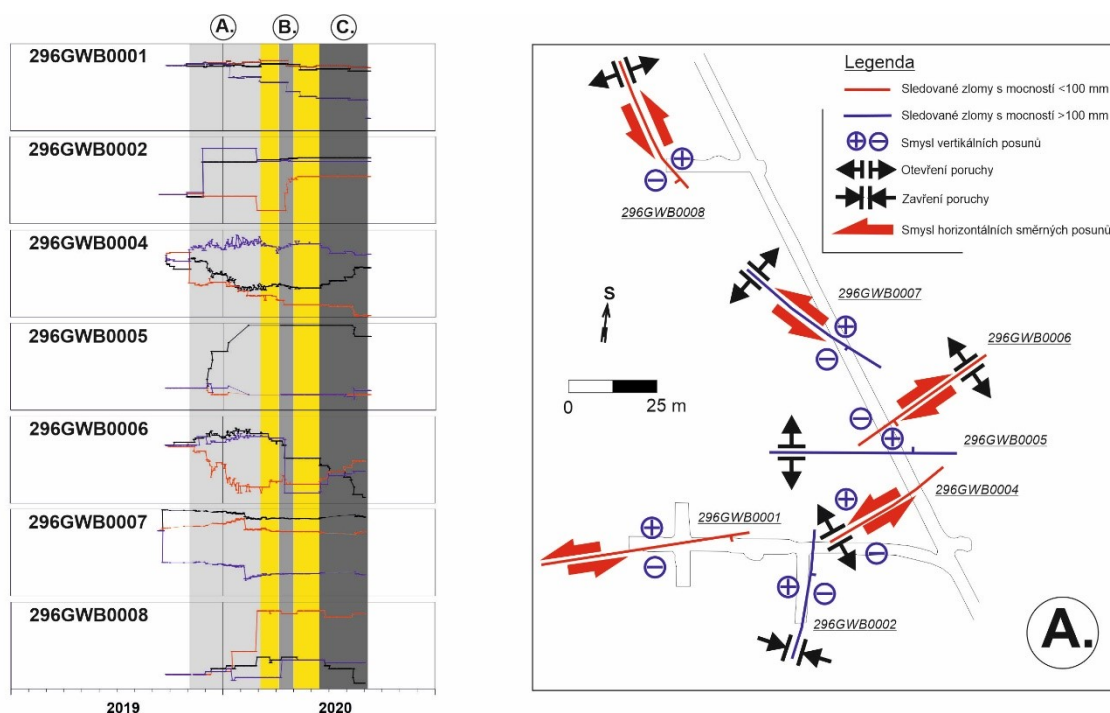
- Získání znalostí o pohybech křehkých struktur v krystalinických horninách v hloubce odpovídající HÚ.
- Vybudování monitorovací sítě, která bude poskytovat časové řady o chování různých generací struktur křehké tektoniky, které zahrnou reprezentativní generace struktur v měřítku zlomová zóna-zlom-puklinová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

Způsob řešení

- Měření pohybů křehkých struktur je realizováno pomocí 3D opticko-mechanických extenzometrů TM-71. Jedná se o zařízení vyvinuté v ÚSMH, s velmi vysokým rozlišením ve srovnání s tradičními i moderními technikami monitorování pomalých pohybů. Přístroj dokáže zaznamenat posun ve všech třech směrech a zároveň rotace a dosahuje přesnosti 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.

Průběžné výsledky

- Původní síť měřících bodů instalovaná v roce 2019 obsahovala celkem 7 osazených struktur přímo v prostorách laboratoře na 12. patře a další 2 struktury na 24. patře a 1 na 20. patře dolu. Informace z měřících bodů ze struktur na spodních patrech dolu byly sbírány do poloviny roku 2020 kdy byly zařízení demontovány z důvodu plánovaného zaplavení těchto prostor. Demontovaná zařízení byla osazena na 3 nově vybrané struktury uvnitř laboratoře a doplňují tak původní sérii měřidel.
- Celkově tak měřící síť nyní obsahuje 10 sledovaných struktur, kde jsou všechna měřidla napojená na datovou síť a je zajištěn přenos dat.
- Za monitorované období byla prozatím pozorována období extenzního režimu charakteristického poklesy a otevíráním sledovaných křehkých struktur, období bez výrazných posunů, ale následně i opačného kompresního režimu.
- Celkově se posuny na zlomech pohybují v setinách mm za rok a můžou mít charakter krátkodobých trendů nebo pulzní (skokový) charakter (Obr. 9).



Obr. 9 – Příklad schématického znázornění smyslu pohybů na monitorovaných zlomech v PVP Bukov (Stemberk et al. 2020)

3.9 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

Návaznost na program HÚ

Obdobně jako u projektu v Kap. 3.7 se tento projekt týká vývoje neinvazivních geofyzikálních metod pro potřeby jejich budoucího použití v prostředí HÚ.

Jedná se o externí projekt programu TRIO, jehož poskytovatelem je 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.

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.

Výsledky

Budou dostupné po ukončení tohoto externího projektu.

3.10 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.

Návaznost na program HÚ

Projekt je založen na principu přírodního analogu. Úložiště vyhořelého jaderného paliva je do jisté míry podobné přírodnímu ložisku uranu. 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 se právě těmto podmínkám vyhnout.

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

Cíle

Cílem projektu je doplnit dosavadní údaje o mechanismech vzniku 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. Horninová bariéra je při ukládání jaderného odpadu důležitým prvkem bezpečnosti úložiště. Je reálný předpoklad, že horninové prostředí úložiště, které bude blízké horninovému prostředí ložiska, bude působit jako přirozená geochemická bariéra a blokovat migraci uranu do okolí.

Způsob řešení

Realizace projektu se soustředí na dvě oblasti výzkumu. Jedna část projektu se zabývá podmínkami primární akumulace uranu na ložisku Rožná. Druhá se zaměřuje na podmínky dlouhodobé stability uranu na ložisku Rožná s ohledem na využití získaných dat při výzkumu úložiště vyhořelého jaderného paliva. Část výzkumu prováděného v druhé části projektu může nalézt uplatnění při realizaci výzkumného programu v PVP Bukov. Jedné 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.

Výsledky

Budou dostupné po ukončení tohoto externího projektu.

3.11 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.

Návaznost na program 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

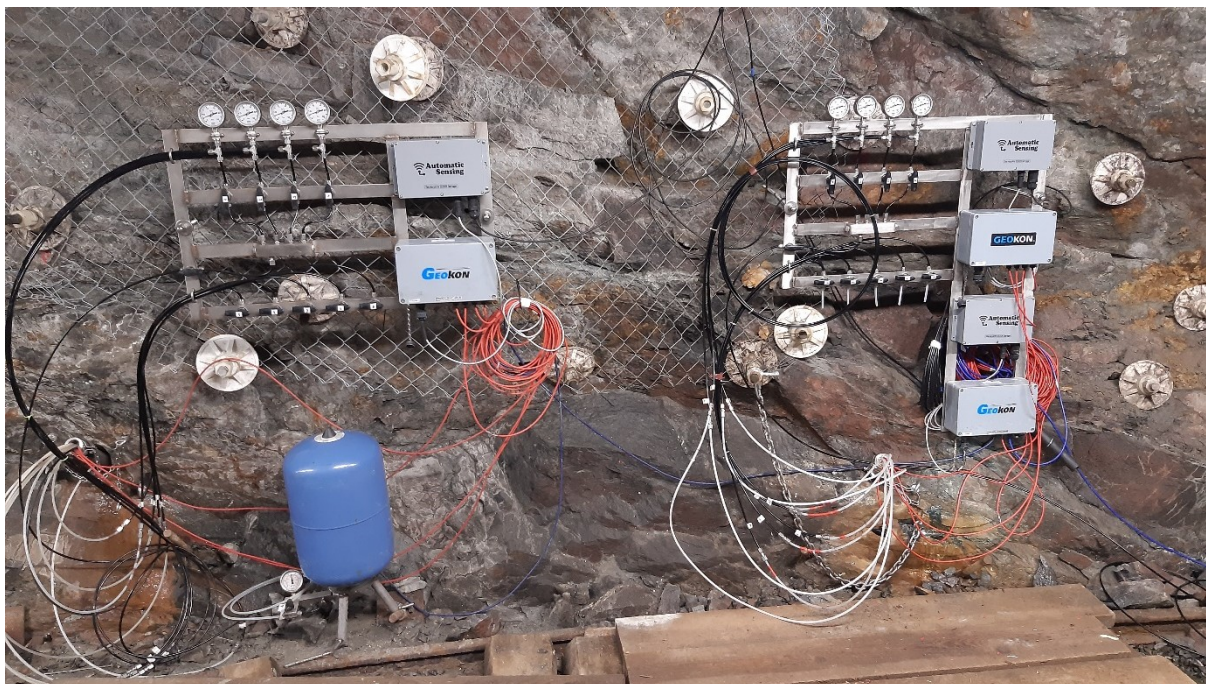
- Získání dat pro vývoj hydrogeologických a transportních modelů pro simulace proudění vody a přidruženého transportu stopovacích látek.
- Provedení geologické a hydrogeologické charakterizace vybraného horninového bloku (včetně popisu diskretních hydraulicky vodivých struktur) v měřítku metrů až desítek 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 3 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

- K březnu 2021 je provedena detailní charakterizace a tvorba koncepčního modelu zájmového bloku za pomoci informací z mapování stěn chodeb a dvou doposud provedených vrtů (vrt S-27: délka 58,1 m, úklon -31°; vrt S-31: délka 70,6 m, úklon -38°; Obr. 10).



Obr. 10 – Pohled na zhlaví testovacích vrtů S-27 a S-31 s kontrolními a ovládacími panely

3.12 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

Návaznost na program HÚ

Tento projekt navazuje na mikrobiální screening provedený v letech 2017 až 2019 (Kap. 3.3). Mikrobiální osídlení na PVP Bukov a jiných částech dolu Rožná I bylo charakterizováno jako silně antropogenně ovlivněné. Zastoupené je především aerobními zástupci mikrobů. Navazující projekt se více zaměřuje na anaerobní mikrobiální aktivitu, kterou se v PVP Bukov doposud nepodařilo přesně popsat.

Cíle

- Zlepšení porozumění o rozdílech mezi přirozeným osídlením horninového prostředí a antropogenně ovlivněného prostředí.
- Zevrubné seznámení s mikrobiální aktivitou v PVP Bukov s ohledem na plánované experimenty (Korozní experiment - 3.14, apod.).
- Popsání souvislostí a nejistot u mikrobiálních procesů v celém systému HÚ za pomoci rešeršních 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 diversity

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, acetogenní mikroorganismy).
- Rešeršní 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.

Průběžné výsledky

- Na přelomu roku 2020 a 2021 úspěšně proběhly 2 kampaně odběrů a měření v podzemí. V současnosti pokračují laboratorní analýzy na odebraných vzorcích a rešeršní práce.

3.13 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.

Návaznost na program HÚ

Projekt českého HÚ zahrnuje rozsáhlý RD&D program v generických podzemních pracovištích (především PVP Bukov), který má za cíl v brzkých fázích přípravy HÚ výrazně posunout vpřed technický koncept 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 nové části podzemní laboratoře (II. Etapa PVP Bukov). 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 charakterizačních postupů pro jejich budoucí využití v HÚ.

Cíle

Cílem projektu je určit geologické a geotechnické parametry horninového bloku na 12. patře dolu Rožná I, v kterém se bude nacházet nový laboratorní komplex chodeb. Projekt má, obdobně jako při výstavbě I. Etapy PVP Bukov (Kap. 3.1), poskytnout ucelenou databázi geovědních dat pro její další použití. Konkrétně budou tato data využita pro sestavení a ověření vyvíjených popisných a matematických modelů.

Mezi konkrétní cíle patří:

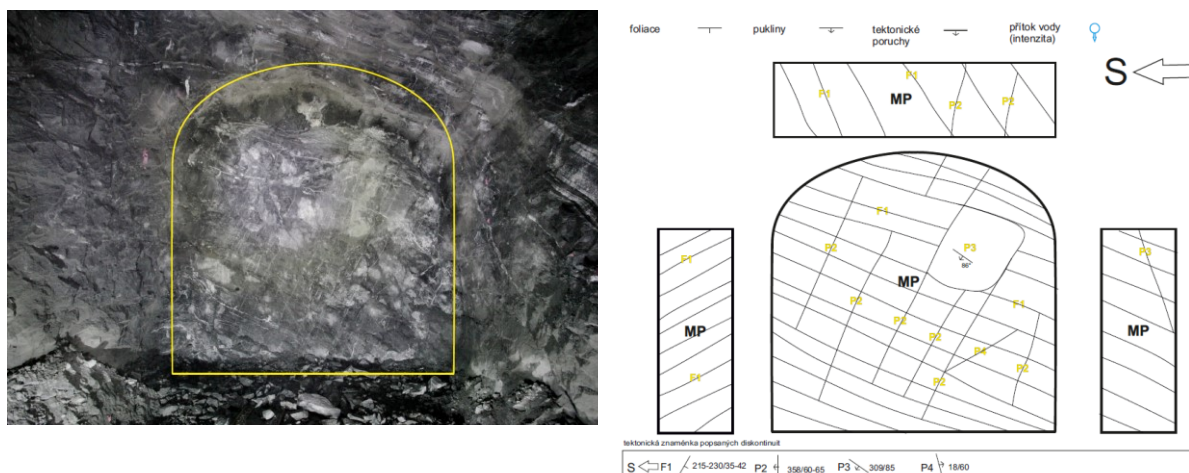
- Komplexní geologický popis zájmového bloku horniny s důrazem na strukturní elementy důležité jak pro bezpečnost HÚ, tak pro výběr vhodných míst pro jednotlivé plánované experimenty,
- Popis a charakterizace EDZ/EdZ v okolí nově vyražených chodeb a komor a vytvoření základní báze informací a dat pro 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, které poskytnou soubor dat pro naplnění cíle projektu: Geologická a strukturně-geologická dokumentace; Petrografická a geochemická charakterizace hornin; 3D strukturně-geologický model; Hydrogeologická charakterizace; Transportní charakterizace 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 EDZ (Excavation Damaged Zone) a EdZ (Excavation disturbed zone); Systém klasifikace horninových bloků; 3D sken vyraženého podzemního díla PVP Bukov.

Průběžné výsledky

Projekt byl úspěšně zahájen v březnu 2021, kdy byly ihned započaty práce na mapování čelb ražených podzemních děl, které budou probíhat po celou dobu ražby (Obr. 11). Razičí práce realizované metodou hladkého výlomu byly zahájeny paralelní ražbou laboratorních chodeb L8 a L7.



Obr. 11 – Příklad fotodokumentace a zakreslení čelby při geologické dokumentaci

3.14 Korozní experiment (2021–2034)

Název zakázky: Pilotní korozní experiment v PVP Bukov

Řešitelé: ÚJV Řež, a. s.

Návaznost na program 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. 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.

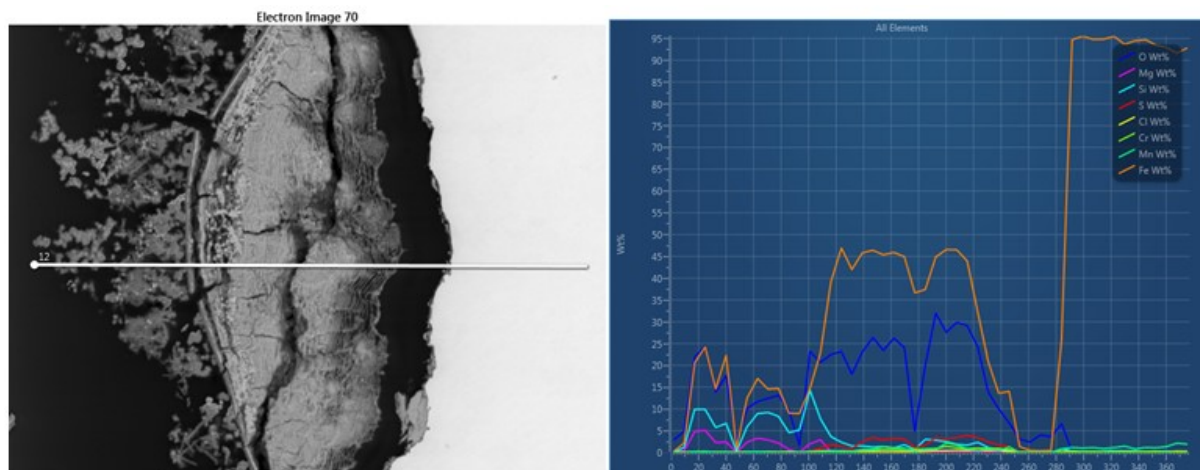
Cíle

- 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 pro in-situ experiment, vytvoření 11 vrtů a jejich charakterizace (geologická dokumentace, chemické složení vody, obsah kyslíku, Eh, pH a mikrobiologické osídlení) a následný monitoring. Detailní charakterizace materiálů experimentu v laboratorních podmínkách.
- Příprava metodiky a technického řešení korozního experimentu. In-situ experiment obnáší přípravu sestav (fyzikálních modelů) s korozními moduly (obsahující korozní vzorky), jejich instalaci do vrtů, zatěžovací fázi (zahřívání na 70 až 95 °C) a vyjmutí sestav z vrtů pro laboratorní analýzy materiálů (Obr. 12).
- Součástí základní fáze experimentu je příprava a instalace sestav do 5 vrtů. Každá sestava obsahuje 4 moduly s různým složením korozních vzorků a bentonitové výplně (1. uhlíková ocel – základní materiál a český Ca-Mg bentonit; 2. uhlíková ocel – svar a český Ca-Mg bentonit; 3. uhlíková ocel – základní materiál a jiný typ bentonitu pro účely porovnání; 4. měď a zahraniční bentonit). 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. Jako materiál pro vzorky uhlíkové oceli bude použit ten navržený v rámci projektu *Výzkum a vývoj ukládacího obalového souboru pro hlubinná úložiště* (SO2013-088). 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. Důležitou podmínkou před instalací korozních sestav do vrtů je obsah kyslíku v uzavřených vrtech, který musí být nižší než 1 %. Všech 6 zbývajících vrtů je určeno pro dlouhodobý monitoring vod a pro případnou instalaci dalších korozních sestav, jejichž potřeba vyplyne v průběhu řešení projektu.



Obr. 12 - Ilustrační obrázek liniové analýzy vzorku oceli (Kotnour et al. 2019)

4 Cíle výzkumného programu v PVP Bukov

Základní cíle PVP Bukov vychází z potřeb definovaných v plánech výzkumu a vývoje SÚRAO (Pospíšková et al. 2015, Vokál et al. 2020). Důležitým účelem 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, která jsou označovaná jako konfirmační laboratoř.

Obecné 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 třeba získávat data, která umožní prokázání stability a bezpečnosti plánovaného úložiště v navržené hloubce pod povrchem. PVP Bukov v tomto ohledu slouží pro získávání dat z in-situ měření potřebných k vývoji modelovacích nástrojů a ověřování jejich funkčnosti, tak aby ve finální lokalitě mohl být vytvořen komplexní soubor modelů pro prokázání dlouhodobé a provozní bezpečnosti HÚ a demonstraci technické proveditelnosti. Součástí souboru modelů jsou geologický, tektonický, hydrogeologický, geomechanický, geochemický a THMC modely.

b) Otestování a demonstrace uvažovaných technických řešení

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

c) Vývoj a ověření metodik studia

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

d) Získání know-how výstavby a charakterizace podzemního díla

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

Další konkrétní cíle PVP Bukov na následující roky byly definovány v Plánu V&V SÚRAO 2020 (Vokál et al. 2020).). Jedná se o následující cíle:

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

První 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 pro potřeby umístění 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. 3.1) a Hluboké horizonty (kap. 3.4). Dále budou probíhat 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, budou získávána data pro vývoj metodiky modelování puklinových sítí a zpracování migračních parametrů do transportních modelů. Pro tyto účely bude využíváno jak laboratorních experimentů, tak in-situ testů a monitoringu (in-situ migrační experimenty, monitoring napětí v masivu). V případě testování stochastických přístupů v modelování bude nutné zabezpečit získání dostatečného množství dat pro statistické vyhodnocování.

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

První informace na toto téma přinesl projekt Mikrobiologie I (kap. 3.3) a mikrobiální aktivita je také sledována v Interakčním experimentu (kap. 3.5). Další směřování tohoto tématu by měl přinést probíhající projekt Mikrobiologie II (Kap. 3.12). Tento projekt se soustředí na zhodnocení složení mikrobiálního osídlení vod v anaerobních podmínkách a interpretaci vzhledem k jejich složení a hydrochemickým podmínkám v zaplavených monitorovacích vrtech. Víceméně je zde sledováno přirozené mikrobiální osídlení, jehož vliv je významný zejména pro inženýrské bariéry a transport látek. Rešeršní část tohoto projektu se mimo jiné věnuje odlišení přirozeného zdroje mikrobů od zdroje zavlečeného - např. z bentonitu. Budoucí aktivity nebudou řešeny v rámci odděleného programu, ale budou vždy spojené s některým konkrétním experimentem. Příkladem je Korozní experiment (kap. 3.14), kde bude sledována mikrobiologická aktivita.

3) Ověření šíření tepla v úložišti od zdrojů simulujících VJP

Pro projektové řešení HÚ je klíčové ověření šíření tepla v úložišti od zdrojů simulujících VJP, které ovlivňuje dimenzování podzemních chodeb a ukládacích vrtů. Pro naplnění tohoto cíle jsou v plánu in-situ experimenty popsány v kap. 5.3.

4) Ověření predikce transportu mobilních radionuklidů v izolační části úložiště

Pro ověření predikce transportu mobilních radionuklidů v izolační části úložiště je v plánu zahájit program experimentů určených pro studium advektivního a difuzního transportu látek pomocí stopovacích testů s neaktivními i aktivními látkami (kap. 5.4).

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 pilotního korozního experimentu (kap. 3.14).

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 definovaných v kapitole Plánu V&V SÚRAO 2020 v části popisující výzkumnou podporu hodnocení bezpečnosti HÚ (kap. 5.3.4).

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 přinesou charakterizační a výzkumné aktivity doprovázející výstavbu nových laboratorních chodeb, která byla zahájena v lednu 2021. Část prací je řešena v projektu Charakterizace II (kap. 3.13) a dle potřeb je v plánu provést doplňující experimenty (kap. 6.4).

Při zpracování plánu aktivit byly oblasti experimentů rozděleny na prioritní experimenty, které budou řešeny v nejbližších letech provozu (ty jsou blíže rozpracovány v Kapitole 5), a na experimenty pokročilé fáze provozu (Kapitola 6). Klíčovou součástí programu pokročilé fáze provozu PVP Bukov (po roce 2025) jsou experimenty související s vývojem a testováním inženýrských bariér. Tyto experimenty budou vycházet z výsledků programu SÚRAO označovaného jako „Výplně a ostatní inženýrské komponenty HÚ“ (dále jen „Výplně“). Jednotlivé dílčí aktivity tohoto programu budou směřovat k realizaci komplexního demonstračního experimentu (prototypového úložiště), který bude syntézou všech znalostí z předcházejících experimentů a měl by jím být zakončen hlavní program provozu laboratoře. Kromě experimentů souvisejících s inženýrskými bariérami tato kapitola obsahuje vybrané experimenty, který byly vybrány na základě studií (viz kap. 2.4) a shledány jako potřebné pro program HÚ. Plán experimentů pokročilé fáze provozu PVP Bukov bude velmi ovlivněn výsledky projektů z předchozí fáze (Kap. **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**) a dalších aktivit SÚRAO. Program HÚ je dynamický proces, na který musí plán výzkumu, vývoje a demonstračních aktivit pružně reagovat. Očekává se, že první projekty poskytnou nezbytné vstupy pro upřesnění plánovaných experimentů nebo v průběhu jejich řešení vznikne potřeba pro zcela nový experiment. Jedná se především o následující projekty/programy:

- Výplně a ostatní inženýrské komponenty HÚ (Výplně)
- Výzkumná podpora SÚRAO pro bezpečnostní hodnocení technického řešení HÚ II (Bezpečnost II)
- Připravovaný projekt zaměřený na ověřování korozních vlastností materiálů UOS
- Výzkum a vývoj obalového souboru pro vysoko a středně aktivní odpady

5 Plán prioritních oblastí experimentů na nejbližší období provozu

5.1 Vývoj metod charakterizace a modelování horninového prostředí

5.1.1 Vývoj klasifikačních systémů

Vazba na program HÚ

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

Cíle

Pro popis vlastností izolační části HÚ a odvození klasifikačního systému pro specifika horninového prostředí českého masivu bude stanoven klasifikační index vhodnosti horninového prostředí, který vedle geologických charakteristik zahrne i geomechanické, hydrogeologické a hydrogeochemické požadavky. Z ekonomického pohledu umožní projekt definování potřebných kompaktních bloků hornin na potenciálních lokalitách a stanovení optimálních způsobů výstavby včetně systému inženýrských bariér.

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.

5.1.2 Technologie popisu izolační části úložiště vrtnými pracemi

Vazba na program HÚ

Součástí plánovaného průzkumu na lokalitách vybraných pro umístění HÚ je mimo jiné realizace hlubokých vrtů do hloubky uvažovaného HÚ, které ověří do potřebné úrovně detailů změny fyzikálně-chemických parametrů hornin a podzemní vody s hloubkou, strukturně tektonické poměry v nižších hlubkových úrovních masivu a zpřesní hydrogeologickou charakteristiku prostředí až do hloubky plánovaného úložiště.

Pro tyto účely je žádoucí otestovat pokročilé metody jádrového vrtání a s tím související souslednost metodik jednotlivých dílčích výzkumů v projektovaném vrtu tak, aby se co nejefektivněji získal 3D model, který reprezentuje neovlivněné horninové prostředí. Některé z metodik plánované pro použití na lokalitách dosud nebyly testovány v takových hloubkách.

Získání orientovaného jádra a terénních dat pro testování DFN modelů dle Plánu V&V SÚRAO 2020 souvisí s cíli kapitol 9.2.2. Geologie a vývoj odporově-kapacitních parametrů horniny s hloubkou a vazba na hydrogeologický model souvisí s kapitolou 9.3.2.

Cíle

Realizace svislého výzkumného vrtu vedeného z povrchu minimálně do hloubky úrovně PVP si klade za cíl zejména optimalizace metodik a aplikace pokročilých technologií vrtání a ověření jejich efektivního využití při získávání souboru dat vstupujících do geologického a hydrogeologického modelu lokality. Získaná data mohou být zároveň použita pro upřesnění a validaci modelů z předchozích i současných výzkumných aktivit na PVP.

Zejména praktická zkušenost realizace vrtu včetně provedení potřebných etážových hydrodynamických zkoušek v dostatečné hloubce a otestování získání orientovaného jádra v hloubce PVP, napomohou při managementu a optimalizaci vrtných prací při průzkumu zaměřeném na výběr finální lokality pro umístění HÚ. Bez provedení těchto zkoušek by vzrostlo riziko neúčelně vynaložených prostředků při plánování vrtné kampaně na potenciálních lokalitách HÚ.

Způsob řešení

V průběhu realizace technického díla metodou wire-linového vrtání vhodnou pro hluboké vrty bude kladen důraz na získání orientovaného jádra a korelaci jeho správnosti pomocí karotážních metod (ABI, OBI), čehož lze využít k získání datasetu prostorově orientovaných puklin pro DFN model. Orientované vrtání bude před realizací otestováno ve vrtech v podzemí. Vrt bude z důvodu orientace vrtného jádra projektován ve sklonu minimálně 5°, jeho hloubka bude 600 m a konečný průměr bude velikosti N. V závislosti na umístění vrtu na povrchu v rámci DP Rožná a zároveň v blízkosti PVP Bukov lze očekávat navrtání zlomového pásma a v projektu bude počítáno také s otestováním hydraulické vodivosti takové poruchy v průběhu vrtných prací a případnou cementací nestabilního vrtného stvolu.

V průběhu vrtných a následných výzkumných prací budou mimo detailního mineralogického, petrografického, strukturně-geologického, geotechnického a petrofyzikálního popisu vrtného jádra provedena potřebná hydrogeologická a karotážní měření. Výsledkem bude nejen detailnější porozumění proudění vody v masivu, ale zejména optimalizace přístupu k získávání těchto dat – metodiky a technické zařízení, ověření časové náročnosti, posloupnosti a vhodné kombinaci zvolených metod. Je možné, že si realizace VTZ vyžádá nutnost vývoje nového technického zařízení nebo testování stávajících prostředků. Technické dílo bude rovněž využíváno pro dlouhodobý hydrogeologický monitoring, a také pro monitoring změn vlastností a parametrů horninového prostředí (např. změny ve vývoji puklinové sítě, změny pevnostních parametrů apod.).

5.1.3 Vývoj modelových koncepcí v oblasti proudění podzemních vod

Vazba na program HÚ

Pro naplnění plánu VaV SÚRAO budou v PVP Bukov provedeny (zejména migrační) experimenty, jejichž realizace je závislá na místních hydrogeologických podmínkách. Pro komplexní porozumění hydrauliky podzemních vod v oblasti PVP Bukov a vlivů změn týkajících se režimu vod na experimenty prováděné či plánované je nutné mít k dispozici komplexní hydrogeologický popis a matematický model zahrnující všechny vstupy do hydrogeologické bilance včetně důlních a provozních činností. Vývoj modelu bude zároveň využit pro ověření metodik modelování proudění vody v puklinovém prostředí a modelování prostředí ovlivněného vyraženými chodbami, které bude částečně simulovat situaci před uzavřením HÚ.

Cíle

Cílem projektu bude vytvoření matematického modelu a studie komplexně hodnotící hydrogeologickou situaci v PVP Bukov a okolí se zahrnutím vlivu podzemního díla na přirozený režim podzemních vod. Z důvodu hydraulické propojenosti podzemní laboratoře s ostatními částmi dolu, bude do modelu zahrnutá oblast celého dolu Rožná I. Dalším cílem bude vytvoření simulace zatápění důlních prostor a vlivu zatápění na okolí jako simulace uzavírání podzemního díla.

Na model proudění v oblasti PVP Bukov naváže testování metodiky využití DFN modelů pro popis proudění podzemní vody v puklinovém krystalinickém prostředí, s využitím postupů a metodik modelování puklinových sítí vyvinutých v rámci dřívějších projektů (Kabele 2018, Gvoždík et al. 2020). Dále budou testovány metody upscalingu a optimalizace výpočetně náročných transportních úloh v puklinovém prostředí pro účely vývoje komplexních hydraulických modelů hlubinného úložiště. Jedná se zejména o testování výpočtu proudění v puklinovém kontinuu.

Způsob řešení

Proudění podzemních vod v puklinovém prostředí, do kterého je PVP vyraženo, je i v neovlivněném stavu relativně složité pro popis a modelování. Pro komplexní pochopení proudění vod v důlní oblasti je potřeba navíc zahrnout i ovlivnění přirozeného režimu podzemních vod umělými zásahy, jejichž vliv je na formování hydrauliky oblasti zásadní.

Model bude vytvořen v relativně detailním měřítku tak, aby do něj bylo možné zahrnout i jednotlivé části důlního díla. Při modelování puklinového horninového prostředí se předpokládá využití kontinuálního přístupu s reprezentací chodeb jako 1D prvků a hydraulicky aktivních tektonických zón jako 2D prvků nebo 3D zón (v závislosti na možnostech konkrétního software). Tlakové okrajové podmínky bude možné převzít ze zjednodušeného modelu regionálního měřítku vytvořeného v první fázi projektu, do kterého bude spadat širší okolí celé zájmové oblasti. Model bude kalibrován na hladiny podzemní vody v přípoверхové vrstvě a na přítoky do chodeb změřené v podzemí. Důležitými vstupy do modelu budou tedy kromě přírodních parametrů, také geometrie chodeb a údaje o přítocích do díla a umístění čerpacích bodů včetně čerpaného množství.

Dalším krokem bude tvorba hydrogeologického modelu s využitím DFN přístupu, který poskytne možnost srovnávání různých přístupů reprezentace puklinového prostředí. Jako

srovnávací parametr budou moci sloužit přítoky vody v puklinách protínajících chodby, případně hydraulické odezvy na antropogenní činnosti v dolu. Spolu s DFN modelem budou testovány metody optimalizace výpočtů, jako například různé metody upscalingu, využití grafové reprezentace puklinových sítí (Andresen et al. 2013, Ghaffari et al. 2011), nebo multikontinuálního přístupu, kde jsou primární kontinuum (pukliny) s proudící vodou a sekundární kontinuum (hornina) řešeny paralelně samostatnými systémy rovnic (Lichtner & Karra 2014).

5.2 Demonstrační experimenty

Tyto experimenty jsou nedílnou součástí programu výzkumu a vývoje v oblasti ukládání radioaktivních odpadů a přípravy projektového řešení HÚ. Jejich úkolem je především demonstrovat proveditelnost a funkčnost navrženého systému HÚ včetně interakce jednotlivých komponent. Sekundárně pak mohou sloužit pro prezentaci principu hlubinného ukládání veřejnosti. Demonstrační experimenty slouží především k tomu, aby demonstrovaly a prokázaly funkčnost a proveditelnost navrženého systému v podmínkách HÚ. Program HÚ předpokládá, že navržené technologie a koncepční řešení ukládání VJP a ostatních RAO budou ověřeny a bude prokázána jejich funkčnost v podmínkách HÚ. Experimenty SÚRAO budou zaměřeny především na ověření proveditelnosti ukládacích vrtů, systému inženýrských bariér a dalších komponent a konstrukčních systémů.

V nejbližším období popisovaném v kapitole 4 budou aktivity zaměřeny na testování realizace ukládacích vrtů a zahájení příprav výstavby prezentačního stanoviště. Další hlavní aktivity jsou obsahem experimentů pokročilejší fáze a souvisí především s demonstracemi technologií pro inženýrské bariéry (Kap. 5).

5.2.1 Testování postupu realizace a charakterizace ukládacích vrtů

Vazba na program 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. 5.3), testováním inženýrských bariér (kap 6.1.1), kde budou budovány fyzikální modely ukládacích míst, ale i pro ověření samotného způsobu provedení velkoprofilových vrtů v podmínkách HÚ.

Cíle

Cílem experimentu je vytvoření horizontálních a vertikálních vrtů pro uložení modelů UOS dle aktuálních ukládacích konceptů zvažovaných pro HÚ v ČR v reálném měřítku. Program má ověřit možnosti technologických postupů a odhalit případné komplikace při charakterizaci horniny při výběru místa pro vrty, vrtném procesu a vyhodnocení přesnosti a kvality provedeného vrtu.

Důležitou součástí experimentu je také otestování metod charakterizace vrtů pro zhodnocení přesnosti provedení, metody zmapování povrchu vrtů, určení rozsahu poškozené oblasti hornin v okolí vrtu (borehole damage zone), nebo také otestování způsobů monitoringu přítoků vody do vrtů.

Způsob řešení

Pro realizaci prvních testů se předpokládá využití chodby ZK-1 v prostorách I. Etapy PVP Bukov. Tato chodba byla v minulosti byla podrobena opakovaným kampaním ERT a dalších geofyzikálních měření, jejichž výsledkem je interpretace EdZ v této chodbě.

V první fázi prací bude připravena chodba, kdy bude očištěna počva a provedeno detailní zmapování všech povrchů chodby. Bude provedena lokalizace vrtných prací a vytvoření prediktivního DFN modelu horninového bloku.

Realizován bude minimálně jeden svislý vrt a jeden vodorovný vrt s průměrem odpovídajícím koncepčnímu řešení HÚ. Celkové rozměry mohou být případně přizpůsobeny prostorovým možnostem v daném místě a použitému vrtnému zařízení. Vzhledem k prostorovým možnostem v chodbě ZK-1 (výšce stropu), nebude nejspíš možné využít technologie velkoprofilového vrtání, ale předpokládá se využití jádrového vrtu.

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.

5.2.2 Stanoviště úložného systému

Vazba na program HÚ

Program HÚ si vyžaduje kvalitní informování veřejnosti v průběhu celého období tohoto rozsáhlého projektu. Prezentace plánovaných technologií přímo v podzemním prostředí je nejlepším praktickým způsobem.

Cíle

Cílem je vybudování stanoviště s modely ukládacích míst pro vizuální prezentaci veřejnosti.

Způsob řešení

Pro zbudování tohoto stanoviště se předpokládá chodba ZK-1 a využití testovacích vrtů, které mohou být osazeny maketami UOS a inženýrské bariéry.

5.3 Experimenty související s šířením tepla v HÚ

5.3.1 Teplotní monitoring horninového masivu

Vazba na program 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 (kap. 5.3.3 a 5.3.4).

Cíle

Hlavním cílem je získání reálných dat potřebných pro vývoj matematických modelů pro simulace šíření tepla v HÚ. Projekt má přinést data např. pro dimenzování podzemních chodeb HÚ a výpočty šíření tepla v hostitelské hornině HÚ.

Mezi dílčí cíle projektu patří:

- Získání hodnot teploty horninového masivu od povrchu do hloubky 550 m (úroveň PVP Bukov).
- Určení rozsahu zóny tepelného ovlivnění horninového masivu antropogenní činností.
- Určení původní teploty v horninovém masivu na měřicích stanovištích (před vytvořením podzemních prostor dolu) pomocí matematického modelu. Predikce dalšího vývoje parametrů na základě validovaného matematického modelu.

Způsob řešení

Technické řešení obnáší přípravu monitorovacích stanovišť s vrty 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. Vrty budou vystrojeny 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 měřena i teplota a vlhkost vzduchu v chodbách u monitorovacích stanovišť. Minimální doba monitoringu teplot bude 4 roky.

Celý program bude úzce provázán s matematickým modelováním s prioritami vytvoření modelu vývoje teploty v masivu v zájmových místech a zjištění původní teploty masivu před vytvořením podzemních prostor. Jedním z výstupů programu bude i 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.

5.3.2 Vývoj a testování modelu simulujícího UOS

Vazba na program HÚ

Pro realizaci experimentů s fyzikálními modely ukládacích míst je potřeba vyvinout a otestovat zařízení (topidlo) simulující ukládací obalový soubor.

Cíle

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

Způsob řešení

Tato aktivita bude řešena jako samostatná zakázka nebo společně s realizací konkrétního experimentu kde bude topidlo využito.

Program bude zahrnovat návrh technického řešení topidla, následnou výrobu testovacího topidla, otestování v laboratorních podmínkách, a nakonec test v podzemní laboratoři.

5.3.3 Experimentální studium THM procesů

Vazba na program HÚ

Tento 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 a 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. Program obnáší výstavbu a provozování fyzikálních modelů bentonitové bariéry zahříváné maketou UOS, která bude bariéru zatěžovat stejným výkonem jako UOS v HÚ.

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 THM 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.

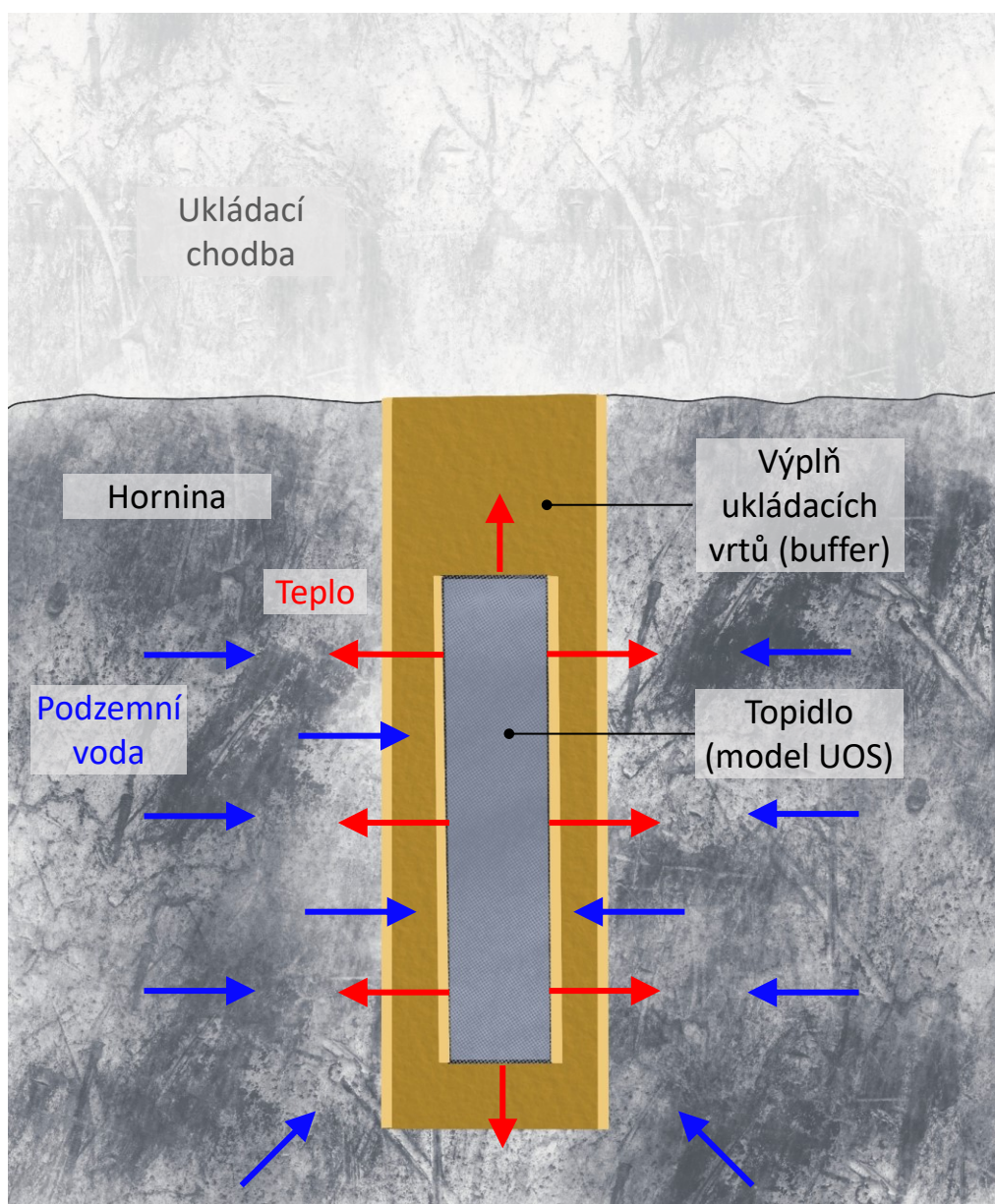
Způsob řešení

Předpokládá se výstavba několika fyzikálních modelů výplně ukládacích vrtů (bufferu; Obr. 13) tepelně zatěžovaných jako v podmínkách HÚ. Modely se budou lišit technickým řešením a množstvím instrumentace. Návrhy technických řešení i uspořádání a množství senzorů bude vycházet z připravovaného programu SÚRAO zabývajícího se Výplněmi a ostatními inženýrskými komponenty HÚ (dále jen „program Výplně“). První částí tohoto projektu bude rešerše všech zahraničních konceptů v horninách krystalinika, jejímž výstupem bude výběr několika možných technických řešení bufferu relevantních pro české HÚ. V následném programu matematického modelování budou simulovány vývoje vybraných technických řešení pro buffer a budou vybrána nejvhodnější řešení, která budou ověřována pomocí in-situ experimentů. Data z in-situ experimentů budou využívána pro kalibraci a validaci matematických modelů.

Měřítko fyzikálních modelů vůči reálnému bufferu v HÚ a uspořádání monitoringu bude založeno na požadavcích specialistů na matematické modelování. Preferované měřítko 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 (kap. 5.3.2)
- Výstupy matematického THM modelování (program Výplně)
- Připravené velkoprofilové vrty pro instalaci fyzikálních modelů (kap. 5.2.1).



Obr. 13 – Ilustrační schéma fyzikálního modelu ukládacího místa pro vertikální způsob ukládání

5.3.4 Experimenty pro ověření THMC procesů

Vazba na program 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. Program je úzce propojen s modelováním a laboratorními experimenty, které budou prováděny v rámci připravovaného projektu Výzkumná podpora SÚRAO pro bezpečnostní hodnocení technického řešení HÚ

(dále jen Bezpečnost II). Cílem těchto experimentů, které budou navrženy na základě volby vhodných technických řešení v podmínkách českého HÚ, je ověření modelů pro simulace vývoje inženýrských bariér v čase a prostoru v prostředí krystalinických hornin.

Oproti předcházející kapitole, z které vychází potřeba realizace fyzikálních modelů s důrazem na termo-hydro-mechanické procesy v úložném prostoru je v této části řešena i chemická část procesů. Bude se věnovat zejména korozním procesům na rozhraní UOS-bentonit nebo studiu vlivu korozních produktů a pórové vody na výplňové materiály.

Cíle

Cílem in-situ experimentů je získání dat pro validaci matematických modelů inženýrských bariér v reálném prostředí krystalinických hornin, tj. prostředí splňující předběžná kvalifikační kritéria pro umístění ukládacích vrtů, která zahrnují zejména kritéria na velmi malý přítok vody do vrtu, vhodné tepelné parametry a vhodné chemické prostředí. Tyto matematické modely zahrnují především:

- 1) Vývoj saturace bentonitu v úložných vrtech za podmínky velmi malého přítoku vody do vrtu (kap. 5.3.3).
- 2) Vývoj teploty v poli blízkých interakcí za podmínek velmi malého přítoku vody do úložného vrtu (kap. 5.3.3).
- 3) Vývoj koroze uhlíkové oceli v prostředí nenasyceného i nasyceného bentonitu za podmínek definovaných modely vývoje saturace a teploty v poli blízkých interakcí (3.14).
- 4) Vývoj pevných i plyných korozních produktů vznikajících při korozi uhlíkové oceli.
- 5) Vývoj migrace koroze aktivních látek z horninového prostředí přes nasycený bentonit k ukládacímu obalovému souboru.

Způsob řešení

První část programu in-situ prací obnáší výběr a přípravu stanoviště, které musí splňovat předběžná kvalifikační kritéria pro výběr úložných vrtů pro umístění obalových souborů s VJP. Velmi důležité je zejména zajištění optimálního přítoku vody do úložných vrtů a anaerobních podmínek ve vrtech pro provádění experimentů. Přítok vody do experimentálního vrtu musí být menší než maximální stanovená hodnota pro český koncept, ale zároveň takový, aby nebylo nutné umělé sycení bentonitu. Nejdůležitější parametry horninového prostředí, jako jsou rychlost toku vody do vrtu po uzavření úložiště, tepelné parametry horniny, chemické složení vody, pH, či Eh, budou vstupovat do modelů připravovaných nezávisle v projektu Bezpečnost II.

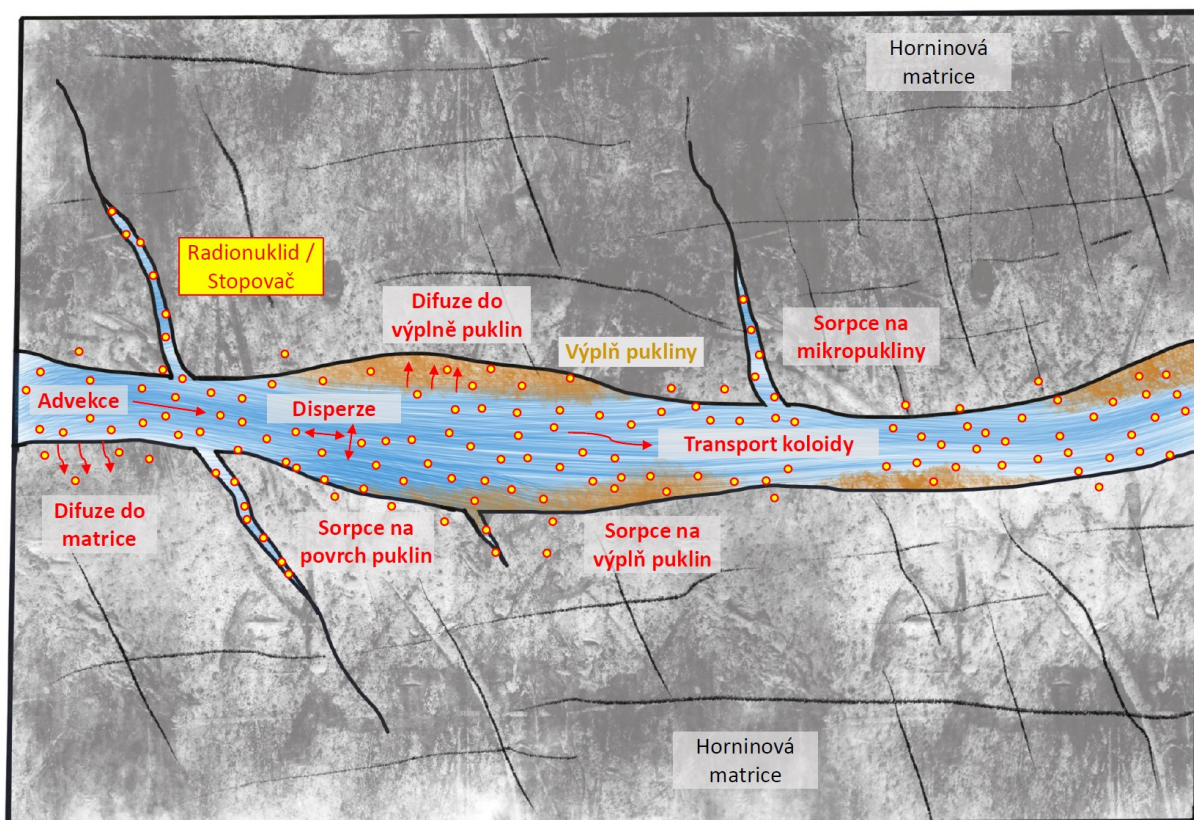
Program bude dále zahrnovat návrh a výstavbu in-situ fyzikálních modelů simulujících úložná místa s důrazem na chemické procesy. Vlastní, podrobná konstrukce experimentů bude navržena až po provedení předběžného matematického modelování v projektu Bezpečnost II, které rovněž určí celkovou potřebnou dobu realizace in-situ experimentu. První fáze experimentu trvající minimálně 5 let bude určena pro ověření předpokladů a hypotéz z předběžných modelů. Ověřena bude například rychlost sycení bentonitu a vývoj geochemických podmínek ve vrtu za podmínek nízkého průtoku vody a zároveň i vyšších teplot.

5.4 Migrace látek v horninovém prostředí

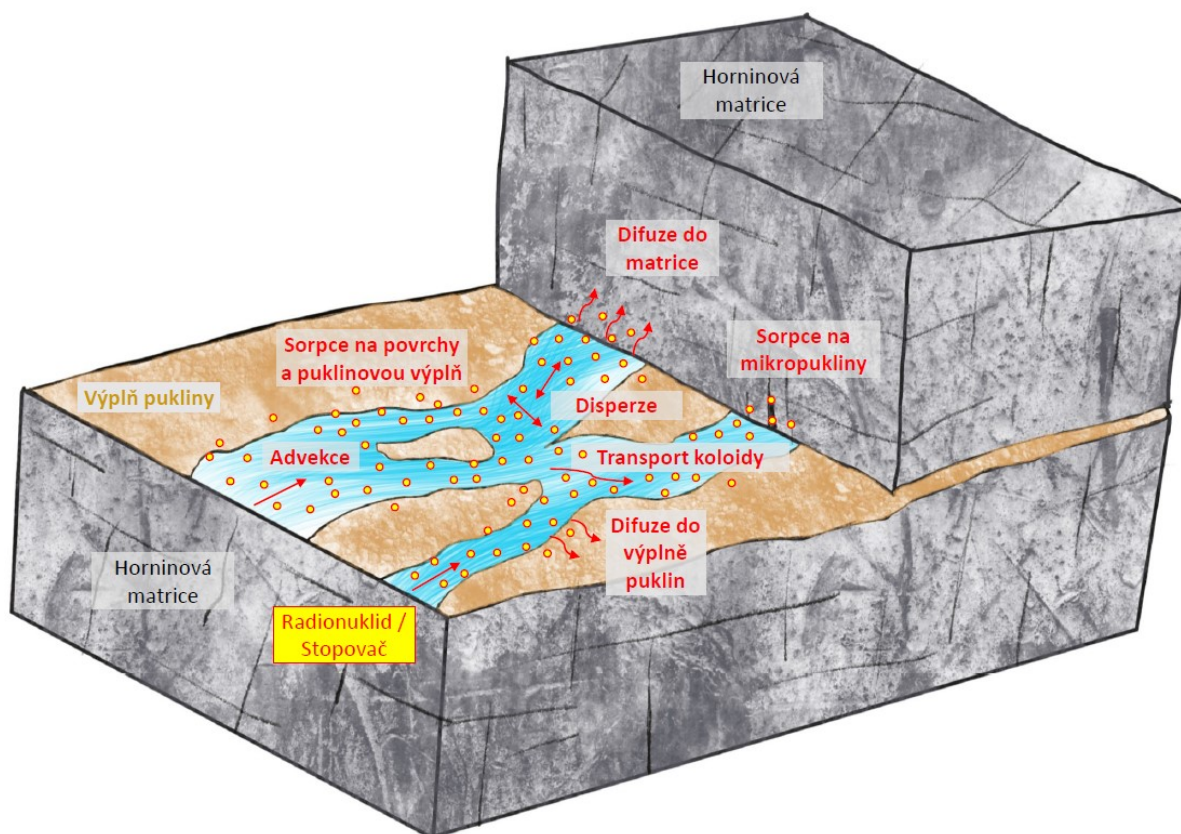
Tyto experimenty jsou určeny pro naplnění cíle č. 4 z Plánu V&V SÚRAO 2020, a to: Ověření predikce transportu mobilních radionuklidů v izolační části úložiště. Program zahrnuje pokračování ve studiu transportních procesů látek v puklinovém prostředí hornin krystalinika s použitím aktivních i neaktivních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

Základními transportními procesy v horninovém prostředí jsou advekce, hydrodynamická disperze, sorpce a difuze do matrice (Obr. 14 a Obr. 15). Advekce je daná rychlostí pohybu vody v horninovém prostředí a její hodnotou je podíl specifického průtoku a efektivní pórovitosti. Hodnota objemového průtoku se pro proudění v puklinách definuje pomocí kubického zákona. 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 zadržní mechanismus. Transportní mechanismy závisí na vlastnostech mobilních fází, jež se mohou v čase a prostoru měnit (chemismus, teplota, hustota, dynamická viskozita, zastoupení fází). 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. 5). Vnitřní nehomogenity puklin ovlivňují dobu zdržení radionuklidů, jednak variabilitou v objemových průtocích uvnitř pukliny, která může v závislosti na propojenosti vnitřních struktur dobu zdržení zkracovat nebo prodlužovat, ale oproti homogenním puklinám také mění kontaktní plochu migrujících radionuklidů a tato změna 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. 14 – Schéma transportních procesů v puklinovém prostředí ve 2D



Obr. 15 - Schéma transportních procesů v puklinovém prostředí ve 3D

Program výzkumu migrace látek byl zahájen realizací projektu Puklinová konektivita (Kap. 3.11). Jeho průběžné výsledky poukazují na 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 je vhodné pro naplnění základních cílů projektu, což je především studium propojenosti puklinových systémů. Zkoumaný blok jako celek pravděpodobně nebude reprezentativní pro ukládací místo v HÚ (izolační část), a proto je na programu výběr nového místa pro migrační zkoušky v prostorách II. Etapy.

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 poslední aktualizaci plánu experimentů pro PVP Bukov (Svoboda 2019). Tento způsob 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 M. 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 koktejlí 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 matici 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 mohou pak 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.

5.4.1 Procesy advekčně-disperzního transportu

Vazba na program HÚ

Viz společná úvodní část kapitoly.

Cíle

Cílem tohoto programu je porozumět procesům transportu a zadržování vybraných stopovačů v puklinovém prostředí PVP Bukov a testování modelů, kterými lze tyto procesy popsat. V obecné rovině tento cíl přispěje k věrohodnému nasimulování proudění v izolační části hlubinného úložiště a vývoji příslušných matematických prostředků. Kromě neaktivních stopovačů a barviv je možno pro stopovací experimenty využít i radioaktivní stopovače. Významnou výhodou využití radioaktivních stopovačů 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 a mapovací a charakterizační práce. Cílovými parametry horninového bloku pro realizaci testů je nízká propustnost a nepřítomnost výrazných hydraulicky vodivých zón 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 co nejvyšší a zvodnělé puklinové systémy by neměly 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 je také možné doplnit zkoušky 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 koktejlu 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.

5.4.2 Procesy difuze

Vazba na program HÚ

Viz společná úvodní část kapitoly.

Cíle

Cílem tohoto projektu je získat data pro 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

Experiment obnáší injektáž roztoku stopovačů z vtláčecího vrtu do horninového masivu, kde je roztok ponechán po definované době. 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 anaerobní podmínky. 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 radiostopovačů 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 pryskyřic. 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 jako obvykle 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.

5.4.3 Vývoj chemismu podzemní vody, hydrochemické testy, paleohydrologie

Vazba na program HÚ

Proudění podzemní vody v krystalinických horninách se odehrává především v mikropuklinách, puklinové síti, případně jiných geologických strukturách (WBF). Tyto struktury mívají často odlišné mineralogické složení od zbytku okolní méně propustné horniny. S tím souvisí i odlišné chemické složení podzemní vody hlavních přítoků na zlomových pásmech od pórové vody nacházející se v neporušené hornině. Kromě jiného mineralogického prostředí hraje roli také pomalý pohyb podzemní vody v neporušené hornině, kde se mohou vytvářet geochemické rovnováhy. Zachovat se zde mohou i původní roztoky z předchozích geologických pochodů (např. hydrotermální roztoky, fosilní vody), které se v místech zlomových pásem a okolí již dávno nevyskytují. Z hlediska posouzení bezpečnosti, tedy kompatibility inženýrských bariér s okolním horninovým prostředím a pro paleoklimatické rekonstrukce je důležité znát složení pórové vody a její vývoj v nedávné geologické době během posledních tisíců až stovek tisíc let v souladu s očekávanou životností úložiště. Tento bod reflektuje metodicky kapitolu 9.7.2 Plánu V&V SÚRAO 2020.

Cíle

Cílem experimentu je interpretace složení pórové vody v prostorech PVP Bukov a vývoj chemického složení a odvození obecných implikací paleoklimatologického scénáře a hodnocení kompatibility krystalinického horninového prostředí se systémem inženýrských bariér. Cíl je definován metodicky v návaznosti na projekt Hluboké horizonty (kap. 3.4) nebo dlouhodobého experimentu v Äspö HRL (Waber a Smellie, 2008).

Způsob řešení

Součástí řešení bude optimalizace metodiky způsobů odběru (průkaznější porovnání laboratorních výsledků a in-situ odběrů), výběr geologicky vhodných stanovišť (neporušená hornina, mikropukliny, zlomové pásmo) v různých úrovních a odebrání dostatečného množství reprezentativního množství vody tak, aby bylo možné provedení kompletní chemické a izotopické analýzy.

6 Plán experimentů pokročilé fáze provozu PVP Bukov

6.1 Experimentální ověření českého konceptu inženýrských bariér a ostatních komponent

V rámci projektu Výplně bude navrženo technické řešení bufferu (výplně ukládacích vrtů), backfillu (výplně chodeb), zátek a ostatních výplní v HÚ. Dokončení návrhu technických řešení se předpokládá na začátek roku 2025.

6.1.1 Buffer a backfill

Vazba na program HÚ

V souvislosti s vývojem inženýrských bariér je hlavním cílem po roce 2025 ověřit proveditelnost a funkčnost navrženého ukládacího konceptu, který bude výstupem projektů VaV SÚRAO za období 2020-2025, především programu Výplně.

Cíle

- Experimentální ověření proveditelnosti, funkčnosti a ceny navrženého konceptu bufferu a backfillu v podobě fyzikálních modelů umístěných v horninovém prostředí.
- Snížení nejistot v predikci chování bentonitových bariér v podmínkách HÚ.

Způsob řešení

Program obnáší výstavbu fyzikálních modelů bufferu a backfillu, ideálně v měřítku 1:1. Fyzikální modely budou obsahovat instrumentaci pro monitorování požadovaných parametrů, která bude navržena a umístěna tak, aby neovlivnila integritu bariér a tím nezneškodila celý experiment. Bariéry ve fyzikálních modelech nebudou uměle syceny, a proto budou fyzikální modely v podzemní laboratoři umístěny tak, aby hydraulické poměry v horninovém masivu byly co nejbližší HÚ.

Konkrétní technické řešení experimentů bude popsáno v rámci projektu Výplně (Oblast 1, dílčí úkol: Příprava plánu dalších experimentů). Předpokládaný termín je konec roku 2024.

Tyto rozsáhlejší experimenty mohou být v případě potřeby doplněny o dodatečné experimenty menšího měřítko zaměřené vždy na určité konkrétní chování bentonitu v podmínkách blízkých HÚ. Tyto dílčí experimenty budou řešit například problematiku teplotního zatěžování a interakce bentonitu s horninou nebo betonem.

6.1.2 Zátky a výplně ostatních podzemních prostor

Vazba na program HÚ

V souvislosti s vývojem konceptu HÚ je jedním z cílů po roce 2025 ověřit proveditelnost a funkčnost všech komponent HÚ. Kromě inženýrských bariér bude ukládací systém doplněn o další komponenty jako jsou zátky a výplně ostatních podzemních prostor. Tato problematika byla prozatím v ČR řešena jen okrajově, a proto je nejprve nutné zhodnotit všechny přístupy a navrhnout konkrétní experimentální program. Na základě navrženého konceptu, který bude

výsledkem prací VaV za období 2020-2025, především programu Výplně, budou navrženy in-situ experimenty pro ověření a demonstraci proveditelnosti navržených řešení.

Cíle

- Experimentální ověření proveditelnosti, funkčnosti a ceny navrženého konceptu zátek a výplní ostatních podzemních prostor.

Způsob řešení

Komplexní experimentální program bude vypracován v rámci programu Výplně. Předpokládaný termín dokončení přípravy programu je polovina roku 2022. Technická řešení komponent, konkrétně pak například návrh druhu materiálu a jeho formy, budou navržena také v rámci programu Výplně. Předpokládaný termín je první kvartál roku 2025. Proveditelnost a funkčnost navrženého řešení uzavírání dalších podzemních prostor bude experimentálně ověřena při in-situ experimentech.

6.1.3 Ukládací obalový soubor

Koncept ukládacího obalového souboru je řešen v rámci projektu *Výzkum a Vývoj Ukládacího obalového souboru do stadia vzorku* (Kotnour et al. 2019). Navržené materiály pro UOS budou testovány v rámci započatého in-situ korozního experimentu (viz kapitola 3.14). Na základě výsledků z tohoto pilotního in-situ testu bude v případě potřeby navržen doplňující výzkumný program.

6.2 Výzkum a vývoj konstrukčních materiálů

V souvislosti s vývojem konceptu HÚ je jedním z cílů po roce 2025 ověřit i kompatibilitu konstrukčních materiálů (např. beton, injektážní hmoty, kotvicí materiály) s ukládacím systémem. Základním požadavkem všech materiálů v HÚ je, aby nedocházelo k jejich vzájemným interakcím do takové míry, že by ohrozily své funkce. Tato problematika nebyla v ČR doposud komplexně řešena, a proto je nejprve nutné zhodnotit všechny přístupy a navrhnout experimentální program. Ten bude opět vycházet z výsledků aktivit projektu Výplně (Oblast 3, dílčí úkol: Příprava plánu výzkumu a vývoje ostatních inženýrských komponent a souvisejících technologií). Předpokládaný termín je polovina roku 2022.

V problematice betonových konstrukcí byl již v minulosti realizován projekt SÚRAO zaměřený na vývoj betonu s nižším pH (Pernicová et al. 2019). V rámci tohoto projektu byla vyvinuta receptura na litý beton. První část projektu 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, aby byla ověřena stabilita jejich mechanických vlastností při vystavení podmínkám v podzemí (vysoká vlhkost). Druhým úkolem byl pilotní test nástřiku navržené směsi, jejíž receptura byla upravena právě pro aplikaci nástřikem. Pilotní test proběhl s přijatelným výsledkem. Navrženou směs je ale dále nutné upravit tak, aby vyhovovala požadavkům na konstrukční beton v podzemních stavbách. To bude předmětem dalšího projektu této oblasti. 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.

6.2.1 Vývoj a testování stříkaného betonu s nízkým pH

Vazba na program HÚ

Viz úvod kapitoly 6.2.

Cíle

- Ověření dlouhodobé stability nově vyvinutého betonu se sníženým pH.

Způsob řešení

V první fázi bude zhodnocena 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.

6.3 Demonstrační experiment (prototypové úložiště)

Vazba na program HÚ

Celý program českého HÚ je založen na včasné přípravě vlastního technického řešení a jeho otestování v realistických podmínkách v odpovídající 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 a funkčnosti připravovaného konceptu HÚ.

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 příprava zvláštní zkušební komory v komplexu II. Etapy PVP Bukov. Experiment bude obnášet přípravu většího počtu ukládacích vrtů se vzájemnými vzdálenostmi odpovídajícími HÚ. Do ukládacích vrtů budou uloženy modely UOS a bentonitová výplň (buffer). Ukládací zkušební komora bude zatěsněna výplňovým materiálem (backfill) a komora bude uzavřena zátkou. Experiment bude obsahovat instrumentaci pro monitorování chování jednotlivých inženýrských komponent a hostitelské horniny.

6.4 Výzkum a vývoj metod pro charakterizaci poškozené a ovlivněné zóny horniny

Vazba na program 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. Především oblast EDZ je důležitá, protože může mít až o jeden až tři řády vyšší propustnost než nepoškozený horninový masiv.

Tato problematika je na PVP Bukov průběžně řešena a byla k ní získána relevantní data. Jednalo se především o projekt EDZ (kap. 3.2) a projekty zabývající se geofyzikálními metodami (kap. 3.7 a 3.9). 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. 3.13), 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. 3.13).
- Zhodnocení a návrh metod pro charakterizaci poškozené a ovlivněné oblasti hornin při různých fázích výstavby a provozu HÚ.

Způsob řešení

Tento program obsahuje 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.

6.5 Výzkum a vývoj metod pro určení napětí v horninovém masivu

Vazba na program 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.

Cíle

- Zhodnocení a návrh způsobu monitoringu napětí v prostředí HÚ v různých fázích výstavby a provozu.

- Demontrace a otestování navržených metod v PVP Bukov.
- Získání dat pro vývoj DFN modelů s využitím geomechanických parametrů.

Způsob řešení

V PVP Bukov bylo v minulosti použito několik různých metod pro získání dat pro určení tenzoru napjatosti. V rámci projektů Charakterizace I (kap. 3.1), EDZ (kap. 3.2) a Hluboké horizonty (kap. 3.4) 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 program se bude soustředit na zhodnocení stávajících metod určování in-situ napjatosti ve vztahu k projektu českého HÚ. Bude navržen způsob měření a vyhodnocení napjatosti při výstavbě a provozu HÚ. Navržené metody a postupy budou otestovány a demonstrovány na PVP Bukov.

7 Závěr

Tento plán výzkumu, vývoje a demonstračních aktivit obsahuje základní popis plánovaných činností pro PVP Bukov s jejich rozdělením na experimenty pro následující roky a na činnosti pokročilé fáze (přibližně po roce 2025). Úroveň podrobnosti popisu aktivit odpovídá aktuálnímu stavu připravenosti programu HÚ. Tento dokument bude v budoucnu aktualizován dle potřeb vždy 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 v doporučeních obsažených v externích studiích, pokud budou zhodnoceny jako potřebné.

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.
- ANDRESEN, C.A., HANSEN, A., LE GOC, R., DAVY, P., HOPE, S.M. (2013): Topology of fracture networks. *Front. Phys.* 1, 1–5.
- AALTONEN I., HAGROS A., PIRJO H. (2020): Experience from other URF projects and recommendations for Bukov URF Phase II. – MS SÚRAO, TZ 534/2020, Praha.
- AUGUSTA J., SLOVÁK J., SMUTEK J., VONDRONIC 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., BELOV T., JIRKŮ J. (2020): Průběžná zpráva o poznatcích z geofyzikálních měření na PVP Bukov – Etapa 2. – MS SÚRAO, TZ 527/2020, 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.
- BUKOVSKÁ Z., VERNER K., BRÁZDA L., BURIÁNEK D., DOBEŠ P., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ B., ERBAN V., FRANĚK J., HALODOVÁ P., HANÁK J., HAVLOVÁ V., HOLEČEK J., JAČKOVÁ I., JELÉNEK J., KAŠPAR V., KOLOMÁ K., KOPAČKOVÁ V., KOUCKÁ L., 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. – MS SÚRAO, TZ 191/2017, 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. - MS SÚRAO, TZ 464/2020, 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. – MS SÚRAO, TZ 372/2019, Praha.
- GHAFFARI, H.O., NASSERI, M.H.B., YOUNG, R.P. (2011): Fluid flow complexity in fracture networks: analysis with graph theory and LBM. arXiv:1107.4918

- GVOŽDÍK L., KABELE P., ŘÍHA J., ŠVAGERA O., TRPKOŠOVÁ D., VETEŠNÍK A. (2020): Transport radionuklidů z hlubinného úložiště – Testování koncepčních a výpočetních modelů. – MS SÚRAO, TZ 463/2020, Praha
- HAGROS, A., MCEWEN, T., ANTTILA, P. & ÄIKÄS, K. (2005): Host Rock Classification Phase 3: Proposed Classification System (HRC-System). Working Report 2005-07, Posiva Oy, Eurajoki, Finland. 180 p.
- HAUSMANNOVÁ L., HANUSOVÁ I., DOHNÁLKOVÁ M. (2018): Shrnutí výzkumu českých bentonitů pro hlubinné úložiště – do roku 2018. - MS SÚRAO, TZ 309/2018, Praha.
- HAVLOVÁ V. et al. (2015): Příprava experimentů v PVP Bukov. – MS SÚRAO, TZ 06/2015, Praha.
- HAVLOVÁ V., DOBREV D., VEČERNÍK P., ZUNA M., RUKAVIČKOVÁ L., FRANĚK J., VERNER K., STAŠ L., ČERNÍK M., MILICKÝ M. (2017): Plán experimentů PVP Bukov pro podporu bezpečnostního rozboru lokality Kraví Hora. – MS SÚRAO, TZ 121/2017, Praha.
- HAVLOVÁ V., HOFMANOVÁ E., KOLOMÁ K., TRPKOŠOVÁ D. (2018): Realizace a vyhodnocení LTD III. Experimentu Grimsel Test Site, MS SÚRAO TZ 345/2018, Praha.
- HOKR M. ET AL. (2020): Testování transportních modelů s využitím in-situ zahraničních experimentů. - MS SÚRAO, TZ 481/2020, Liberec.
- KABELE P., ŠVAGERA O., SOMR M., NEŽERKA V., ZEMAN J. (2018). Mathematical modeling of brittle fractures in rock mass by means of the DFN method. Final report. – MS SÚRAO, TZ 286/2018, Praha.
- KOTNOUR P., DOBREV D., GONDOLLI J., KÁRNÍK D., KOUŘIL M., STOULIL J., MATOUŠEK J., LOVECKÝ M., ŠIK J., MACÁK P., PECHMANOVÁ E., KŘÍŽOVSKÝ M., MALINA J., MATAL O., ŽALOUDEK J., VÁVRA M., ČERMÁK J., KRÁL L. (2019): Výzkum a vývoj ukládacího obalového souboru pro hlubinné ukládání vyhořelého jaderného paliva do stádia realizace vzorku 3. etapa. - MS SÚRAO, TZ 411/2019, Praha.
- KUMPULAINEN S., KARVONEN T., KOHO P. (2018): R&D plan for the Engineered Barrier System in the Czech DGR. - MS SÚRAO, TZ 416/2019-ENG, Praha.
- LICHTNER, P.C., KARRA, S. (2014): Modelling Multiscale-Multiphase-Multicomponent Reactive Flows in Porous Media: Application to CO₂ Sequestration and Enhanced Geothermal Energy using PFLOTTRAN, Chap. 3 in Computational Models for CO₂ Geo-sequestration and Compressed Air Energy Storage by Al-Khoury. R. and Bundschuh, J. (ed.), CRC Press, 31 p., 2014.
- 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 HR. SKB report P-17-30. Dostupný z: <https://www.skb.se/publikation/2495657/P-17-30.pdf>.
- PERNICOVÁ R., KOLÍSKO J., DOBIÁŠ D., ČÍTEK D., MANDLÍK T. (2019): Souhrnná zpráva 3. etapy k problematice betonu s nízkým pH určeným do prostředí úložiště radioaktivního odpadu. - MS SÚRAO, TZ 405/2019, Praha.

- POSPÍŠKOVÁ I., VOKÁL A., VONDROVIC L., DUSÍLEK P., DVOŘÁKOVÁ M., HANUSOVÁ I., KOVÁČIK M., VENC L., VOKÁL A., WOLLER F. (2015): Střednědobý plán výzkumu a vývoje pro potřeby umístění hlubinného úložiště v ČT 2015 – 2025. - MS SÚRAO, TZ 1/2015, Praha.
- POSPÍŠKOVÁ I., ZEMAN J., KUCHOVSKÝ T., LEICHMANN J., MELICHAR R., ŘÍČKA A., KRÁSNÝ O., ŽÁČEK M., ŠOUREK J., ČERNÝ M. (2020a): Posouzení využitelnosti dat z RD&D programu v PVP Bukov. MS SÚRAO, TZ 488/2020, Praha.
- POSPÍŠKOVÁ I., ZEMAN J., VOZÁR M., KRÁSNÝ O., ŠOUREK J., KUCHOVSKÝ T., LEICHMANN J., MELICHAR R., ŘÍČKA A., NOHEJL J., OUBRAM J., ŽÁČEK M., ČERNÝ M., PTICEN F. (2020b): Posouzení experimentálního plánu PVP Bukov a odhad nákladů na jeho realizaci. MS SÚRAO, TZ 494/2020, Praha.
- POSPÍŠKOVÁ I., ZEMAN J., ŽÁČEK M., KUCHOVSKÝ T., LEICHMANN J., MELICHAR R., ŘÍČKA A., KRÁSNÝ O., ŠOUREK J., VOZÁR M., OUBRAMOVÁ L., ČERNÝ M. (2020c): Technické a ekonomické zhodnocení potenciálu PVP Bukov. MS SÚRAO, TZ 496/2020, Praha.
- POSPÍŠKOVÁ I., VOZÁR M., ZEMAN J., KRÁSNÝ O., ŽÁČEK M., NOHEJL J., OUBRAM J., KUCHOVSKÝ T., LEICHMANN J., MELICHAR R., ŘÍČKA A., ŠOUREK J., ČERNÝ M. (2020d): SWOT analýza a CBA analýza PVP Bukov. MS SÚRAO, TZ 501/2020, Praha.
- POSPÍŠKOVÁ I., ZEMAN J., ŽÁČEK M., KRÁSNÝ O., KUCHOVSKÝ T., LEICHMANN J., MELICHAR R., ŘÍČKA A., ŠOUREK J., VOZÁR M., NOHEJL J., OUBRAM J., ČERNÝ M. (2020e): Celkové zhodnocení využití potenciálu PVP Bukov v procesu přípravy hlubinného úložiště. MS SÚRAO, TZ 502/2020, Praha.
- 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. - MS SÚRAO, TZ 221/2018, Praha.
- SPOLEČNOST „ČVUT-SATRA-MOTT MACDONALD CZ“. (2016): Studie realizace výzkumného programu PVP Bukov, část II: Technicko-ekonomická studie. – MS SÚRAO, TZ 62/2016, 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. - MS SÚRAO, TZ 351/2019, Praha.
- STEINOVÁ J., BURKARTOVÁ K., MIKEŠ J., ZUNA M., ČERNÍK M. (2019): Mikrobiální screening PVP Bukov a dolu Rožná - závěrečná zpráva projektu. - MS SÚRAO, TZ 382/2019, Praha.

- STEMBERK J., BRIESTENSKÝ M., HARTVICH F., FUČÍK Z. (2020): Monitoring aktivity křehkých struktur PVP Bukov a dolu Rožná – průběžný monitoring a vyhodnocení 2. – MS SÚRAO, TZ 526/2020, Praha.
- SVOBODA J., BUTOVIČ A., ZAHRADNÍK O., HAVLOVÁ V. et al. (2019): Aktualizace plánu experimentů v PVP Bukov. – MS SÚRAO, TZ 397/2019, Praha.
- SVOBODA J., VAŠIČEK R., RUKAVIČKOVÁ L., ŘIHOŠEK J., VEČERNÍK P. (2021): Interakční experiment – Průběžná zpráva etap 7-9 č. 3. - MS SÚRAO, TZ 537/2021, Praha.
- VOKÁL A., VONDROVIC L., HAUSMANNOVÁ L., DOHNÁLKOVÁ M., HANUSOVÁ I., AUGUSTA J., KONOPÁČOVÁ K., URÍK J., KOVÁČIK M., VENCL M., POPELOVÁ E., LAHODOVÁ Z., MIKLÁŠ O., MÁČELOVÁ M., SUD J. (2020): Střednědobý plán výzkumu a vývoje SÚRAO pro období 2020-2030. – MS SÚRAO, TZ 525/2020, Praha.
- VONDROVIC L., POSPÍŠKOVÁ I., AUGUSTA J., et al. (2016): Studie realizace výzkumného programu PVP Bukov, část I: Technická rozvaha. – MS SÚRAO, Interní technická zpráva, Praha.
- VYLAHOVÁ P., KOČMAN T., MUSIL R., PRŮCHA P., VYLAHOVÁ P. (2020): Hydrogeologický a hydrochemický monitoring podzemních a důlních vod v prostoru PVP Bukov, etapová zpráva za rok 2019. - MS SÚRAO, TZ 487/2020, Praha.
- WABER H.N., SMELLIE J.A.T. (2008): CHARACTERISATION OF PORE WATER IN CRYSTALLINE ROCKS. APPLIED GEOCHEMISTRY 23, 1834-1861.
- ZUNA M., HAVLOVÁ V., JANKOVSKÝ F., ŠVAGERA O., KRYL J., ZELINKOVÁ T., HOLEČEK J., SOSNA K., KOŘALKA S., GVOŽDÍK L. (2020): Výzkum puklinové konektivity v PVP Bukov - Průběžná zpráva č. 2. – MS SÚRAO, TZ 521/2020, Praha.



SÚRAO

SPRÁVA ÚLOŽIŠŤ
RADIOAKTIVNÍCH
ODPADŮ

NAŠE
BEZPEČNÁ
BUDOUCNOST

info@suraao.cz | www.suraao.cz