

PVP Bukov – výzkumné pracoviště pro demonstraci bezpečnosti a proveditelnosti úložného systému hlubinného úložiště

Jan Smutek, Jiří Slovák, Lukáš Vondrovic, Jaromír Augusta – Správa úložišť radioaktivních odpadů, smutek@surao.cz

Souhrn

Podzemní Výzkumné Pracoviště (PVP) Bukov slouží Správě úložišť radioaktivních odpadů pro RD&D aktivity spojené s přípravou hlubinného úložiště vyhořelého jaderného paliva a radioaktivních odpadů. Pracoviště se nachází v hloubce 550 m pod povrchem a využívá infrastrukturu bývalého uranového dolu Rožná I. Probíhající výzkumné projekty jsou zaměřeny na získání dat pro hodnocení bezpečnosti a demonstraci technické proveditelnosti hlubinného úložiště. Tento příspěvek shrnuje aktuální činnosti v podzemní laboratoři.

Klíčová slova: PVP Bukov, podzemní laboratoř, hlubinné úložiště, HÚ

Úvod

Správa úložišť radioaktivních odpadů (SÚRAO) jako organizační složka státu zajišťuje nakládání s radioaktivními odpady. V rámci těchto činností pracuje i na projektu hlubinného úložiště (HÚ) vyhořelého jaderného paliva a radioaktivních odpadů, jehož zahájení provozu je v plánu na rok 2065. Výběr lokality pro umístění HÚ probíhá ve fázích postupného zužování počtu a plošného rozsahu potencionálních lokalit dle jejich vhodnosti (SÚRAO, 2014). Vhodnost lokality se prokazuje studiemi proveditelnosti, bezpečnostními studiemi potvrzujícími provozní a dlouhodobou bezpečnost a studiemi dopadu umístění HÚ na životní prostředí.

Pro zhodnocení dlouhodobé bezpečnosti a technické proveditelnosti HÚ je třeba získávat velké množství dat, informací a argumentů (Pospíšková et al., 2015). Jedná se např. o popis kandidátních lokalit a tvorbu 3D modelů (geologických, hydrogeologických a transportních), získání dat potřebných pro predikci chování inženýrských bariér úložiště nebo pro predikci potencionálního transportu radionuklidů v horninovém prostředí. Pro prediktivní matematické modely jsou nedostačující data získaná z povrchových geologických průzkumů a laboratorních experimentů a pro jejich validaci je třeba použít data získaná z in-situ experimentů provedených v odpovídajícím prostředí budoucího hlubinného úložiště.

In-situ experimenty je možno provádět v podzemních laboratořích, které se ve světě provozují pro potřeby RD&D aktivit spojených s přípravami hlubinných úložišť (OECD/NEA, 2013). SÚRAO se zúčastňuje některých mezinárodních experimentů v podzemních laboratořích Grimsel Test Site ve Švýcarsku (NAGRA, 2018a) nebo Äspö HRL ve Švédsku (SKB, 2018). Zapojení SÚRAO do těchto experimentů (NAGRA, 2018b,c) je velmi přínosné a vede k hlubšímu porozumění procesům probíhajících v prostředí úložiště, ale neumožňuje přímo ověřovat výsledky vlastních laboratorních experimentů a výsledky modelování chování inženýrských bariér a horninových prostředí specifických pro ČR.

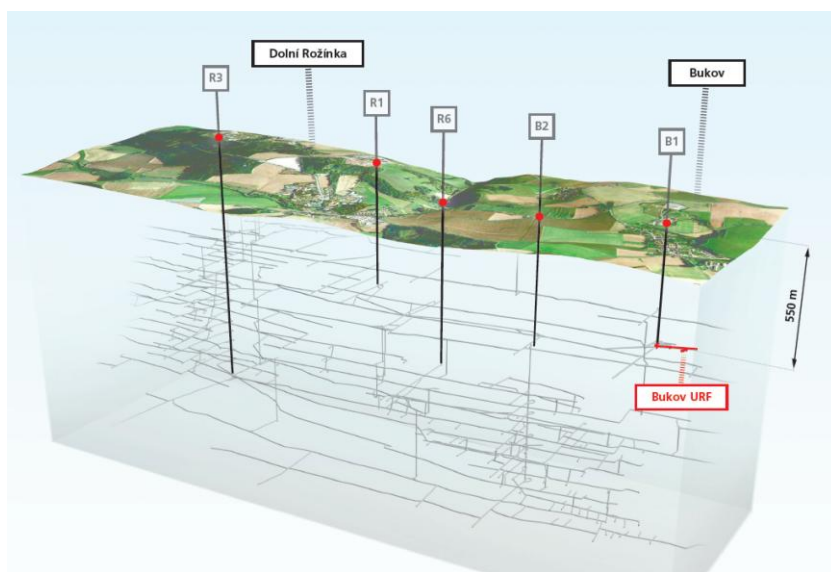
Velmi přínosné jsou z tohoto pohledu výsledky z podzemní laboratoře Josef (CEG, 2018) nebo tunelu Bedřichov (SÚRAO, 2018). V obou případech se jedná o generické typy laboratoří (OECD/NEA, 2013), které SÚRAO využívá pro výzkumné aktivity. Tyto laboratoře se sice nacházejí v typově odpovídajících horninách plánovanému HÚ (krystalinické horniny), ale jejich problémem je ovlivnění horninového prostředí přípovrchovou zónou. Tunel Bedřichov se nachází v hloubce cca 150 m pod povrchem a experimenty v podzemní laboratoři Josef jsou umístěny do hloubky okolo 100 m. Z těchto důvodů SÚRAO v roce 2017 otevřela Podzemní Výzkumné Pracoviště (PVP) Bukov, které se nachází v krystalinických horninách v hloubce cca 550 m pod povrchem a slouží tedy pro získávání dat z hloubek odpovídajících hlubinnému úložišti.

Tento příspěvek obsahuje základní informace o projektu PVP Bukov, technickém řešení podzemní laboratoře a shrnuje aktuální výzkumné činnosti v podzemních prostorách.

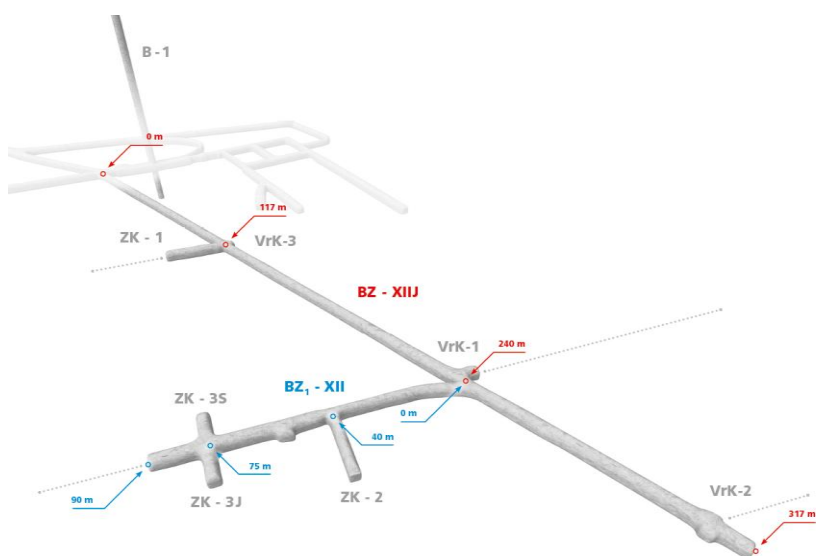
Projekt výstavby a charakterizace podzemní laboratoře

PVP Bukov se nachází v katastru obce Bukov na Moravě (okres Žďár nad Sázavou). Zařízení bylo vystavěno v prostorách navazujících na uranový důl Rožná I. Tato lokalita byla nejstarším operujícím uranovým dolem v Evropě; těžba rudy zde skončila v březnu roku 2017. Propojení podzemní laboratoře s prostorami uranového dolu umožnilo výraznou úsporu investičních nákladů díky využití stávajících úvodních důlních děl a jejich infrastruktury.

PVP Bukov je situováno v úrovni 12. patra v hloubce cca 550 m pod povrchem a pro přístup a obsluhu je používána jáma B-1 (Obr. 1). Podzemní dílo (Obr. 2) se skládá z přístupového překopu BZ-XIIJ, tří vrtných komor (VrK), laboratorního překopu (BZ₁-XII), a čtyř zkušebních komor pro in-situ experimenty (ZK). Celková délka výzkumných prostor je 485 m. Horninové prostředí PVP Bukov je tvořeno metamorfovaným vulkanosedimentárním komplexem, konkrétně amfibol-biotitickými migmatity až amfibolity (Bukovská et al., 2017). Při výstavbě laboratorních prostor byla použita metoda obrysových trhacích prací (hladký výlom), která umožnila razit dílo ve vysoké kvalitě bez použití výztuže.



Obr. 1 – Schéma umístění PVP Bukov v rámci podzemních prostor dolu Rožná



Obr. 2 – Schéma podzemních prostor PVP Bukov

Projekt podzemní laboratoře byl rozdělen do tří fází (Výstavba, Charakterizace, Experimentální fáze). V rámci první fáze projektu podzemní laboratoře proběhl výběr vhodného horninového bloku v oblasti dolu Rožná a ražba vlastních prostor. Stavba byla zahájena v roce 2013 a dílo oficiálně uvedeno do provozu v roce 2017.

Souběžně s výstavbou probíhala i tzv. fáze charakterizace. Jednalo se o tříletý projekt (2015-2017), jehož cílem bylo multidisciplinární zhodnocení horninového prostředí v prostoru samotného PVP Bukov a v jeho širším okolí (vč. povrchu; Bukovská et al., 2017; Souček et al., 2018). Práce byly realizovány celkem čtyřmi institucemi (Česká geologická služba; Ústav Geoniky AV ČR v.v.i.; ÚJV Řež, a. s.; SG Geotechnika, a.s.) a zahrnovaly komplexní geologickou, petrologickou a petrofyzikální charakteristiku hornin, stanovení základních hydrogeologických parametrů podzemních vod, spektrální analýzu vrtných jader, seismický monitoring, stanovení transportních charakteristik hornin nebo také analýzu geomechanických a geotechnických parametrů horninového masivu.

Realizace těchto prací již v průběhu výstavby je důležitá z toho důvodu, že některá data je možné získat pouze krátce po vytvoření otevřených podzemních prostor. Příkladem je monitoring změn napětí v horninovém masivu. Část prací se soustředila na získání informací o napětovém stavu a deformačním chování pomocí in-situ měření (Souček et al., 2017). Měření napětového stavu bylo realizováno pomocí hydraulického štěpení stěn vrtu a monitorování dlouhodobých změn napjatosti v průběhu výstavby bylo prováděno pomocí kuželových tenzometrických sond (metody CCBO a CCBM; Waclawik et al., 2016). Dále bylo v testovacích vrtech provedeno měření přetvárných vlastností metodou Goodman Jack a na sérii čtyř měřících stanic byla v průběhu výstavby prováděna opakovaná konvergenční a tenzometrická měření v instalovaných měřících svornících (Souček et al., 2018).

Výzkumné práce poskytly ucelený soubor poznatků nezbytných pro plánovanou realizaci experimentů zaměřených na dlouhodobou bezpečnost a technickou proveditelnost budoucího HÚ. V roce 2017 byla pak zahájena experimentální fáze, která by měla probíhat až do doby výstavby konfirmační laboratoře ve finální lokalitě pro výstavbu HÚ (Pospíšková et al., 2015).

Experimentální program

V návaznosti na zjištěný stav horninového prostředí byl definován experimentální program, který zohledňuje výzkumné potřeby SURAO a možnosti horninového prostředí PVP Bukov. Obsah programu byl rozčleněn do celkem sedmi oblastí, v rámci kterých probíhají a budou probíhat výzkumné projekty.

První oblast se týká vývoje metod charakterizace horninového masivu. Důl Rožná poskytuje unikátní možnost získání dat z různých hloubkových úrovní, a to až do hloubek 1200 m. V rámci této oblasti jsou získávána data z geologických průzkumů na povrchové lokalitě a různých pater dolu Rožná, která jsou vzájemně propojována a slouží ke konstrukci 3D geologických, hydrogeologických a geomechanických modelů celé lokality.

Druhá oblast je zaměřena na dlouhodobý monitoring procesů, které budou probíhat v prostředí HÚ. Přínosem těchto měření bude odhad rozsahu zkoumaných parametrů, které budou důležité pro popis lokality hlubinného úložiště a hodnocení její dlouhodobé stability. Jedná se například o hydrogeologický monitoring, který poskytuje data o vlastnostech a chování podzemní vody jakožto nejvýznamnějšího transportního média v HÚ. Dále jsou vyvíjeny a testovány metody seismického monitoringu nebo metody měření aktivit zlomových struktur. Důležitá jsou také data o mikrobiologickém osidlování horninového prostředí, jelikož přítomnost mikroorganismů ovlivňuje rychlost degradace materiálů inženýrských bariér.

Velmi důležité je testování modelů proudění podzemní vody a přidruženého transportu radionuklidů v puklinovém prostředí. Náplní prací v této oblasti je testování a ověřování matematických modelů migrace radionuklidů v reálném prostředí HÚ. Plánované kampaně hydraulických testů ve vrtech s použitím stopovačů přinesou data nezbytná pro vývoj a kalibraci modelů. PVP Bukov poskytuje prostředí, kde budou testovány a vyvíjeny moderní metody popisu puklinového prostředí krystalinických hornin.

Další oblast je zaměřena na výzkum materiálů inženýrských bariér v HÚ. Předmětem prací bude sledování vlivu reálných podmínek horninového masivu na materiály bariér, které izolují uložený odpad od horninového prostředí. Experimenty budou sledovat například rychlost koroze materiálů ukládacího kontejneru nebo změny vlastností jílových těsnících bariér.

Jiný okruh prací bude zaměřen na testování vzniku a vývoje ovlivněné resp. porušené zóny v horninovém masivu v okolí podzemních děl (EdZ resp. EDZ; Perras a Diederichs, 2016). Vznik oblasti ovlivnění a narušení v důsledku ražby je nevyhnutelný proces a rozsah a intenzita ovlivnění jsou závislé

na použité metodě razících prací. Popis rozsahu a vlastností této zóny je důležitý pro hodnocení bezpečnosti HÚ, protože tato oblast je charakteristická zvýšenou hydraulickou vodivostí a může tak výrazně ovlivňovat potencionální transport radionuklidů z HÚ.

Při výstavbě HÚ bude nutné použít některé technologické postupy ne zcela běžné při komerčních razbách podzemních děl. Cílem další oblasti bude tedy odvodit a optimalizovat příslušné metodiky speciálních vrtných nebo razících prací. Součástí bude i dlouhodobý monitoring stability a chování těchto děl.

Poslední oblast zahrnuje demonstrační experimenty. Tyto experimenty budou realizovány v poslední fázi výzkumného programu. Jejich cílem je v reálném měřítku a podmínkách testovat jednotlivé komponenty ukládacího systému a speciální manipulační prostředky.

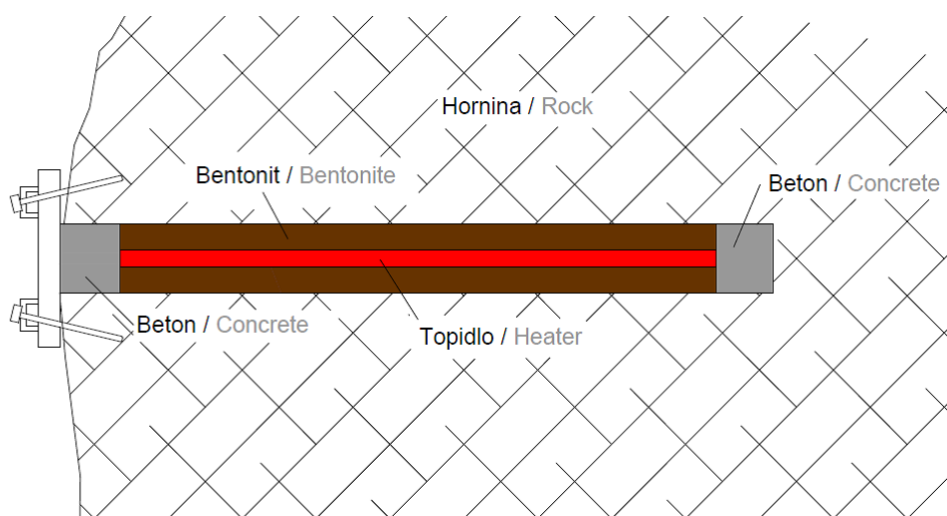
Následně jsou v příspěvku uvedeny aktuálně běžící výzkumné projekty.

Interakční fyzikální modely in-situ v PVP Bukov

Pro potřeby návrhu inženýrských bariér hlubinného úložiště je nutné rozumět interakcím mezi jednotlivými materiály v podmínkách reálného horninového prostředí. Pro výzkum interakcí byl navržen projekt zahrnující realizaci experimentálních fyzikálních modelů simulujících ukládací obalový soubor umístěný v hlubinném úložišti. Tento pětiletý projekt (2017-2021) je realizován Centrem experimentální geotechniky (Fakulta stavební, ČVUT v Praze) ve spolupráci s Českou geologickou službou a ÚJV Řež. Účelem navržených prací je ověřit chování bentonitové těsnicí vrstvy ovlivněné přítomností podzemní vody v interakci s cementovými materiály a zároveň zatížené zvýšenou teplotou.

Každý jednotlivý model umístěný do vrtu v hornině bude simulovat samostatný ukládací systém s použitím různých druhů a forem materiálů a různým teplotním zatížením (Obr. 3). Pro konstrukci bentonitových vrstev bude použit český Ca/Mg bentonit z ložiska Černý vrch. Bentonit bude ve formě lisovaných tvárnic nebo se bude jednat o granulovaný bentonit (pelety) o různých objemových hmotnostech. Pro studium interakcí budou do vrtů umístěny prvky s betonem o běžném pH a betonem se sníženým pH. Část experimentů bude určena pro sledování interakcí za přirozené teploty a ve zbývajících modelech budou zkoumány interakce za zvýšených teplot, a to až do 200°C. Jednotlivé experimenty budou instrumentovány senzory pro sledování vývoje nasycení bentonitové bariéry vodou a šíření tepla.

Náplní tohoto projektu je návrh, konstrukce a provozování fyzikálních modelů. Po skončení tohoto projektu bude následovat fáze „dismantlingu“, kdy budou modely rozebrány a provedeny analýzy odebraných vzorků materiálů pro vyhodnocení sledovaných interakcí. Výsledkem experimentů bude detailní popis chemických a mineralogických procesů vznikajících na základě interakcí mezi materiály (bentonit, beton, hornina).



Obr. 3 – Zjednodušené ilustrační schéma fyzikálního modelu bez instrumentace

Hydrogeologický a hydrochemický monitoring podzemních vod

V lednu 2018 byl zahájen projekt hydrogeologického a hydrochemického monitoringu podzemních a důlních vod. Dodavatelem prací tohoto pětiletého projektu je firma GEOtest. Cílem projektu je studium vývoje hydrogeologických poměrů v horninovém prostředí PVP Bukov a v jeho okolí, které zahrnuje určení geneze, původu vod a stanovení jejich hydrochemického charakteru.

Mimo prostor PVP Bukov nacházejících se na 12. patře, budou pro potřeby výzkumných projektů využity i jiné části dolu Rožná I, a to až po 24. patro (hloubka 1200 m). Proto budou některé práce v rámci popisovaného projektu provedeny i v jiných hloubkových úrovních. Data získaná v podzemí budou doplněna o údaje získané z povrchového režimního měření.

Tyto práce plynule navazují na činnosti provedené v rámci etapy Charakterizace (Bukovská et al., 2017). Práce v tomto projektu zahrnují revizi stávající monitorovací sítě (Obr. 4) přítoků podzemních vod do prostoru PVP Bukov, která byla vytvořena v minulosti. Dále budou instalovány nové pozorovací body a zajištěn dlouhodobý monitoring všech přítoků v prostoru PVP Bukov, jiných částech dolu Rožná a na povrchu v přilehlém okolí PVP Bukov. Výběr měřících bodů na povrchu by měl postihnout zejména hlubší oběh podzemních vod na lokalitě.

V rámci projektu budou vytvořeny i testovací jádrové vrty pro provedení hydrodynamických zkoušek pro získání hydraulických parametrů horninového masivu. Veškeré činnosti budou směřovat k pochopení zákonitostí proudění podzemních vod v celé oblasti a bude určeno vzájemné ovlivnění a vývoj chemismu vod se vzrůstající hloubkou.



Obr. 4 – Měření odtoku důlních vod z PVP Bukov

Mikrobiologický screening

Jeden z důležitých požadavků na inženýrské bariéry HÚ a jejich materiálové složení je jejich životnost, která může být ovlivněna i přítomností mikroorganismů vyvíjejících se v důsledku lidských aktivit. Pro posouzení postupné kolonizace či naopak úbytku mikrobiálního osídlení je nutné sledovat jeho dlouhodobý vývoj. Vedle dlouhodobého trendu, který je možné pozorovat jen několikaletým sledováním, mohou na tento vývoj mít patrný vliv sezonní fluktuace. Výkyvy teplot nebo chemického složení a režimu vod se mohou projevit změnou mikrobiálního osídlení.

Pro popis mikrobiálního osídlení horninového prostředí PVP Bukov a dolu Rožná byl navržen jednoletý projekt. Dodavatelem prací je Technická univerzita v Liberci. Cílem projektu je získat vstupní data pro řadu návazných experimentů zaměřených na studium odolnosti inženýrských bariér. Na PVP Bukov a v jiných částech dolu Rožná bude provedena podrobná mikrobiologická rekognoskace dostupných zdrojů podzemní vody a biofilmů získaných z povrchu chodeb. Mikrobiologický rozbor vod se zaměří na odběr vzorků z již existujících výronů vod. Mimo klasického odběru vzorků budou na vhodných místech instalovány pasivní vzorkovače (Obr. 5), které eliminují antropogenní ovlivnění odběrového místa a umožní zachytit nativní druhové spektrum anaerobních podzemních vod.

Na základě výsledků této screeningové fáze, bude případně navržen navazující víceletý projekt dlouhodobého monitoringu vývoje mikrobiologického osídlení.



Obr. 5 – Instalace vzorkovače na výstup z průzkumného vrtu

Hluboké horizonty

Cílem tříletého projektu (2017-2019) s názvem *Získání dat z hlubokých horizontů dolu Rožná* (zkráceně *Hluboké horizonty*) je získání informací o prostorové distribuci geologických a geotechnických vlastností horninového prostředí v různých hloubkových úrovních dolu Rožná a porovnání těchto vlastností s přípovrchovými vzorky. Dodavatelem prací je konsorcium společností pod vedením České geologické služby.

Práce zahrnují posouzení a reinterpretaci dosavadních archivních znalostí o geologických a tektonických vlastnostech lokality včetně cílené geologické dokumentace vybraných částí dolu, a dále charakterizaci vybraných struktur, které mohou být z hlediska bezpečnosti hlubinného úložiště kritické. Pro získání dat budou opět využita i stanoviště v různých patrech dolu. Získané informace rozšíří existující znalostní databázi a vědecký potenciál lokality PVP Bukov, a umožní věrohodněji interpretovat hloubkový vývoj geologických parametrů krystalinických hornin českého masivu.

Závěr

PVP Bukov je typ generické laboratoře, která slouží pro provádění RD&D aktivit spojených s přípravou hlubinného úložiště v ČR. Na výstavbu a charakterizační fázi, která samotná poskytla velké množství důležitých informací a dat, plynule navázala experimentální fáze. Mimo aktuálně probíhajících projektů prezentovaných v tomto příspěvku, jsou připravovány záměry na nové výzkumné projekty, které budou pokrývat definované oblasti výzkumu a vývoje.

Reference

BUKOVSKÁ, Z., et al. 2017. *Komplexní Geologická Charakterizace Prostorů PVP Bukov*. Závěrečná Technická Zpráva Číslo 191/2017. Praha: SÚRAO.

CEG, 2018. Projekty. *Centrum experimentální geotechniky* [online]. Praha: ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Centrum experimentální geotechniky, ©2014 [cit. 2018-02-09]. Dostupné z: <http://ceg.fsv.cvut.cz/vyzkum/projekty>

DIAMO, s. p. 2017. *Závěrečná zpráva o průběhu výstavby PVP Bukov*.

NAGRA, 2018a. *Grimsel Test Site: Underground Research and Development URL* [online]. Grimsel Test Site (Switzerland): NAGRA, ©2018 [cit. 2018-02-09]. Dostupné z: <http://www.grimsel.com/>

NAGRA, 2018b. Large Scale Monitoring (LASMO) Introduction. *Grimsel Test Site: Underground Research and Development URL* [online]. Grimsel Test Site (Switzerland): NAGRA, ©2018 [cit. 2018-02-09]. Dostupné z: <http://www.grimsel.com/gts-phase-vi/lasmo/lasmo-introduction>

NAGRA, 2018c. Long Term Diffusion (LTD) - Introduction. *Grimsel Test Site: Underground Research and Development URL* [online]. Grimsel Test Site (Switzerland): NAGRA, ©2018 [cit. 2018-02-09]. Dostupné z: <http://www.grimsel.com/gts-phase-vi/ltd/ltd-introduction>

OECD-NEA, 2013. *Underground Research Laboratories (URL)*. Dostupné z: <https://www.oecd-neo.org/rwm/reports/2013/78122-rwm-url-brochure.pdf>

PERRAS, M. A. a Mark S. DIEDERICH. 2016. Predicting excavation damage zone depths in brittle rocks. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. **8**(1), 60-74. DOI: 10.1016/j.jrmge.2015.11.004. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1674775515001407>

Pospíšková, I., et al. 2015. *Střednědobý plán výzkumu a vývoje pro umístění HÚ v ČR 2015 až 2025*. Praha: SÚRAO.

SKB, 2018. The Äspö Hard Rock Laboratory. SKB [online]. Solna: Svensk Kärnbränslehantering AB, ©2018 [cit. 2018-02-09]. Dostupné z: <http://www.skb.com/research-and-technology/laboratories/the-aspö-hard-rock-laboratory/>

SOUČEK, K., et al. 2017. Geotechnical Characterization of Bukov Underground Research Facility. *Procedia Engineering*, **191**. pp. 711-718. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.236>

SOUČEK, K., et al. 2018. *Komplexní Geologická Charakterizace Prostorů PVP Bukov - Část II*. Závěrečná zpráva. Praha: SÚRAO.

SÚRAO [SPRÁVA ÚLOŽIŠŤ RADIOAKTIVNÍCH ODPADŮ]. 2014. *Aktualizace koncepce nakládání s radioaktivními odpady a vyhořelým jaderným palivem*. Praha: Ministerstvo průmyslu a obchodu, 83 s.

SÚRAO, 2018. Tunel Bedřichov. Správa úložišť radioaktivních odpadů [online]. Praha: SÚRAO, ©2018 [cit. 2018-02-09]. Dostupné z: <https://www.surao.cz/hlubinne-uloziste/domaci-projekty/clanek-200-tunel-bedrichov>

VOKÁL, A., et al. 2017. *Požadavky, indikátory, vhodnosti a kritéria výběru lokalit pro umístění hlubinného úložiště*: Metodický pokyn MP.22. 3. vydání. Praha: SÚRAO.

VONDROVIC, L., et al. 2017. *Underground Research Facility in Highly Anisotropic Rocks, Bukov URF, Czech Republic*, International High-Level Radioactive Waste Management. pp. 390-393. Dostupné z: <http://cc.greydenpress.com/gp/CloudConferencing/CloudConferencingTemplate/Data/pdfs/12691.pdf>

WACLAWIK, P., et al. 2016. Determination of Stress State in Rock Mass using Strain Gauge Probes CCBO. *Procedia Engineering*, **149**. pp. 544-552. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.703>