

Výstavba a charakterizace Podzemního výzkumného pracoviště Bukov

Jaromír Augusta¹, Jiří Slovák¹, Jan Smutek¹, Lukáš Vondrovic¹, Petr Kříž², Pavol Magyar²

Abstrakt

Podzemní výzkumné pracoviště (PVP) Bukov bylo vybudováno jako testovací lokalita pro provádění RD&D aktivit spojených s vývojem českého hlubinného úložiště (HÚ) radioaktivního odpadu. Uspořádání podzemní laboratoře bylo navrženo tak, aby se podmínky co nejvíce blížily hloubkovému umístění budoucího HÚ. Podzemní prostory se nacházejí na 12. patře bývalého uranového dolu Rožná I v hloubce okolo 550 m. Výstavba začala v roce 2013 a pracoviště bylo uvedeno do provozu v roce 2017. Metodou hladkého výlomu použitou při výstavbě byly vytvořeny velmi kvalitní podzemní prostory. Laboratorní prostory budou využity pro výzkumné in-situ experimenty jejichž výsledky budou využitelné pro podporu návrhu HÚ.

Klíčová slova

Podzemní výzkumné pracoviště, metoda hladkého výlomu, hlubinné úložiště, HÚ

Abstract

The Bukov Underground Research Facility (URF) was constructed to provide a test site for RD&D activities concerning the development of the Czech Deep Geological Repository (DGR) for radioactive waste. The layout of the URF was designed in such a way as to correspond as closely as possible with the conditions anticipated in the future DGR. The underground areas are located on the 12th level of the recently-closed Rožná Uranium Mine at a depth of around 550 m. The construction of the facility commenced in 2013 and was completed in 2017. The smooth blasting method used for the construction of the URF resulted in the creation of very high quality underground spaces. The laboratory galleries will be used for the performance of various in-situ experiments supporting the design of the future Czech DGR.

Key words

Underground research facility, smooth blasting method, deep geological repository, DGR

1 Úvod

Česká republika – Správa úložišť radioaktivních odpadů (SÚRAO) jako organizační složka státu zajišťuje nakládání s radioaktivními odpady v působnosti ČR. V rámci těchto činností je i vybudování HÚ a jeho zprovoznění v roce 2065. Aby v procesu výběru lokality a následné projektové činnosti byla zajištěna bezpečnost při výstavbě, provozu a po uzavření HÚ, řídí SÚRAO řadu výzkumných a experimentálních prací prováděných na území ČR a participuje na evropských výzkumech a experimentech v zahraničí.

Pro potřebu hodnocení potenciálních lokalit a výběru finální lokality pro umístění HÚ je nutné experimentálně ověřit některé teoretické znalosti a zákonitosti v horninovém prostředí v interakci s inženýrskými bariérami. K tomu slouží rozsáhlé experimentální plány všech států vázaných mezinárodními předpisy a směrnicemi Mezinárodní agentury pro atomovou energii.

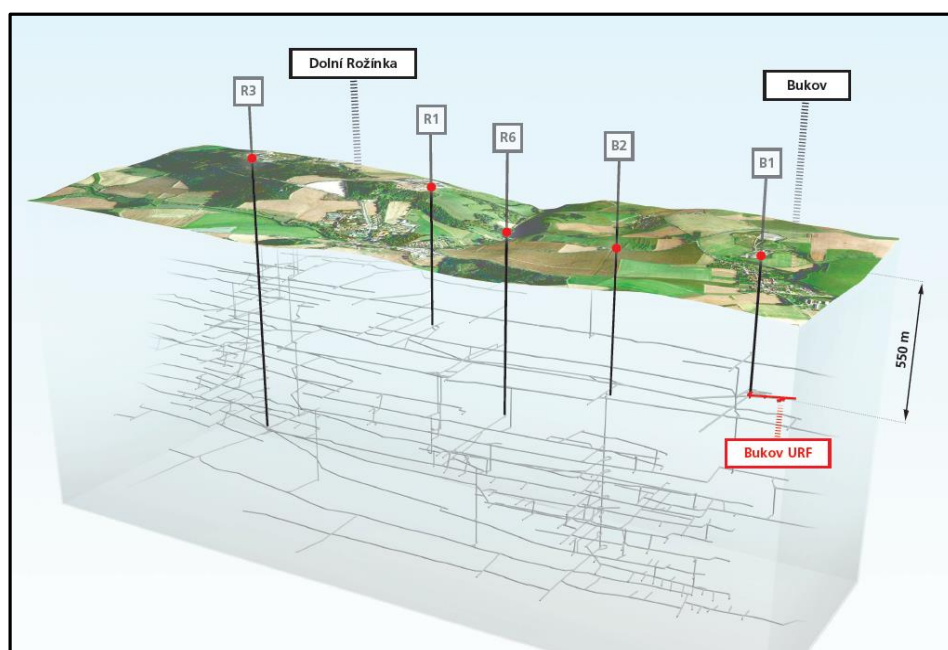
K naplnění experimentálního plánu v současné fázi přípravy HÚ využívá SÚRAO celkem tři pracoviště na území ČR. Jedná se o podzemní laboratoř Josef, tunel Bedřichov

¹ Správa úložišť radioaktivních odpadů, Dlážděná 6, Praha 1, 110 00, smutek@surao.cz

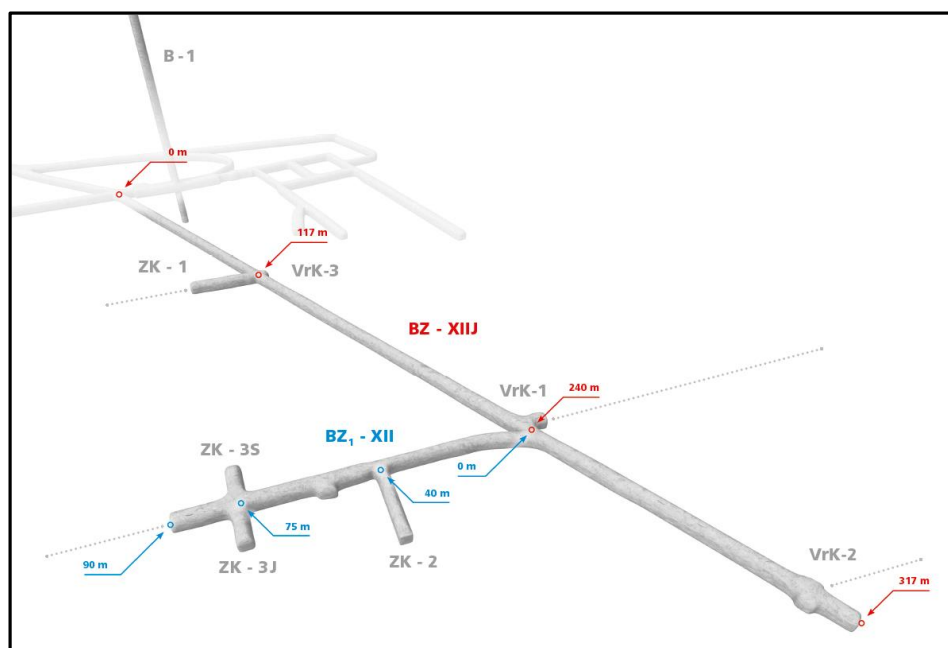
² DIAMO s.p., o.z. GEAM, Dolní Rožínka 86, 592 51, kriz@dimao.cz

v Jizerských horách a PVP Bukov (Vondrovic et al., 2017). Ve všech těchto pracovištích jsou generována data o dlouhodobém chování horninového masivu, pro dimenzování inženýrských řešení a pro prokázání dlouhodobé bezpečnosti hlubinného ukládání. PVP Bukov je typ generické podzemní laboratoře (OECD-NEA, 2013), se zaměřením na experimenty poskytující data z hloubek odpovídajících HÚ.

PVP Bukov se nachází na Moravě v katastru obce Bukov v okrese Žďár nad Sázavou a navazuje na bývalý uranový důl Rožná I. Toto propojení 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 (Obr. 1). Podzemní dílo (Obr. 2) se skládá z přístupového překopu BZ-XIII, tří vrtných komor (VrK), laboratorního překopu (BZ₁-XII), a čtyř zkušebních komor pro in-situ experimenty (ZK).



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

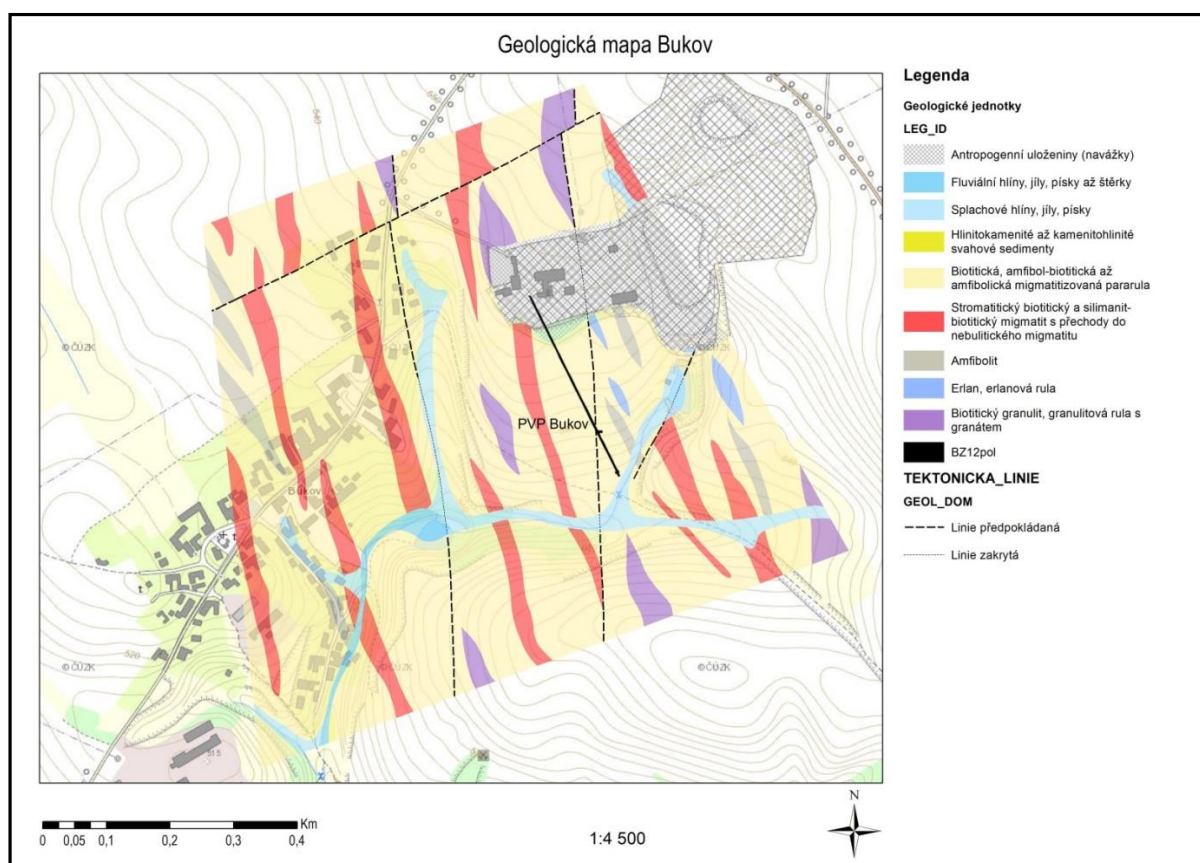


Obr. 2 Axonometrické schéma PVP Bukov

Tento příspěvek popisuje fázi výstavby a charakterizace podzemních prostor PVP Bukov. Článek obsahuje informace o geologické stavbě lokality, dále je zde popsáno technické řešení a postup výstavby. Pro výstavbu laboratorních částí byla použita metoda hladkého výlomu a pro návrh vyztužení těchto chodeb byla použita klasifikace RMR, která byla upravena tak, aby zahrnovala vliv použití této metody. Samotnou výstavbu doprovázela tzv. Fáze charakterizace. Jednalo se o tříletý projekt (2015-2017), který byl zaměřen na komplexní geologickou charakterizaci horninového prostředí v podzemním díle a na povrchu (Bukovská et al., 2017; Souček et al., 2018).

2 Geologická stavba

PVP Bukov je z regionálně-geologického pohledu lokalizována do hornin gföhlské skupiny moldanubika (strážeckého moldanubikum), v jehož horninovém složení vystupují především cordierit-biotitické a amfibol-biotitické ruly v různé míře částečného tavení (migmatizace; Obr. 3). Tyto horniny obsahují polohy pestrých horninových vložek - amfibolitů, mramorů, eklogitů. Při východním okraji této jednotky, v oblasti styku se svrateckým krystalinikem, pak vystupuje rozsáhlejší těleso světlých granulitů s polohami serpentinizovaných peridotitů a ortorulových hornin. Tyto horninové komplexy byly post-tektonicky intrudovány horninami drahonínského plutonu. Metamorfní podmínky variského vývoje strážeckého moldanubika byly v případě výše-tlaké minerální asociace v granulitech odhadnuty na P: 1,8 GPa a T: 850 °C, a s nízkotlakou re-ekvilibrací během relativně mladších deformačních událostí probíhala v podmínkách P: 0,35–0,45 GPa a T: 680–720 C.



Obr. 3 Geologická mapa okolí PVP Bukov

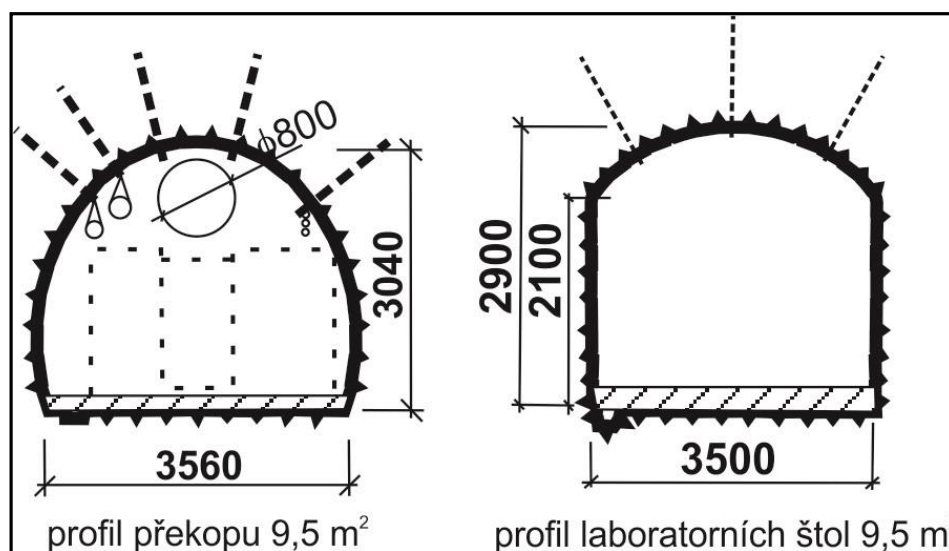
Zdroj: (Bukovská et al., 2017)

Vlastní horninové prostředí PVP Bukov je tvořeno metamorfovaným vulkanosedimentárním komplexem, konkrétně amfibol-biotitickými migmatity až amfibolity (Bukovská et al., 2017). V tomto základním horninovém typu se dále nacházejí polohy vápenato-silikátových hornin a žíly leukogranitů a pegmatitů. Ze strukturního hlediska lze pozorovat superpozici starší vysokoteplotní subvertikální orientace do mladší foliace ploché orientace. Vznik obou dokumentovaných staveb odpovídá teplotně-tlakovým podmínkám střední kontinentální kůry. Transpozice dvou přítomných staveb se v různé intenzitě projevuje vznikem otevřených až uzavřených asymetrických vrás, které mají amplitudy v rozsahu od 0,1 m do prvních desítek m.

Ze struktur křehké tektoniky jsou výrazné puklinové systémy reprezentované extenzními puklinami. Přítomný puklinový systém má ve studovaném horninovém masivu ortogonální charakter. Nejčtenějším souborem puklin jsou generelně subvertikálně orientované extenzní pukliny SV–JZ průběhu. Druhým výrazným puklinovým setem jsou opět subvertikálně orientované fraktury ~SZ–JV průběhu. Dokumentované zlomové struktury mají generelně charakter horizontálních posunů. Pravostranné horizontální posuny se subhorizontálními kinematickými indikátory mají SSV–JJZ, SSZ–JJV průběh a převážně strmou orientaci nebo zapadají pod středními úhly. Levostranné horizontální posuny, jsou stejně jako pravostranné většinou relativně strmé se subhorizontálními kinematickými indikátory. Orientace zlomových ploch s levostrannou kinematikou je nejednotná, nejvíce s ~SZ–JV a ~SV–JZ průběhem.

3 Technické řešení

PVP Bukov je situováno v jihovýchodním cípu bývalého dobývacího prostoru Rožná. Nachází se v části, která je minimálně ovlivněna dobývacími pracemi. Díky návaznosti na stávající uranový důl je pro přístup a obsluhu PVP používána jáma Bukov 1 (B-1). Pro výstavbu PVP byly stanoveny velikosti profilů důlních děl, které budou dostatečné z hlediska dopravních kapacit a z hlediska předpokládaných experimentů. Profily štol vycházely z typových profilů ložiska a vybrány byly dva základní typy vždy ve dvou velikostech výrubu. Typ 1 obloukový OO o ploše výrubu 9,5 m² a 14,2 m² a dva typy pravoúhlé s klenbou PK o ploše výrubu 9,5 m² a 14,2 m². Tvar a rozměry profilů jsou zobrazeny na Obr. 4.



Obr. 4 Tvarové profily ražených děl

Každý profil byl navržen ve třech variantách vyztužení, které byly zvoleny dle inženýrskogeologického zatřídění výrubu (DIAMO, 2017). Počítalo se s výrubem nevyztuženým, vyztuženým pomocí svorníků (případně sítě) a výrubem vyztuženým běžnou

ocelovou důlní výztuží. S ohledem na realizaci množství geofyzikálních měření, byly v prostorách ZK-1 a BZ1-XII aplikovány laminátové svorníky a sítě. Rozpojování horniny bylo prováděno trhacími pracemi. Při ražbě se používala běžná důlní sestava pro těžbu, která se skládá z vrtacího dvoulafetového vozu BVA-3 s vrtacími kladivy VKS – 45V, kolejového přehazovacího nakladače PPN – 1 a důlních vozů JDV 0.63.0.

4 Výstavba

PVP Bukov se skládá ze dvou základních částí. První částí je přístupový překop BZ-XIII, který slouží k napojení laboratorních částí na infrastrukturu dolu včetně dopravních cest. Překop byl ražen pomocí trhacích prací konvenčním způsobem.

Zkušební komory a laboratorní překop BZ₁-XII byly raženy s rozpojováním horniny metodou hladkého výlomu. Pro rozpojování hornin bylo používáno klasických průmyslových trhavin Perunit E, Permonex V19, bleskovic START LINE 12 a elektrických rozbušek DeD-S. Jednalo se o výrobky standardně používané při těžbě v sousedním dole.

Postup prací byl v profilu 9,5 m² dva a v profilu 14,2 m² jeden záběr denně. Délka záběru činila okolo 1,0 m. Obvykle bylo pracoviště na čelbě obsazeno dvěma směny. Ražba neprobíhala kontinuálně. Na základě programu charakterizace a realizace příslušných monitorovacích prací byl občas postup přerušen, aby bylo možné provést instalace měřících prvků, případně provést potřebná měření.

Ražená díla jsou vystrojena standardně hlavním větrným lutnovým tahem Ø 800 mm v překopu BZ-XIII, který je nastaven jako sací větev větrání. Do rozrážek ZK a BZ₁-XII jsou zavedeny separátní lutnové tahy foukací s Ø 600 mm. Dále jsou díla osazena potrubím s vodou a tlakovým vzduchem a rozvodem silové elektřiny. Pro potřebu experimentů jsou v různých místech osazeny datové ústředny a rozvody datových vodičů. Pro potřeby přenosu dat z podzemí na povrchové pracoviště bude sloužit v současnosti instalovaná optická síť.

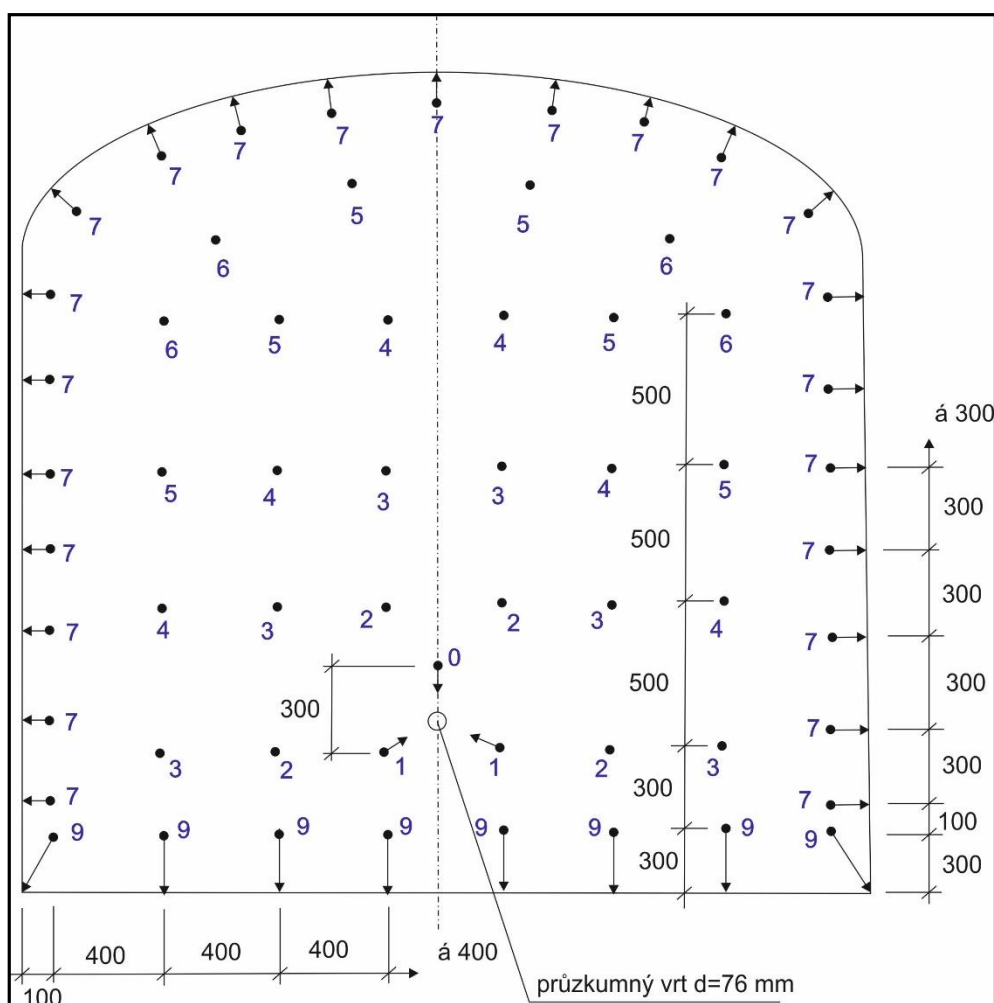


Obr. 5 Výztuž profilu hlavního překopu BZ-XIII

5 Trhací práce - hladký výlom

Pro hladký výlom je důležitým vstupem strukturální charakteristika horniny. Zastižené horniny byly typické zřetelnou foliací, která predisponovala oddělování uvolněných kusů horniny po odstřelu. Zvláště v úsecích s intenzivnějším systémem křehkých diskontinuit byla

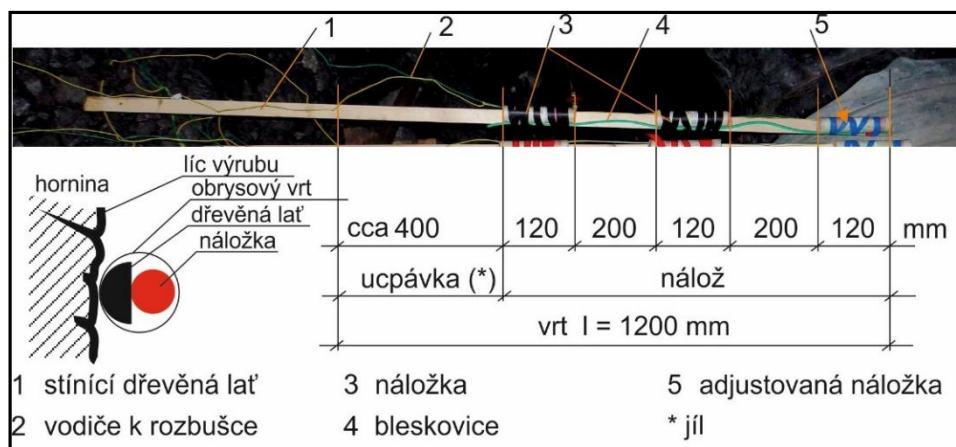
velice náchylná k vytváření nadvýlomů i přes obrysové vrty. Při optimalizaci výsledku hladkého výlomu byla z místně dostupných prostředků trhací techniky odvozena konfigurace trhacích prací patrná z Obr. 6.



Obr. 6 Vrtné schéma a časování vrtů čelby hladkého výlomu (profil $9,5 \text{ m}^2$)

Pro vrty v časových stupních 2 až 6 byla používána trhavina Perunit E s dílčí hmotností ve vrtu cca 0,5 kg. Pro zálomové vrty byla použita dělená nálož se dvěma časovými stupni v jednom vývrtu, a to v časovém stupni 0: 200 g a v časovém stupni 1: (u dna vývrtu) 400 g. U počevních vrtů v časovém stupni 9 měla dílčí nálož hmotnost 0,6 kg. Pro vrty v čase 7 (obrysové) byla používána mezerová stíněná nálož trhaviny Permonex V19 o dílčí hmotnosti 0,3 kg a pro zajištění přenosu detonace byla použita bleskovice STARTLINE 12 (Obr. 7). Celková hmotnost trhaviny v čelbě činila zhruba 26,5 kg. Pro odstřel čelby bylo navrženo obvykle 37 vrtů zálomových, příbírkových a počevních (Obr. 8). Pro obrys bylo vytvořeno 23 vrtů. U profilu $14,2 \text{ m}^2$ byly počty vrtů a celková nálož vyšší. Časové stupně byly v řadě rozbušek DeD, tj. v intervalu 250 ms. S ohledem na umístění pracoviště byly dostačující rozbušky odolnosti S.

Přestože nebyla duktilní stavba zastižených hornin příznivá, dařilo se dosáhnout poměrně dobrého procentuálního zastoupení hladkého výlomu na obrysu výrubu. Dosažené hodnoty se běžně pohybovaly nad 75 %. To znamená, že na více než třech čtvrtinách rozvinuté délky obrysu výrubu byly viditelné stopy po obrysových vrtech v celé délce záběru (Obr. 9).



Obr. 7 Ukázka konstrukce obrysové nálože



Obr. 8 Ukázka navrtané čelby pro přípravu trhací práce a detail nabité čelby v ZK-1



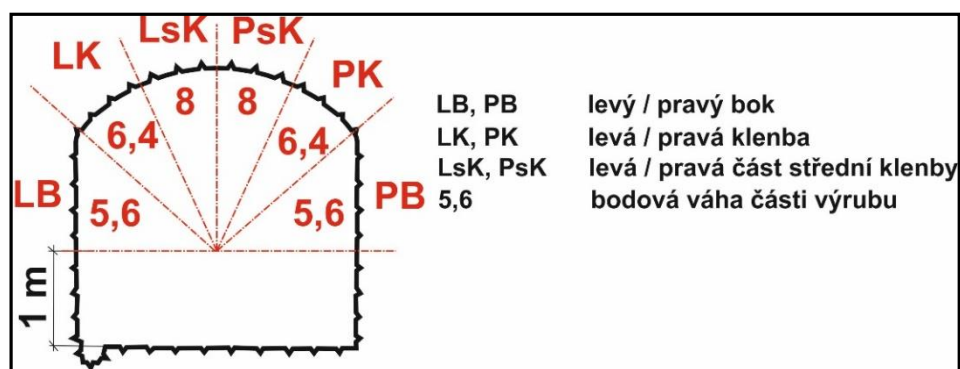
Obr. 9 Ukázka hladkého vylomu v ZK-1

6 Inženýrskogeologická dokumentace

Při dokumentaci čeleb se vycházelo z klasifikace RMR. Zastižená hornina byla primárně popsána ve smyslu ČSN EN ISO 14689-1 (Geotechnický průzkum a zkoušení – Pojmenování a zařídování hornin, Část 1: Pojmenování a popis). Dále byly charakterizovány diskontinuity, včetně jejich hustoty, velikosti, výplně, tvaru, směru vůči ražbě a zvodnění. Na závěr byl daný postup ražby číselně klasifikován a podle klasifikačního indexu poté následně zvolen způsob vyztužení a zajištění.

Protože byla pro ražbu laboratorních chodeb zvolena metoda hladkého výlomu, kdy je významně snížena intenzita poškození výrubu a rozsah poškozené zóny (EDZ), doporučené vyztužení díla na základě hodnot klasifikace RMR bylo evidentně předimenzované. Z toho důvodu byla klasifikace modifikována tak, aby zahrnovala vliv obrysové trhací práce.

Vliv hladkého výlomu je do modifikované klasifikace zahrnut jako násobný koeficient přiřazený podle kvality provedení výlomu. Hodnocení hladkého výlomu spočívá v procentuálním vyčíslení kvality hladkého výlomu v příslušné části obvodu výrubu (výrub by rozdělen na 6 částí), kterým je vynásobena bodová váha příslušné části (Obr. 10). Jejich součet pak vyjadřuje procentní korekci, o kterou se upraví index RMR.



Obr. 10 Schéma členění obrysu výrubu pro klasifikaci hladkého výlomu

7 Charakterizace horninového masivu

V průběhu výstavby probíhal od roku 2015 rozsáhlý projekt *Komplexní geologické charakterizace PVP Bukov*, který byl součástí programu *Výzkumná podpora bezpečnostního hodnocení hlubinného úložiště*. Cílem projektu bylo multidisciplinární zhodnocení horninového prostředí v prostoru budovaného pracoviště během výstavby. Práce byly realizovány celkem čtyřmi institucemi (Česká geologická služba; Ústav Geoniky Akademie věd ČR v.v.i.; ÚJV Řež, a. s.; SG Geotechnika, a.s.) a zahrnovaly komplexní geologickou, petrologickou a petrofyzikální charakteristiku, 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.

Na základě integrace širšího souboru geologických dat byl vytvořen 3D strukturně-geologický a geomechanický model PVP Bukov. Výzkumné práce poskytnuly ucelený soubor poznatků nezbytných pro plánovanou realizaci experimentů zaměřených na dlouhodobou bezpečnost a technickou proveditelnost budoucího HÚ. Kompletní výsledky prací jsou obsaženy v závěrečné zprávě projektu (Bukovská et al., 2017; Souček et al., 2018).

Práce navíc umožnily získat cenná data, která jsou k dispozici krátce po otevření horninového masivu důlním dílem. Součástí geotechnické charakterizace bylo také měření napětově-deformačního stavu horninového masivu (Souček et al., 2017). Cílem bylo získat informace o napětovém stavu a deformačním chování horninového masivu pomocí in-situ

měření. Získaná data byla použita pro posouzení kvality horninového masivu, stanovení deformací podzemních důlních děl a stanovení indukovaných napětí v horninovém masivu v průběhu výstavby podzemní laboratoře. Měření napětíového stavu bylo realizováno pomocí hydraulického štěpení stěn vrtu (hydrofracturingu) a monitorování změn napjatosti v průběhu výstavby bylo provedeno pomocí kuželových tenzometrických sond (metody CCBO a CCBM; Waclawik et al., 2016). Dále bylo v testovacích vrtech provedeno měření přetvárných vlastností horninového masivu metodou Goodman Jack a na sérii čtyř stanic byla v průběhu výstavby prováděna opakovaná konvergenční a tenzometrická měření v instalovaných měřících svornících (Souček et al., 2018).

8 Závěr

PVP Bukov je typ generické podzemní laboratoře, která bude sloužit v procesu přípravy hlubinného úložiště radioaktivních odpadů v ČR. Při výstavbě laboratorních podzemních prostor byl díky aplikaci metody hladkého výlomu výrazně redukován rozsah poškozené oblasti v okolí výrubů. Metoda návrhu vyztužení podzemních děl pomocí modifikovaného indexu RMR se ukázala jako velmi vhodná. Uvažuje se, že metoda bude aplikována v budoucnu v případě ražení nových prostor podzemní laboratoře, které je v současnosti plánováno.

Na výstavbu a charakterizační fázi tohoto pracoviště plynule navázala fáze experimentální. V rámci této fáze v PVP Bukov probíhají a budou probíhat série in-situ experimentů pro získání nezbytných informací pro přípravu hlubinného úložiště. První projekty se zabývají např. výzkumem interakcí mezi materiály zvažovanými pro konstrukci inženýrských bariér v HÚ, studiem korozních procesů, studiem mikrobiologického osídlení v horninovém masivu nebo studiem hydrogeologických procesů proudění podzemních vod.

Provoz tohoto pracoviště je v plánu minimálně až do roku, kdy bude ve vybrané lokalitě pro výstavbu úložiště zbudována konfirmační laboratoř (dle současného strategického plánu rok 2035; Pospíšková et al., 2015).

Literatura

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

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

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

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

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.

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>