

GEOTECHNICKÁ CHARAKTERIZACE HORNINOVÉHO MASIVU PŘI RAŽBĚ PODZEMNÍHO VÝZKUMNÉHO PRACOVÍŠTĚ BUKOV II

GEOTECHNICAL CHARACTERIZATION OF ROCK MASS DURING EXCAVATION OF BUKOV UNDERGROUND RESEARCH FACILITY II

LUKÁŠ MAREČEK, LUCIE MAREDA, ZITA BUKOVSKÁ, KAREL SOSNA

ABSTRAKT

V současnosti probíhá dokončení Podzemního výzkumného pracoviště Bukov II, které se v roce 2025 otevře novým experimentům zaměřeným na pochopení vývoje a chování inženýrských bariér a validaci transportních, teplotních a geomechanických modelů. Pracoviště se nachází v geologickém prostředí metamorfovaných hornin. Jedná se o migmatizované pararuly až migmatity a amfibolity. Projekt Geologická a geotechnická charakterizace horninového prostředí – PVP Bukov II, jehož dílčí výsledky jsou reprezentovány v tomto článku, má za cíl sběr, uložení a interpretaci dat ve formě 3D modelu s akcentem na získání postupů klasifikace horninového prostředí vhodných při budování hlubinného úložiště. Jeho plnění zahrnuje geologickou a geotechnickou dokumentaci, petrografické, mineralogické a strukturně-geologické analýzy, hydrogeologické charakterizace, stanovení fyzikálně-mechanických vlastností hornin in situ a v laboratoři, geofyzikální měření, monitorování seismických efektů trhacích prací a analýzu EDZ. Tento článek se zaměřuje na dokumentaci čelby v průběhu ražeb. Kromě použití třech standardních klasifikačních systémů byla pro dokumentaci využita metoda fotogrammetrie. Finální stav celého vyraženého díla byl dokumentován pomocí laserového skenování. Použití fotogrammetrie zajistilo přesnější výstup v podobě 3D fotogrammetrického modelu čelby.

ABSTRACT

Bukov Underground Research Facility II is currently being completed, and will open in 2025 for new experiments aimed at understanding the development and behavior of engineering barriers and validating transport, temperature and geomechanical models. The workplace is in a geological environment of metamorphic rocks. These are migmatitized pararules to migmatites and amphibolites. The project Geological and geotechnical characterization of the rock mass – Bukov URF II, partial results of which are represented in this article, aims to collect, store and interpret data in the form of a 3D model with an emphasis on obtaining rock mass classification procedures suitable for the construction of a deep geological repository. The project fulfilment includes geological and geotechnical documentation, petrographic, mineralogical and structural-geological analyses, hydrogeological characterization, determination of physical-mechanical properties of rocks in situ and in the laboratory, geophysical measurements, monitoring of seismic effects of blasting and EDZ analysis. This article focuses on the documentation of tunnel faces during the excavations. In addition to the use of three standard classification systems, the photogrammetry method was used for documentation. The final state of the entire excavation was documented using laser scanning. The use of photogrammetry ensured a more accurate output in the form of a 3D photogrammetric model of the tunnel face.

ÚVOD

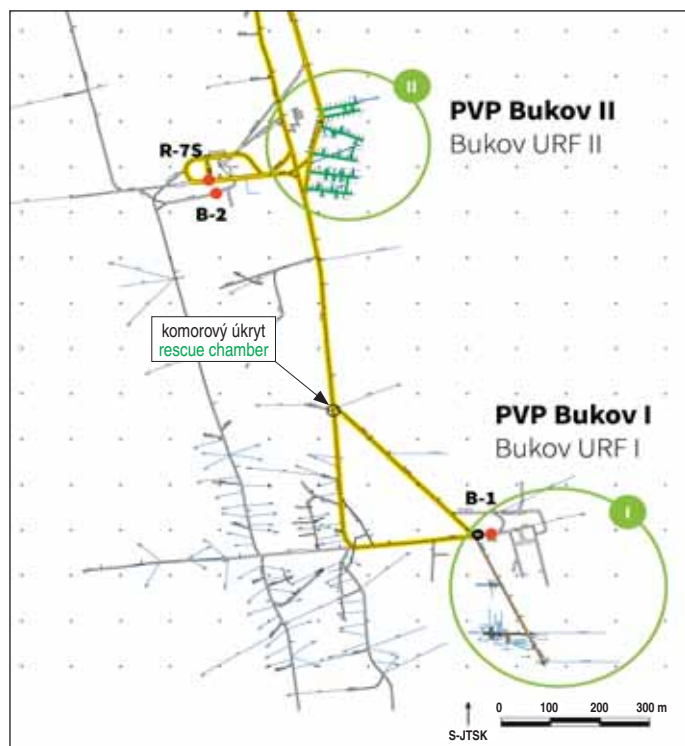
Podzemní výzkumné pracoviště Bukov (PVP Bukov) je určeno k výzkumu, vývoji a demonstračním aktivitám v rámci projektu českého hlubinného úložiště (HÚ), na jehož přípravě pracuje Správa úložišť radioaktivních odpadů (SÚRAO). Plánované české HÚ má být umístěno v krystalických horninách, tedy vyvřelých nebo přeměněných horninách, přibližně 500 metrů pod zemí. V aktuální fázi projektu SÚRAO charakterizuje čtyři lokality v rámci Českého masivu tak, aby z nich do roku 2030 mohla zvolit finální i záložní. Souběžně s tím se zaměřuje na zlepšení matematických modelů, které prokazují bezpečnost českého multibariérového konceptu.

Součástí procesu přípravy HÚ je získávání dat a zkušeností z podzemních laboratoří z podmínek, které odpovídají prostředí plánovaného úložiště. Již od devadesátých let SÚRAO spolupracuje na projektech v zahraničních podzemních laboratořích, jako jsou Äspö ve Švédsku nebo Grimsel ve Švýcarsku, a postupně využívá rovněž domácí pracoviště, jako jsou štola Josef a tunel Bedřichov. Významným krokem bylo v roce 2013 zahájení stavby vlastního pracoviště v bývalém uranovém dole Rožná I, v hloubce odpovídající zamýšlené hloubce úložiště. PVP Bukov, zařazené mezi generické podzemní laboratoře podle NEA-OECD [1], poskytuje

INTRODUCTION

The Bukov Underground Research Facility (URF) is intended for research, development and demonstration activities within the Czech deep geological repository (DGR) project, which is being prepared by the Radioactive Waste Repository Authority (SÚRAO). The planned Czech DGR is to be located in crystalline rocks, i.e. igneous or metamorphosed rocks, approximately 500 meters underground. In the current phase of the project, SÚRAO is characterizing four localities within the Bohemian Massif in such a way that by 2030 it can choose the final and backup sites. At the same time, it focuses on improving mathematical models that demonstrate the safety of the Czech multibarrier concept.

Part of the process of preparing the DGR is obtaining data and experience from underground laboratories from conditions that correspond to the environment of the planned repository. Since the 1990s, SÚRAO has been collaborating on projects in foreign underground laboratories, such as Äspö in Sweden or Grimsel in Switzerland, and is gradually also using domestic workplaces such as the Josef gallery and the Bedřichov tunnel. In 2013, a significant step was the start of the construction of own workplace in the former Rožná I uranium mine, at a depth corresponding to the intended depth of the repository. The Bukov URF classified as generic underground



Obr. 1 Výřez důlní mapy s umístěním PVP Bukov I a II
Fig. 1 Cutout of the mine map with the location of Bukov URF I and II

SÚRAO prostor a podmínky pro experimenty, které jsou důležité pro aktuální fázi vývoje konceptu hlubinného úložiště. Provoz laboratoře včetně související infrastruktury je zajišťován původním správcem dolu, DIAMO s.p.

První část laboratoře (PVP Bukov I), která byla uvedena do provozu v roce 2017, se nachází u jámy B-1 pod obcí Bukov v kraji Vysočina a sestává z 475 metrů chodeb a zkušebních komor. Od roku 2013 bylo v dole realizováno 12 výzkumných projektů, přičemž dalších osm experimentů probíhá. Další plánované experimentální a demonstrační aktivity budou postupně naplňovat nové laboratorní komory PVP Bukov II podle plánu Výzkumu a vývoje [2], přičemž provoz zařízení je aktuálně plánován minimálně do roku 2035 (obr. 1).

Nový systém ražených chodeb označovaný PVP Bukov II se nachází v blízkosti jámy B-2 a jeho pozice byla určena na základě vhodných geologických podmínek zjištěných vrtným průzkumem a také na základě příhodných technologických podmínek pro realizaci budoucích experimentů. Dostatečná vzdálenost dvou částí pracoviště zaručila, že v průběhu ražeb, které probíhaly od ledna 2021 do dubna 2024, nedošlo k ovlivnění nebo poškození probíhajících experimentů. V rámci PVP Bukov II se budou v následujících letech realizovat experimenty zaměřené na pochopení vývoje a chování inženýrských bariér a validaci transportních, teplotních a geomechanických modelů.

Projekt Geologická a geotechnická charakterizace PVP Bukov II, jehož dílčí výsledky jsou reprezentovány v tomto článku, má za cíl sběr, uložení a interpretaci dat ve formě 3D modelu s akcentem na získání postupů klasifikace horninového prostředí vhodných při budování HÚ. Jeho plnění zahrnuje geologickou a geotechnickou dokumentaci, petrografické, mineralogické a strukturně-geologické analýzy, hydrogeologické charakterizace, stanovení fyzikálně-mechanických vlastností hornin in situ a v laboratoři, geofyzikální měření, monitorování seismických efektů trhačích prací a analýzu zóny poškození horniny (EDZ).

laboratories according to NEA-OECD [1], provides SÚRAO with space and conditions for experiments that are important for the current development phase of the deep geological repository concept. The operation of the laboratory, including the related infrastructure, is provided by the original mine manager, DIAMO s.p.

The first part of the laboratory (Bukov URF I), which was put into operation in 2017, is located at the B-1 shaft below the village of Bukov in the Vysočina region and consists of 475 meters of corridors and test chambers. Since 2013, 12 research projects have been implemented at the mine, with another eight experiments underway. Other planned experimental and demonstration activities will gradually fill the new Bukov URF II laboratory chambers according to the Research and Development plan [2], while the operation of the facility is currently planned until at least 2035 (Fig. 1).

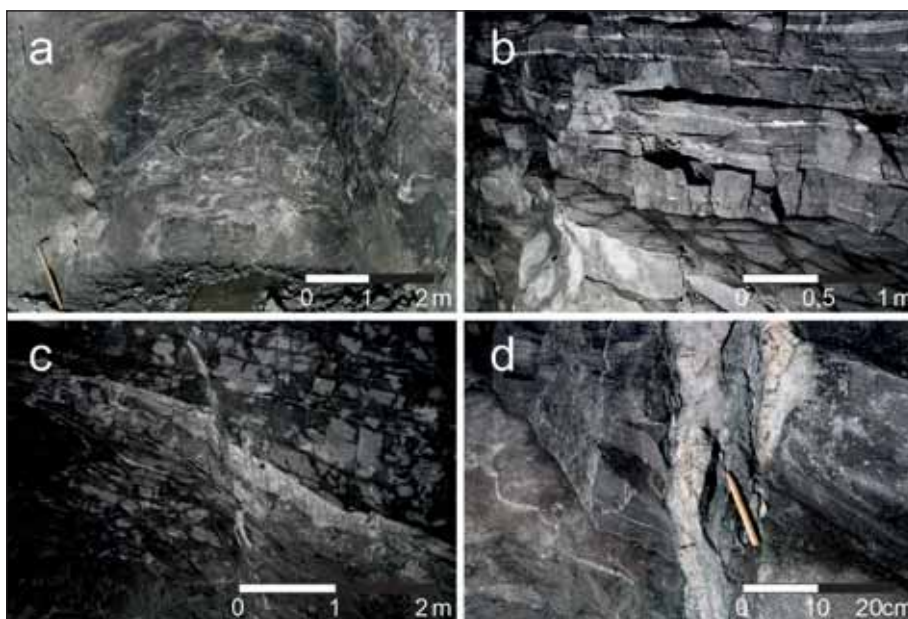
The new tunnel system, designated Bukov URF II, is located near the B-2 shaft and its position was determined by suitable geological conditions found by the drilling survey, as well as by suitable technological conditions for the implementation of future experiments. Sufficient distance between the two parts of the site ensured that during the excavations, which took place from January 2021 to April 2024, the ongoing experiments were not affected or damaged. In the framework of Bukov URF II, experiments focused on understanding the development and behavior of engineered barriers and the validation of transport, temperature and geomechanical models will be carried out in the following years.

The project Geological and geotechnical characterization of Bukov URF II, partial results of which are represented in this article, aims to collect, store and interpret data in the form of a 3D model with an emphasis on obtaining rock mass classification procedures suitable for the construction of the DGR. Its performance includes geological and geotechnical documentation, petrographic, mineralogical and structural-geological analyses, hydrogeological characterization, determination of physical-mechanical properties of rocks in situ and in the laboratory, geophysical measurements, monitoring of seismic effects of blasting and analysis of rock excavation damage zone (EDZ).

GEOLOGY OF THE LOCATION

The environment of Bukov URF II is made up of metamorphic rocks. These are mainly more or less migmatitized paragneisses to migmatites and amphibolites. Individual lithologies alternate quite often, and paragneisses to migmatites and migmatitized amphibolites smoothly transition into each other. Throughout Bukov URF II there are amphibolite beds and more rarely positions of coarse-grained pegmatite, as well as quartz-carbonate veins with multigenerational calcite and quartz. Dolomitic-ankeritic carbonate also occurs locally. Sulfide mineralization is mainly represented by pyrite on fracture surfaces and in veins, and to a lesser extent by pyrrhotite. Small zeolites and barite are found in the cavities. Geochemical characteristics show that the metasedimentary rocks correspond to originally unsorted sandstone derived from immature sources of clastic material, while the metavolcanic rocks chemically represent originally basaltic lavas.

The metamorphic foliation typically dips to ~SW at moderate angles in the range of 35 to 55 degrees. It often contains relict fold structures with generally subhorizontal fold axes. Brittle faults are represented relatively homogeneously in the profile of the corridor and are most often extensional type I fractures. They occur individually or in fracture zones with different density of fractures, shear fractures occur only exceptionally. Fractures and fracture zones usually run in the E-W to NE-SW and NW-SE directions



Obr. 2 Fotodokumentace geologických struktur, a – dokumentace nově vyražených prostorů, b – nejvýraznější diskontinuální plocha paralelní s metamorfní foliací horniny, c – příklad střížné pukliny, d – tři různé výplně střížné pukliny

Fig. 2 Photo documentation of geological structures, a – documentation of newly excavated spaces, b – the most pronounced discontinuous surface parallel to the metamorphic foliation of the rock, c – an example of a shear fracture, d – three different fillings of a shear fracture

GEOLOGIE LOKALITY

Prostředí PVP Bukov II je tvořeno metamorfovanými horninami. Jedná se zejména o více či méně migmatitizované pararuly až migmatity a amfibolity. Jednotlivé litologie se poměrně často střídají a pararuly až migmatity a migmatitizované amfibolity do sebe plynule přecházejí. V celém PVP Bukov II se vyskytují budiny amfibolitů a vzácněji polohy hrubozrnného pegmatitu, dále jsou zde přítomny křemen-karbonátové žíly s vícegeneračním kalcitem a křemenem. Lokálně se vyskytuje i dolomiticko-ankeritický karbonát. Sulfidická mineralizace je na plochách puklin a v žilách zastoupena především pyritem, méně pak pyrhotinem. V dutinách se vyskytují drobné zeolity a baryt. Geochemické charakteristiky ukazují, že metasedimentární horniny odpovídají původně nevytříštěnému pískovci derivovanému z nezralých zdrojů klastického materiálu, zatímco metavulkanické horniny svým chemickým složením reprezentují původně bazaltické lávy.

Metamorfní foliace upadá obvykle k ~JZ pod středními úhly v rozmezí 35 až 55 stupňů. Často obsahuje relikty vrásových struktur s generálně subhorizontálními vrásovými osami. Křehké poruchy jsou zastoupeny v profilu chodby relativně homogenně a jedná se nejčastěji o extenzní pukliny typu I. Ty se vyskytují individuálně nebo v puklinových zónách s různou hustotou puklin, jen výjimečně se vyskytují pukliny střížné. Pukliny a puklinové zóny mají obvykle průběh ve směrech V–Z až SV–JZ a SZ–JV s různými úklopy. Zlomy jsou relativně vzácné a jejich mocnost obvykle dosahuje max.

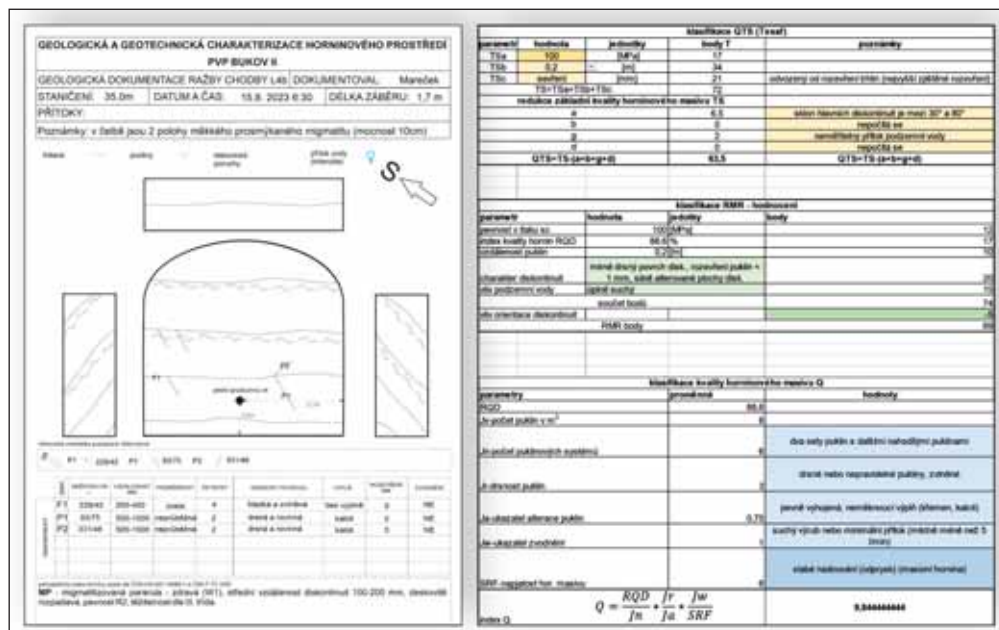
with different dips. Faults are relatively rare and their thickness usually reaches max. a few cm. More significant discontinuities in the Bukov URF II space are the positions of biotite-rich reactivated foliations (Fig. 2).

A detailed description of the geology is provided in interim reports [3, 4, 5].

EXCAVATIONS

During the excavation of the corridors for Bukov URF II, standard geotechnical documentation of the rock mass was carried out for individual excavation rounds (Fig. 3). The output of this documentation was an evaluation of three index classification systems. The goal of using these index classification systems is traditionally part of the monitoring of underground structures and information for the evaluation of the stability of the mine work, or a forecast for future excavation rounds. In the case of Bukov URF II, a parallel goal will also be to find out the possibilities of using index classification systems or their parts for the needs of evaluating the suitability of mined workings for long-term radioactive waste disposal.

For the geotechnical documentation of the rock mass in each advance, three index classification systems used in underground construction (RMR [6], QTS [7, 8]) and the Q system [9] were used. These index classifications are calculated on the basis of parameters monitored directly on the face and walls of the excavation. The rock mass was most often contained two discontinuity sets, while the fracturing was close to fault zones with up to three sets with other irregular discontinuities. In several places, the rock mass was essentially only irregularly fractured. The average distance of the discontinuities was from 0.04 to 2m with an average distance of 0.2m. Discontinuity planes were mostly interrupted. The surfaces of the discontinuities were most often wavy and rough. Faults and shear fractures were most often closed or firmly healed by calcite or



Obr. 3 Vzorová dokumentace čelby a formulář pro výpočet indexových klasifikací
Fig. 3 Sample of tunnel face documentation and classifications index calculation form

několika cm. Významnější diskontinuity v prostoru PVP Bukov II tvoří polohy biotitem bohatých reaktivovaných foliací (obr. 2).

Detailed popis prostředí je uveden v průběžných zprávách [3, 4, 5].

RAŽBY

V průběhu ražby chodeb pro PVP Bukov II byla prováděna standardní geotechnická dokumentace horninového masivu pro jednotlivé záběry (obr. 3). Výstupem této dokumentace bylo vyhodnocení ve třech indexových klasifikačních systémech. Cílem užití těchto indexových klasifikačních systémů tradičně bývá hodnocení kvality horninového masivu jako součást monitoringu podzemních staveb, včetně informace pro zhodnocení stability podzemního díla či její prognózy do budoucích záběrů raženého díla. V případě řešeného PVP Bukov II bude navíc paralelním cílem zjistit možnosti užití indexových klasifikačních systémů či jejich částí pro potřeby vyhodnocení vhodnosti důlního díla pro dlouhodobé uložení radioaktivního odpadu.

Pro geotechnickou dokumentaci horninového masivu v každém záběru bylo užito tří indexových klasifikačních systémů užívaných v podzemním stavitelství (RMR [6], QTS [7, 8]) a Q systém [9]. Tyto indexové klasifikace jsou počítány na základě parametrů sledovaných přímo na čelbě a stěnách důlního díla. Horninový masiv byl nejčastěji rozpukaný ve dvou diskontinuitních systémech, přičemž rozpučení bylo v blízkosti poruchových pásem až ve třech systémech s dalšími nepravidelnými diskontinuitami. V několika místech byl horninový masiv v podstatě pouze nepravidelně rozpukaný. Průměrná vzdálenost diskontinuit byla od 0,04 po 2 m s průměrnou vzdáleností 0,2 m. Systémy diskontinuit byly většinou neprůběžné. Povrchy diskontinuit byly nejčastěji zvlněné a drsné. Zlomy a střížné pukliny byly nejčastěji sevřené nebo pevně vyhojené kalcitem, případně křemenem. Několik podružných střížných puklin bylo vyplněno jílem s rozevřením až 20 mm, ojediněle s ohlasy. Pevnost horniny v prostém tlaku dosahovala hodnot v rozmezí 50–130 MPa s průměrnou hodnotou 100 MPa. Průměrná hodnota RQD byla 87 % s ojedinělými výkyvy mezi 35–100 %. V prostoru PVP Bukov II je horninový masiv poměrně suchý s relativně malými přítoky vázanými hlavně na tektonické poruchy horninového masivu. Proto se méně často měnily parametry charakterizující vliv podzemní vody a tím měly malý podíl na výpočet bodů indexových klasifikací. Ostatní parametry, jako SRF v případě Q systému a jiné, se měnily pouze sporadicky. Obecně jsou různé klasifikační systémy vhodné pro různá horninová prostředí. Užití indexové klasifikace se mírně liší v parametrech, které

quartz. Several minor shear fractures were filled with clay with an opening of up to 20mm, rarely slicken sided.

The rock uniaxial strength reached values in the range of 50–130MPa with an average value of 100MPa. The average RQD value was 87% with occasional fluctuations between 35–100%. In the area of Bukov URF II, the rock mass is relatively dry with relatively small inflows mainly linked to tectonic disturbances of the rock mass. Therefore, the parameters characterizing the influence of groundwater varied less often and thus had a small impact on the classification index calculation. Other parameters, such as SRF in the case of the Q system and others, changed only sporadically. In general, different classification systems are appropriate for different rock environments. The index classifications used differ slightly in the parameters they evaluate, as well as in the degree of importance they assign to individual parameters. The differences in the evaluated parameters are reflected in the slight difference of the index evaluation in the index classification systems (Fig. 4). Despite these differences, however, all parameters show on average the characteristics of a very good rock environment, which led to relatively high index values of the index classification systems.

The excavations are supported throughout Bukov URF II by chemical composite anchor rods (bolts) with a plastic washer plate, and seven radially installed bolts with a spacing of one to three meters, depending on the quality of the rock mass. Deteriorated properties of the rock mass were observed only at the intersection of tectonic faults with a slightly tilted foliation surface, especially in places where the rock in a narrow 10cm thick strongly biotitic position has significantly reduced strength due to alteration and deformation. For this reason, TH steel ribs were used to secure the excavation, and only in two approximately eight-meter long sections. The standard reduction in the quality of excavated walls due to the higher rock stresses near the crossing of the corridors was compensated support of sprayed concrete.

The underground space of the new Bukov URF II consist of six parallel corridors with lengths of 95, 90 and 75 meters. These corridors are connected by four ventilation corridors. A total of 13 ten-meter blind test chambers were created in selected corridors for future experiments. Excavation of the new underground space took place gradually from February 2021 to April 2024 and follows the original corridors of the Rožná mine. Excavation usually took place only on one active face, exceptionally on two, for operational and transport reasons arising from the rail transport of material in the Rožná mine. The length of the excavation rounds was the



Obr. 4 Vyhodnocení klasifikačních systémů na příkladu chodby L5

Fig. 4 Evaluation of classification systems on the example of corridor L5

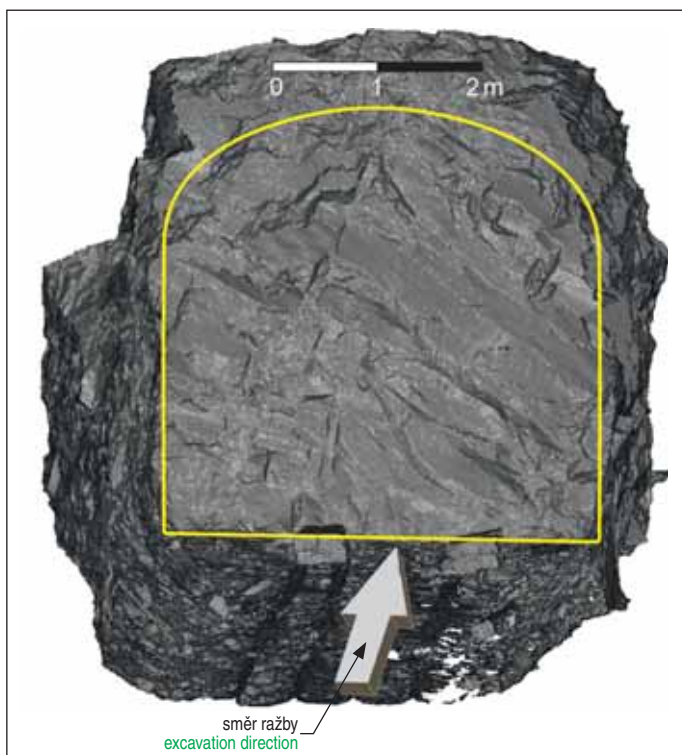
vyhodnocují, a také v míře vážnosti, kterou jednotlivým parametřům přisuzují. Odlišnosti ve vyhodnocovaných parametrech se odráží v mírné rozdílnosti bodového ohodnocení indexových klasifikačních systémů (obr. 4). Přes tyto rozdíly však všechny parametry vykazují v průměru vlastnosti velmi dobrého horninového prostředí, které vedly k relativně vysokým hodnotám bodů indexových klasifikačních systémů.

Zajištění výrubu je v celém PVP Bukov II provedeno lepenými kompozitovými kotevnými tyčemi (svorníky) s plastovou podložkou ve vějíři s počtem sedm kusů a rozstupem jeden až tři metry v závislosti na kvalitě horninového masivu. Zhoršené vlastnosti horninového masivu byly pozorovány pouze v místě křížení tektonických poruch s mírně ukloněnou plochou foliace, především v místech, kde má hornina v úzké decimetrové silně biotické poloze vlivem alterace a deformace výrazně sníženou pevnost. Z tohoto důvodu byla k zajištění výrubu užita TH výztuž, a to pouze ve dvou přibližně osmimetrových úsecích. Standardní snížení kvality výrubu v důsledku vyšší napjatosti masivu v blízkosti křížení chodeb bylo řešeno vyztužením stříkaným betonem.

Prostory nového PVP Bukov II tvoří šest paralelních chodeb o délkách 95, 90 a 75 metrů. Tyto chodby jsou propojené čtyřmi větracími chodbami. Ve vybraných chodbách vzniklo souhrnně 13 desetimetrových slepých zkušebních komor pro budoucí experimenty. Ražba nových prostorů probíhala postupně od února 2021 do dubna 2024 a navazuje na původní chodby dolu Rožná. Ražba probíhala většinou pouze na jedné aktivní čelbě, výjimečně na dvou, a to z provozních a dopravních důvodů vyplývajících z kolejové dopravy materiálu v dole Rožná. Délka jednotlivých záběrů byla po většinu doby ražby stejná (1,6 m). Pouze v případě komplikovanějších úseků byla délka záběru zkrácena na 1,0, případně 1,5 m.

FOTOGRAMMETRIE

Geodetická část dokumentace čelby byla prováděna metodou digitální fotogrammetrie. Z pořízených digitálních snímků čelby byl pomocí obrazové korelace vyhotoven 3D model čelby a výrubu (obr. 5).



Obr. 5 Fotogrammetrický model nově vyraženého prostoru
Fig. 5 Photogrammetric model of the newly excavated space

same (1.6m) for most of the mining time. Only in the case of more complicated sections the round length was shortened to 1.0 or 1.5m.

PHOTOGRAMMETRY

The geodetic part of the documentation of the excavation faces was carried out using the digital photogrammetry method. A 3D model of the face and walls was created from the digital images of the face using image correlation (Fig. 5). The model was first created in the form of a screened point cloud with a density of approximately 10,000 points per 1m². A 3D model was generated from this screened cloud in the form of a colored and textured triangular mesh. The resulting 3D models of the faces were connected to the coordinate system by means of fitting points. The fitting points were continuously (about once a month) geodetically positioned. Groma 13 software was used to process geodetic measurements. 3D models were created in Agisoft Metashape Professional software. The resulting models were exported to E57 and OBJ formats.

LASERSCAN

Laser scanning technology was used to survey the actual condition of the newly excavated Bukov URF II underground space. SG Geotechnika has more than twenty years of experience with this method. Laser scanning makes it possible to accurately and quickly capture the actual state of the object being measured. The initial output from the scanner is a point cloud. These are on the order of millions of points distributed in space, which are created during the scanning process itself, where each point of the cloud is defined by its own spatial coordinate (x, y, z).

The goal of the task was to provide a 3D model of underground space in the form of a modified irregular triangular network (TIN). The focus of the measurement was the newly created spaces L4a, L4b, L5 and L6, including the connecting corridors L4c, L4d and V5-6 – a total of approx. 500 meters of corridors. Positioning was done using a laser scanning system from FARO.

The obtained point cloud was connected to the mine point field in the S-JTSK coordinate system and in the Adriatic altitude system. In the next stage of processing, filtering of point clouds from unwanted noise was performed in SW Cyclone CORE. The modified point clouds were exported to E57 format.

From the filtered point cloud, a 3D TIN model of the newly created spaces was subsequently generated in SW Cyclone 3DR (Fig. 6, 7, 8, 9). The surface of the model was modified to a topologically pure form without redundant triangles and holes. Due to the large volume of data, the model was reduced (weakened) to approx. 30% with the aim of preserving the density of triangles in places with higher curvature so that it is possible to work with the model effectively in another SW as well. The resulting model was exported to OBJ format.

CONCLUSION

Overall, the excavation of the tunnels for Bukov URF II took place in very good conditions from the point of view of the stability of the underground work, which is also evidenced by the fact that the excavation was reinforced “only” by chemical composite anchor rods (bolts). Rock mass of worse quality was supported by the use of TH steel ribs only in two short sections of the corridors. Slightly deteriorated rock condition was observed near the crossing of corridors, where shotcrete was used to stabilize the excavation.

The high quality of the rock mass was also reflected in the high number of points of index classification systems. In the space of the newly excavated corridors, of the monitored parameters, the values

Model byl nejprve vyhotoven v podobě očištěného mračna bodů s hustotou cca 10000 bodů na 1 m². Z tohoto očištěného mračna byl generován 3D model v podobě obarvené a otexturované trojúhelníkové sítě. Vzniklé 3D modely čeleb byly připojeny do souřadnicového systému pomocí vřícovacích bodů. Vřícovací body byly průběžně (cca jednou měsíčně) geodeticky zaměřovány. Ke zpracování geodetických měření byl použit software Groma 13. 3D modely byly vytvářeny v software Agisoft Metashape Professional. Vzniklé modely byly exportovány do formátů E57 a OBJ.

LASERSCAN

Pomocí technologie laserového skenování bylo provedeno zaměření skutečného stavu nově vyražených prostor PVP Bukov II. S touto metodou je ve společnosti SG Geotechnika více než dvacetiletá zkušenost. Laserové skenování umožňuje přesně a rychle zachytit skutečný stav měřeného objektu. Prvotním výstupem ze skeneru je mračno bodů (point cloud). Jedná se řádově o milióny bodů rozmístěných v prostoru, které vznikají během procesu samotného skenování, kde každý bod mračna je definován vlastní prostorovou souřadnicí (x, y, z).

Cílem úlohy bylo poskytnout 3D model podzemních prostor v podobě upravené nepravidelné trojúhelníkové sítě (TIN). Předmětem měření byly nově vyražené prostory L4a, L4b, L5 a L6 včetně propojovacích chodeb L4c, L4d a V5-6 – celkem cca 500 metrů chodeb. Zaměření bylo provedeno pomocí laserového skenovacího systému od společnosti FARO.

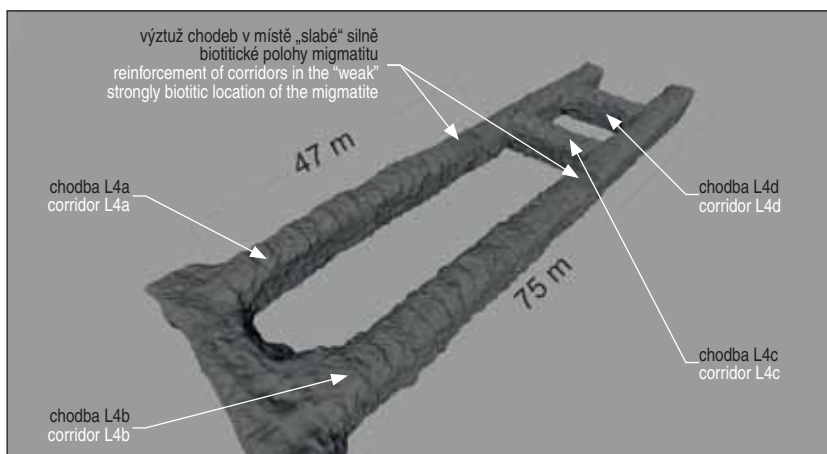
Získané mračno bodů bylo připojeno na důlní bodové pole v souřadnicovém systému S-JTSK a v jadranském výškovém systému. V další fázi zpracování bylo v SW Cyclone CORE provedeno filtrování mračna bodů od nežádoucího šumu. Takto upravená mračna bodů byla exportována do formátu E57.

Z filtrovaného mračna bodů byl následně v SW Cyclone 3DR generován 3D TIN model nově vyražených prostor (obr. 6, 7, 8, 9). Povrch modelu byl upraven do topologicky čisté podoby bez nadbytečných trojúhelníků a otvorů. Vzhledem k velkému objemu dat byl model decimován (zeslaben) cca na 30 % s cílem zachovat hustotu trojúhelníků v místech s vyšší křivostí tak, aby bylo možné s modelem dále efektivně pracovat i v jiném SW. Výsledný model byl exportován do formátu OBJ.

ZÁVĚR

Celkově probíhala ražba chodeb pro PVP Bukov II ve velmi dobrých podmínkách z hlediska stability podzemního díla, o čemž svědčí i zajištění výrubu „pouze“ lepenými kompozitovými kotevními tyčemi (svorníky). Zhoršené vlastnosti horninového masivu byly zajištěny použitím TH výztuže pouze na dvou krátkých úsecích chodeb. Mírně zhoršené vlastnosti byly pozorovány v blízkosti křížení chodeb, kde byl pro stabilizaci výrubu užitý stříkaný beton.

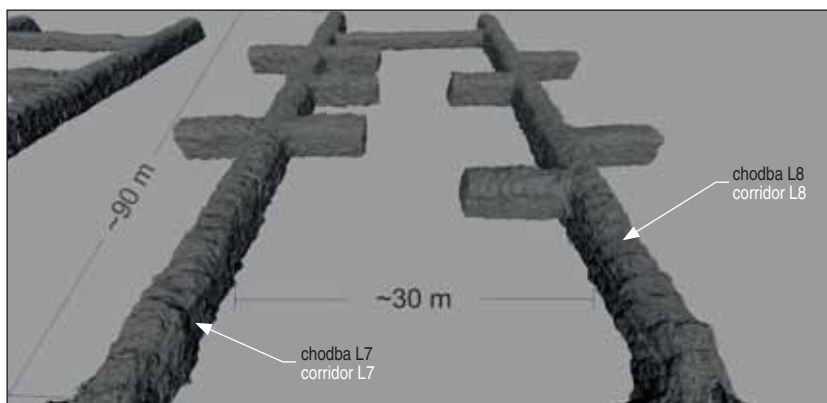
Vysoká kvalita horninového masivu se projevila také vysokým počtem bodů indexových klasifikačních systémů. V prostoru nově vyražených chodeb



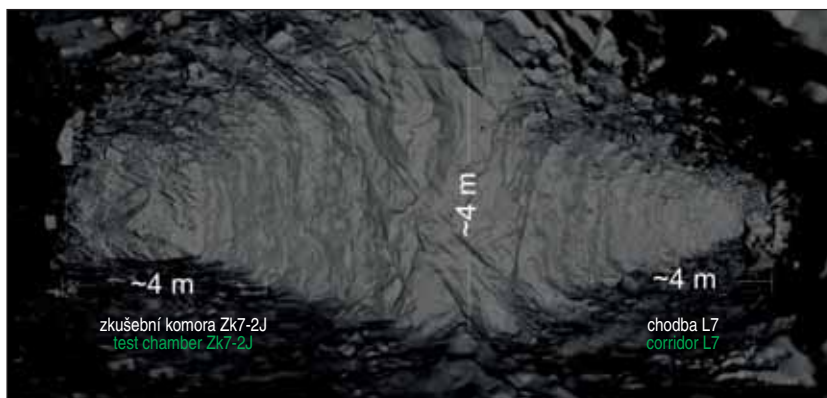
Obr. 6 Model chodeb L4a, L4b, L4c a L4d získaný z laserového skenování
Fig. 6 Model of L4a, L4b, L4c and L4d corridors obtained from laser scanning



Obr. 7 Model chodby L4a získaný z laserového skenování, detail
Fig. 7 Model of corridor L4a obtained from laser scanning, detail



Obr. 8 Model chodeb L7 a L8 získaný z laserového skenování
Fig. 8 Model of L7 and L8 corridors obtained from laser scanning



Obr. 9 Model chodby L7 získaný z laserového skenování, detail
Fig. 9 Model of corridor L7 obtained from laser scanning, detail

se ze sledovaných parametrů nejvíce měnily hodnoty spojené s diskontinuitami, jejich četností, charakterem povrchu a výplní. Komplexně v trojrozměrném prostoru řeší tyto parametry klasifikace RMR a Q systém. Ovšem z hlediska stability důlního díla reagovaly na problematické fenomény zajištěné přidáním výztuží všechny klasifikační systémy. Jako možná nejpraktičtější užití pro horninový masiv PVP II Bukov se jeví užití systému QTS s jednoduššími, snadno zjistitelnými a jednoznačně hodnocenými parametry, které ale ve výsledku dostačují pro vyhodnocení nutnosti užití vystrojení důlního díla. Souhrnně bylo vyraženo 10 chodeb a 13 zkušebních komor o celkové délce 740,8 metrů. Ražba nových prostorů probíhala od února 2021 do dubna 2024 a navazuje na původní chodby dolu Rožná. Pro každý nově vyražený záběr byl vyhotoven záběrový list obsahující geologickou dokumentaci ražeb, fotodokumentaci záběru, formulář s výpočtem indexových klasifikačních systémů QTS, RMR a Q systém a fotogrammetrický model.

Využití fotogrammetrie, které je v ČR poměrně nové, pomohlo při geotechnické dokumentaci čeleb k přesnějšímu výstupu. Sběr dat pro tyto modely není časově náročný. K takto vzniklému 3D modelu se lze dále vrátit a podrobně vyhodnotit strukturně geologické fenomény.

PODĚKOVÁNÍ

Práce byly realizovány v rámci projektu SÚRAO (SO2020-087) „Geologická a geotechnická charakterizace horninového prostředí – PVP Bukov II“. Autoři článku děkují všem svým kolegům, kteří se na výzkumu podíleli a také všem recenzentům, kteří přispěli k zlepšení kvality příspěvku.

Mgr. LUKÁŠ MAREČEK, Ph.D.,
Lukas.Marecek@geotechnika.cz, SG Geotechnika a.s.,
Mgr. LUCIE MAREDA,
mareda@surao.cz, SÚRAO,
RNDr. ZITA BUKOVSKÁ, Ph.D.,
Zita.Bukovska@geology.cz, Česká geologická služba,
RNDr. KAREL SOSNA, Ph.D.,
Karel.Sosna@geotechnika.cz, SG Geotechnika a.s

Recenzoval / Reviewed by: RNDr. Radovan Chmelař, Ph.D.

associated with discontinuities, their frequency, the character of the surface and fillings changed the most. The RMR and Q system deals with these parameters comprehensively in three-dimensional space. However, from the point of view of the stability of the excavation, all classification systems reacted to the problematic locations supported by the added reinforcement. The most practical use for the Bukov URF II rock mass appears to be the use of the QTS system with simpler, easily ascertainable and unambiguously evaluated parameters, which are, however, sufficient in the end to evaluate the necessity of excavation support. In total, 10 corridors and 13 test chambers with a total length of 740.8 meters were excavated. Excavation of the new underground space took place from February 2021 to April 2024 and follows the original corridors of the Rožná mine. A survey sheet containing geological documentation of the excavations, photo documentation of the survey, a form with the calculation of the index classification systems QTS, RMR and Q system and a photogrammetric model were prepared for each excavation round.

The use of photogrammetry, which is relatively new in the Czech Republic, helped to obtain a more accurate output during the geotechnical documentation of the excavation faces. Data collection for these models is not time-consuming. The 3D model created in this way can be revisited and structural geological phenomena can be evaluated in detail.

ACKNOWLEDGEMENT

The work was carried out as part of the SÚRAO project (SO2020-087) “Geological and geotechnical characterization of the rock environment – Bukov URF II”. The authors of the article thank all their colleagues who participated in the research and also all the reviewers who contributed to improving the quality of the paper

Mgr. LUKÁŠ MAREČEK, Ph.D.,
Lukas.Marecek@geotechnika.cz, SG Geotechnika a.s.,
Mgr. LUCIE MAREDA,
mareda@surao.cz, SÚRAO,
RNDr. ZITA BUKOVSKÁ, Ph.D.,
Zita.Bukovska@geology.cz, Česká geologická služba,
RNDr. KAREL SOSNA, Ph.D.,
Karel.Sosna@geotechnika.cz, SG Geotechnika a.s

LITERATURA / REFERENCES

- [1] NEA-OECD, 2013. UNDERGROUND RESEARCH LABORATORIES (URL). Radioactive Waste Management NEA/RWM/R(2013)2 February 2013, Dostupné z: <https://www.oecd-nea.org/rwm/reports/2013/78122--rwm-url-brochure.pdf>.
- [2] SMUTEK J.; AUGUSTA J.; DOHNÁLKOVÁ M.; GOLUBKO A.; HAUSMANNOVÁ L. et al. Program výzkumu, vývoje a demonstračních aktivit pro Podzemní výzkumné pracoviště Bukov. TZ 683/2023, SÚRAO, Praha. 2023.
- [3] BUKOVSKÁ Z.; RUKAVIČKOVÁ L.; CHABR T.; MORÁVEK R.; LEVÝ O. et al. Geologická a geotechnická charakterizace horninového prostředí – PVP Bukov II – první průběžná zpráva – TZ596/2022, SÚRAO, Praha. 2022.
- [4] BUKOVSKÁ Z.; RUKAVIČKOVÁ L.; CHABR T.; MORÁVEK R.; LEVÝ O. et al. Geologická a geotechnická charakterizace horninového prostředí – PVP Bukov II – druhá průběžná zpráva. – TZ 664/2023, SÚRAO, Praha, 2023. 172 s.
- [5] SOEJONO I.; BUKOVSKÁ Z.; RUKAVIČKOVÁ L.; ŠVAGERA O.; CHABR T. et al. Geologická a geotechnická charakterizace horninového prostředí – PVP Bukov II – třetí průběžná zpráva – TZ 744/2024, SÚRAO, Praha. 2024.
- [6] BIENIAWSKI, Z.T. (1989): *Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil and petroleum engineering*. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1989.
- [7] TESAŘ, O. Návrh klasifikace skalních hornin pro podzemní stavby v Praze – Sborník symposia – Podzemní stavby 77, Praha, část 1. *Zpravodaj metro*, roč. 8, č.1 (1977), s. 8–11.
- [8] TESAŘ, O. Klasifikace skalních hornin pro podzemní stavby v Praze. In: *Sborník přednášek konference Geotechnický prieskum pre tunely a navrhovanie tunelových ostění (II.díl)*, Vysoké Tatry-Štrbské Pleso, 1978, s. 110–111.
- [9] BARTON, N.; LIEN, R. a LUNDE J. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*, Vol. 6, Issue 4 (1974), s. 189–236.