

Technická zpráva 810/2025

URA – SYSTÉM KLASIFIKACE HORNINOVÉHO MASIVU PRO ÚČELY BUDOVÁNÍ HLUBINNÉHO ÚLOŽIŠTĚ V MĚŘÍTKU UKLÁDACÍ CHODBY

Autoři: Igor Soejono a kolektiv

NÁZEV ZPRÁVY: URA – Systém klasifikace horninového masivu pro účely budování hlubinného úložiště v měřítku ukládací chodby

NÁZEV PROJEKTU: Geologická a geotechnická charakterizace horninového prostředí – PVP Bukov II

IDENTIFIKACE V RÁMCI PROJEKTU:

Technická zpráva

ČÍSLO SMLOUVY: SO 2020–087

Bibliografický zápis: SOEJONO I., MORÁVEK R., BUKOVSKÁ Z., ŠVAGERA O., CHABR T., RUKAVIČKOVÁ L., ŘIHOŠEK J., KRYL J. (2025): URA – Systém klasifikace horninového masivu pro účely budování hlubinného úložiště v měřítku ukládací chodby. – TZ 810/2025, SÚRAO, Praha.

ŘEŠITELÉ:

Česká geologická služba¹, INSET, s.r.o.²

AUTORSKÝ KOLEKTIV: Soejono I.¹, Morávek R.², Bukovská Z.¹, Švagera O.¹, Chabr T.², Rukavičková L.¹, Řihošek J.¹, Kryl J.¹

Lucie Mareda

Manažer projektu (SÚRAO)

27. 2. 2025

Igor Soejono

Manažer projektu (Společnost Bukov II)

27. 2. 2025

Obsah

1	Úvod	12
1.1	Motivace a cíle	12
1.2	Požadavky na vhodné horninové prostředí	13
1.3	Požadavky na klasifikační systém	14
2	Geologická stavba PVP Bukov II	16
3	Konfigurace plánovaného hlubinného úložiště a specifika PVP Bukov II ...	21
4	Přehled existujících klasifikačních systémů	22
4.1	Konvenční geotechnické klasifikační systémy	22
4.1.1	RG-systém	22
4.1.2	RSR	23
4.1.3	Q a Q'	23
4.1.4	RMR a MRMR	23
4.1.5	QTS	24
4.2	Klasifikační systémy zaměřené na výběr a budování hlubinných uložišť	24
4.2.1	Švédský příklad – klasifikace HCR organizace SKB	24
4.2.2	Finský příklad – klasifikace RSC organizace Posiva	26
5	Nový systém klasifikace horninového prostředí URA	28
5.1	Přístup a strategie	28
5.2	Klasifikační parametry	29
5.3	Kritické struktury a kritický objem	30
5.3.1	Kritická struktura	30
5.3.2	Kritický objem	31
5.4	Kritické hydrogeologické projevy a bezpečnostní obálky	34
5.5	I. stupeň hodnocení	34

5.5.1	První fáze I. stupně	35
5.5.2	Druhá fáze I. stupně	37
5.6	II. stupeň	37
5.6.1	První fáze II. stupně	37
5.6.2	Druhá fáze II. stupně	38
5.7	3D model	38
6	Metodika stanovení parametrů, identifikace kritických struktur a 3D vizualizace	39
6.1	RQD	39
6.2	Karotáž	39
6.3	Geofyzikální průzkum	40
6.3.1	Seismická tomografie	40
6.3.2	Mělká refrakční seismika v modifikaci seismické refrakční tomografie	41
6.4	Vodní tlakové zkoušky	42
6.5	Posiva Flow Log	43
6.6	Strukturní dokumentace	43
6.6.1	Vrtná jádra	43
6.6.2	Stěny ukládacích chodeb	44
6.7	Hydrogeologická dokumentace	45
6.8	Identifikace kritických struktur a přiřazení kritických objemů	45
6.8.1	I. stupeň hodnocení	45
6.8.2	II. stupeň hodnocení	46
6.9	3D modelování	46
7	Výsledky použitých metod na PVP II	49
7.1	RQD	50
7.2	Karotáž	50

7.3	Geofyzikální průzkum.....	52
7.3.1	Seismická tomografie.....	52
7.3.2	Mělká refrakční seismika ve variantě seismické refrakční tomografie.....	54
7.4	Výsledky vodních tlakových zkoušek.....	56
7.5	Výsledky Posiva Flow Log.....	58
7.6	Strukturní záznam	59
7.6.1	Vrtná jádra S-24 a S-33.....	59
7.6.2	Stěny ukládacích chodeb L4a a L4b.....	60
7.7	Výsledky hydrogeologické dokumentace.....	63
8	Použití klasifikačního systému URA na příkladu PVP Bukov II	66
8.1	I. stupeň URA: zhodnocení vrtů S-24 a S-33.....	66
8.1.1	Průzkumný vrt S-24.....	66
8.1.2	Průzkumný vrt S-33.....	67
8.2	II. stupeň URA: zhodnocení chodeb L4a, L4b	67
8.2.1	Chodba L4a	67
8.2.2	Chodba L4b	68
8.3	Shrnutí výsledků hodnocení	69
8.3.1	Chodby L4a a L4b.....	69
8.3.2	Chodby L5, L6, L7 a L8.....	69
9	3D vizualizace.....	71
10	Implikace pro technické řešení HÚ.....	75
11	Diskuze	77
11.1	Závěry testování klasifikačního systému URA na PVP Bukov II.....	77
11.2	Specifika horninového prostředí PVP Bukov II.....	78
11.3	Limity a nejistoty použitých metod	78

11.4	Výhody a nevýhody klasifikačního systému URA.....	81
11.5	Perspektivy a doporučení	82
12	Závěry	84
13	Reference.....	86

Seznam elektronických příloh:

Elektronická příloha 1 Tabulkové hodnocení chodeb PVP Bukov II podle klasifikačního systému URA

Elektronická příloha 2 Strukturní data, rozměry, mineralogie a lokalizace kritických struktur dokumentovaných na stěnách chodeb PVP Bukov II

Elektronická příloha 3 Kritické hydrogeologické projevy v chodbách PVP Bukov II, primární popis průsaků, vývoj v čase, odběry vzorků podzemních vod a vazby průsaků na struktury

Elektronická příloha 4 3D PDF zobrazující prostorovou distribuci kritických struktur a jejich kritických objemů v severní části PVP Bukov II v prostoru chodeb L4a a L4b

Elektronická příloha 5 3D PDF strukturněgeologického modelu PVP Bukov II zahrnujícího kritické struktury na všech chodbách

Seznam použitých zkratk:

ČR	Česká republika
CS	kritická struktura
CV	kritický objem
EDZ	Excavation damage zone
FC	Fault core
FDZ	Fault damage zone
GCI	Groundwater Chemical Index
HRC	Host Rock Classification
K	hydraulická vodivost
MRMR	Mining Rock Mass
PFL	Posiva Flow Log
PVP	podzemní výzkumné pracoviště
QTS	Quality Testing System
RMR	Rock Mass Rating
RSC	Rock Suitability Classification
RSR	Rock Structure Rating
RQD	Rock Quality Designation
Sb.	Sbírka zákonů
SKB	Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co
TDS	Total Dissolved Solids
URA	Underground Rock Mass Assessment
VTZ	vodní tlaková zkouška

Abstrakt

Tato zpráva prezentuje nový klasifikační systém hodnocení podzemního horninového prostředí URA (Underground Rock Mass Assessment) vyvinutý v rámci řešení veřejné zakázky Geologická a geotechnická charakterizace horninového prostředí – PVP Bukov II. Tento systém byl navržen jako nástroj pro hodnocení vhodnosti podzemního horninového masivu pro hlubinné úložiště radioaktivního odpadu. Systém je primárně navržen pro prostředí vysoce metamorfovaných komplexů, typických pro velkou část horninového podloží České republiky, a posuzuje horninové prostředí z hlediska dlouhodobé bezpečnosti. Po zohlednění lokálních specifíků je systém použitelný i v jiných geologických podmínkách. Systém URA má flexibilní modulární strukturu hodnotící v I. stupni průzkumný vrt a ve II. stupni stěny ukládacích chodeb. Oba stupně hodnocení mají dvě fáze: první je založena na bodovém hodnocení klasifikačních parametrů a druhá je založena na určení kritických struktur a kritických objemů. Významným prvkem klasifikačního systému je důraz na zohlednění reálné 3D geometrie tektonické sítě a 3D vizualizace výsledků hodnocení. Zpráva také obsahuje výsledky testování nového klasifikačního systému na příkladu nového Podzemního výzkumného pracoviště Bukov II v bývalém dole Rožná v hloubce cca 500 m pod povrchem.

Klíčová slova

Klasifikační systém horninového prostředí, hlubinné úložiště, ukládání radioaktivního odpadu, PVP Bukov II, vrtný průzkum, geofyzikální průzkum, hydrogeologie, strukturní geologie, 3D model, zlomová síť

Abstract

This report presents a new classification system for the assessment of the underground rock environment URA developed within the contract Geological and geotechnical characterization of the rock environment – Bukov URF II. This system was designed as a tool for evaluation of the suitability of the underground rock mass for a deep repository for radioactive waste. The system is primarily designed for high-grade metamorphic complexes, typical of most of basement of the Czech Republic, and examines the rock mass in terms of long-term safety. The system is also applicable in other geological conditions after considering local specifics. The URA system has a flexible modular structure which evaluates the borehole in Stage 1 and the walls of the disposal tunnels in Stage 2. Both stages of evaluation have two phases: the first is based on the rating scores of the classification parameters and the second is based on the identification of critical structures and critical volumes. Important feature of the classification system is the focus on the real 3D geometry of the tectonic pattern and the 3D visualization of the results of classification. The report also contains the results of testing the new classification system on the example of the new Bukov underground research facility II in the Rožná mine at a depth of c. 500 m below the surface.

Keywords

Classification system of rock mass, host rock classification, rock suitability classification, deep geological repository, radioactive waste disposal, Bukov URF II, drilling survey, geophysical research, hydrogeology, structural geology, 3D model, fault pattern

1 Úvod

1.1 Motivace a cíle

S postupujícím procesem výběru lokality pro vybudování hlubinného úložiště radioaktivního odpadu v ČR (Hausmannová et al. 2024; Vokál et al. 2020) roste potřeba výzkumných postupů, které budou využité při samotné výstavbě ukládacích částí budoucího hlubinného úložiště. Koncept uložení RAO ve vhodném geologickém prostředí (v hloubce cca 500 m pod povrchem) počítá s jeho dostatečnou izolační funkcí a zpomalovací funkcí pro transport radionuklidů. Proces výběru lokality a konkrétního horninového bloku pro vybudování HÚ je založený na dlouhodobém multidisciplinárním výzkumu a využívá velké množství povrchových a vrtných (geologických, hydrogeologických a geofyzikálních) dat. Ačkoliv cílem primární povrchové fáze výběru lokality je nalezení dostatečně velké domény (v dané hloubce) s vhodnými horninovými vlastnostmi a nepostižené významnějšími poruchovými zónami, je jasné, že vybraný horninový blok bude v různé míře litologicky a strukturně heterogenní a postižený poruchami menšího měřítka. V rámci této podzemní oblasti bude proto na základě informací získaných v podzemí nezbytné posoudit vhodnost různých částí horninového masivu pro ražbu ukládacích chodeb a samotné ukládání. Jednotlivé části HÚ bude z hlediska dlouhodobé bezpečnosti potřeba zhodnotit pomocí geologických, geomechanických, hydrogeologických a transportních vlastností horninového prostředí. Na základě tohoto hodnocení bude nutné ve 3D identifikovat v hostitelském horninovém prostředí domény s relativně homogenními vlastnostmi, vhodné pro umístění ukládacích chodeb a obalových souborů. Hodnotící proces musí zohlednit jak lokální geologická specifika, tak i celkovou koncepci technického řešení HÚ.

Pro hodnocení horninového masivu z pohledu stability tunelů jsou používány klasické klasifikační systémy (např. Barton et al. 1987, Bieniawski 1989, Tesař 1990; Hudson a Johansson 2006; Wickham et al. 1974) shrnuté v kapitole 4.1. Nicméně tyto čistě geotechnické přístupy nezahrnují aspekty dlouhodobé bezpečnosti nezbytné pro HÚ, jako jsou izolační a transportní charakteristiky a potenciál k reaktivaci nebo seismické aktivitě. Další témata související s dlouhodobou bezpečností (např. budoucí vývoj klimatu, seismická a změna litostatického zatížení nebo regionálního napětového pole) jsou předmětem předchozího hodnocení na úrovni lokality. Další klasifikační systémy byly vyvinuté přímo pro účely budování HÚ (např. Äikäs et al. 2000; Andersson et al. 2000; Hagros 2006). Tyto systémy hodnocení horninového prostředí jsou však navrženy konkrétně pro prostředí Skandinávie a pro specifické technické řešení HÚ a nesplňují tak všechny požadavky dané geologickými poměry Českého masivu a koncepcí technického řešení HÚ v ČR. Také vzhledem k výraznému pokroku v některých oborech, zejména v oblasti 3D modelů, za poslední dvě dekády je nezbytné aktualizovat stávající klasifikační systémy pro potřeby ČR. Nový hodnotící systém horninového prostředí by měl být založen na nejnovějších vědeckých poznatcích, využívat moderní metodické přístupy a zohledňovat specifické geologické podmínky a technickou koncepci HÚ v ČR. Cílem klasifikačního systému není hodnotit horninový masiv ze stavebního a geotechnického pohledu. Během ražby bude nutné průběžně provádět standardní

tunelářskou klasifikaci, která určí stabilitu a další geotechnické parametry raženého díla. Na základě tohoto postupu bude dále navrhován další postup ražby a případně způsob technického zabezpečení důlního díla.

Na základě potřeby jasně definovaných kritérií a přístupu k hodnocení různých částí HÚ, vhodných pro prostředí vysoce metamorfovaných komplexů a pro koncepci technického řešení HÚ v ČR (Hausmannová et al. 2023), byl v rámci projektu Geologická a geotechnická charakterizace horninového prostředí – PVP Bukov II (Bukovská et al. 2021) navrhnut nový klasifikační systém hodnocení podzemního horninového prostředí URA (Underground Rock Mass Assessment). V rámci projektu byl v nově ražených chodbách Podzemního výzkumného pracoviště (PVP) Bukov II prováděn rozsáhlý geologický, strukturní, hydrogeologický, geotechnický a geofyzikální výzkum zahrnující velké množství metod (Bukovská et al. 2022, 2023, 2025a, 2025b; Soejono et al. 2024). Část těchto prací byla prováděna za účelem získání dat vstupujících do klasifikačního systému, jehož funkcionalita byla testována na nově ražených chodbách.

V této zprávě jsou prezentovány hodnotící mechanismy nového klasifikačního systému a představeny použité výzkumné metody. Dále jsou popsány výsledky těchto metod a celkové výsledky testovacího hodnocení chodeb PVP Bukov II klasifikačním systémem URA.

1.2 Požadavky na vhodné horninové prostředí

Horninový masiv, ve kterém bude umístěno HÚ, musí splňovat požadavky a doporučení Mezinárodní agentury pro atomovou energii (IAEA) a vyhlášky 378/2016 Sb., vydané Státním úřadem pro jadernou bezpečnost (SÚJB). Vhodnost horninového masivu pro HÚ a ukládání RAO je nutné posuzovat vzhledem k dlouhodobé bezpečnosti celého ukládacího systému. Konkrétní požadavky a požadované vlastnosti horninového prostředí se částečně liší podle měřítka a podle konkrétní části HÚ. Obecně musí horninové prostředí splňovat požadavky na mechanicky stabilní prostředí, na izolační a zpomalovací funkce pro transport radionuklidů a na zajištění vhodných podmínek pro systém inženýrských bariér. Hostitelská hornina obklopující ukládací obalový soubor a bentonitové těsnění by měla představovat mechanicky, hydrogeologicky a geochemicky stabilní a předvídatelné prostředí

Zmíněné předpisy stanovují množství omezení, limitů a nároků na vhodné horninové prostředí, nicméně pro splnění výše uvedených požadavků jsou naprosto nejdůležitější tyto vlastnosti:

- 1) celkově nízká hydraulická vodivost horninového prostředí ovlivňující rychlost transportu radionuklidů;
- 2) absence struktur, na kterých může dojít ke kritickému pohybu nebo seismické aktivitě.

Hlavním omezením je tedy umístění HÚ v dostatečné vzdálenosti od významných a potencionálně reaktivovatelných a propustných poruchových zón.

1.3 Požadavky na klasifikační systém

Základním úkolem klasifikačního systému je rozčlenit hodnocený horninový masiv určený pro výstavbu HÚ na části s relativně homogenními vlastnostmi relevantními pro dlouhodobou bezpečnost (kapitola 1.2). Do hodnotícího procesu je nutné zahrnout parametry, které budou charakterizovat tři skupiny vlastností horninového prostředí:

- 1) Mechanické vlastnosti, které jsou důležité jak pro dlouhodobou bezpečnost (potenciál k pohybu a destrukci obalového souboru), tak i pro výstavbu a stabilitu ukládacích chodeb. Tyto vlastnosti jsou ovlivněné především litologií hostitelské horniny (minerální složení, zrnitost, pórovitost, alterace atd.) a strukturním záznamem (charakter, intenzita a orientace duktilních a křehkých staveb, přítomnost poruchových zón, pevnostní a deformační vlastnosti, napěťový režim atd.).
- 2) Hydrogeologické vlastnosti, které jsou klíčové z hlediska potenciálu horninového masivu k migraci radionuklidů, ale mají i velký vliv na projektové řešení (např. přítoky do ukládacích vrtů a chodeb během ukládání). Tyto vlastnosti jsou, stejně jako ty mechanické, závislé především na horninových a strukturních parametrech a hydraulické vodivosti prostředí.
- 3) Chemické vlastnosti, které jsou pro bezpečnost HÚ důležité z důvodu interakcí inženýrských bariér (bentonitového těsnění a ukládacího obalového souboru) s hostitelským horninovým prostředím. Chemické vlastnosti jsou přímo ovlivněny geochemickými charakteristikami (chemickým složením přítomných horninových typů, včetně žilných těles a sekundárních výplní, mineralizací poruch) a hydrochemickými charakteristikami (chemickým složením podzemních vod). Nepřímo jsou ovlivněny transportními vlastnostmi puklinového systému a poruchových zón a celkovými hydrogeologickými poměry.

Některé charakteristiky horninového prostředí jsou důležité pro více skupin vlastností (např. hydrogeologické nebo strukturní poměry). Je zjevné, že mechanické a transportní vlastnosti horninového masivu jsou v první řadě závislé na intenzitě a geometrii celkového křehkého porušení horninového masivu a existenci lokalizovaných poruchových zón a s nimi souvisejících jevů, jako jsou alterace nebo přítomnost podzemní vody. Litologické charakteristiky jsou v porovnání s křehkým postižením méně významné, nicméně spolu vzájemně souvisí (např. fylosilikáty bohaté restitové polohy v metamorfní foliaci jsou reologicky výrazně slabší a snadněji reaktivovatelné než ostatní členy horninové asociace). Dále je nutné zmínit termální vlastnosti hornin, které jsou klíčové pro technické řešení HÚ (minimální vzdálenost mezi jednotlivými ukládacími vrty), a je třeba je zohlednit v projektových pracích, nicméně nemusí přímo vstupovat do samotného klasifikačního systému.

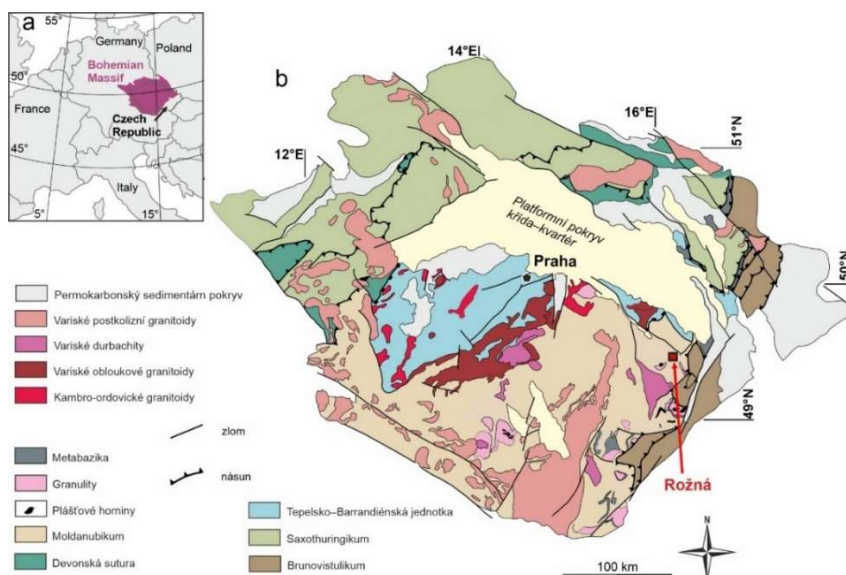
Základní požadavky na klasifikační systém jsou:

- 1) komplexnost: musí zohlednit všechny významné negativní vlivy na vlastnosti horniny;
- 2) jednoduchost: neměl by být příliš složitý, aby byl prakticky využitelný;

- 3) efektivita: měl by využívat pouze několik klíčových parametrů, které jsou snadno a přesně měřitelné;
- 4) flexibilita: měl by být relativně snadno modifikovatelný.

Klasifikační systém by tedy měl komplexně zhodnotit všechny nejvýznamnější negativní vlivy na vlastnosti horninového prostředí. Zároveň by měl být dostatečně jednoduchý pro praktické využití. Vzhledem k omezeným možnostem laboratorních analýz je nutné vybrat pouze několik klíčových parametrů, které co nejlépe reprezentují variabilitu horninového masivu a jsou snadno měřitelné v terénu v relativně krátkém čase. Výběr parametrů je kompromis mezi požadavkem na přesnost, dostupnost dat a náklady na jejich získání. Navrhovaný klasifikační systém by měl být verifikován v reálných podmínkách.

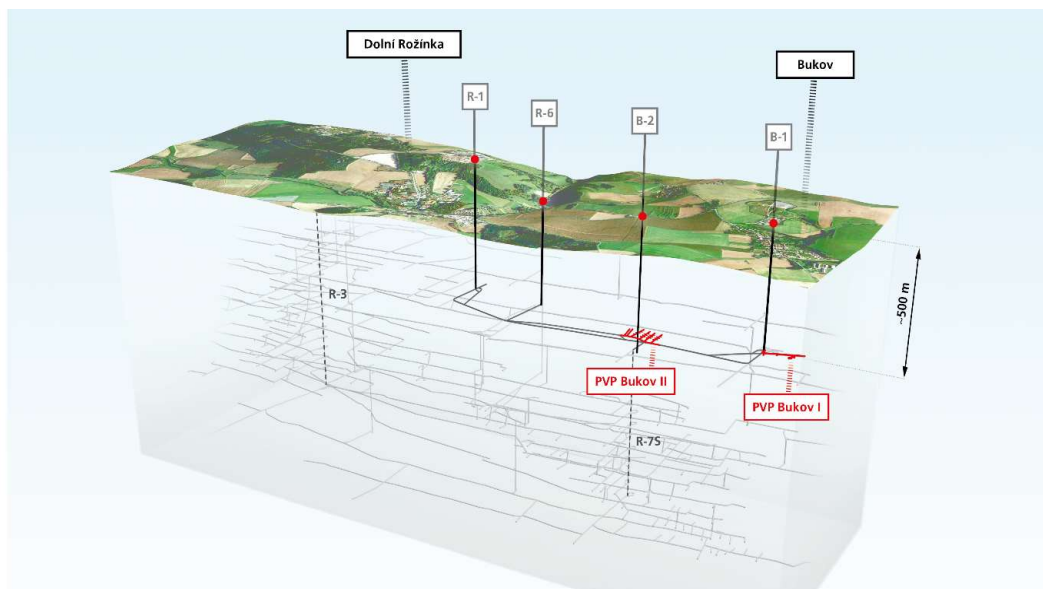
2 Geologická stavba PVP Bukov II



Obr. 1 Umístění PVP Bukov II (a) v rámci střední Evropy a (b) v rámci Českého masivu

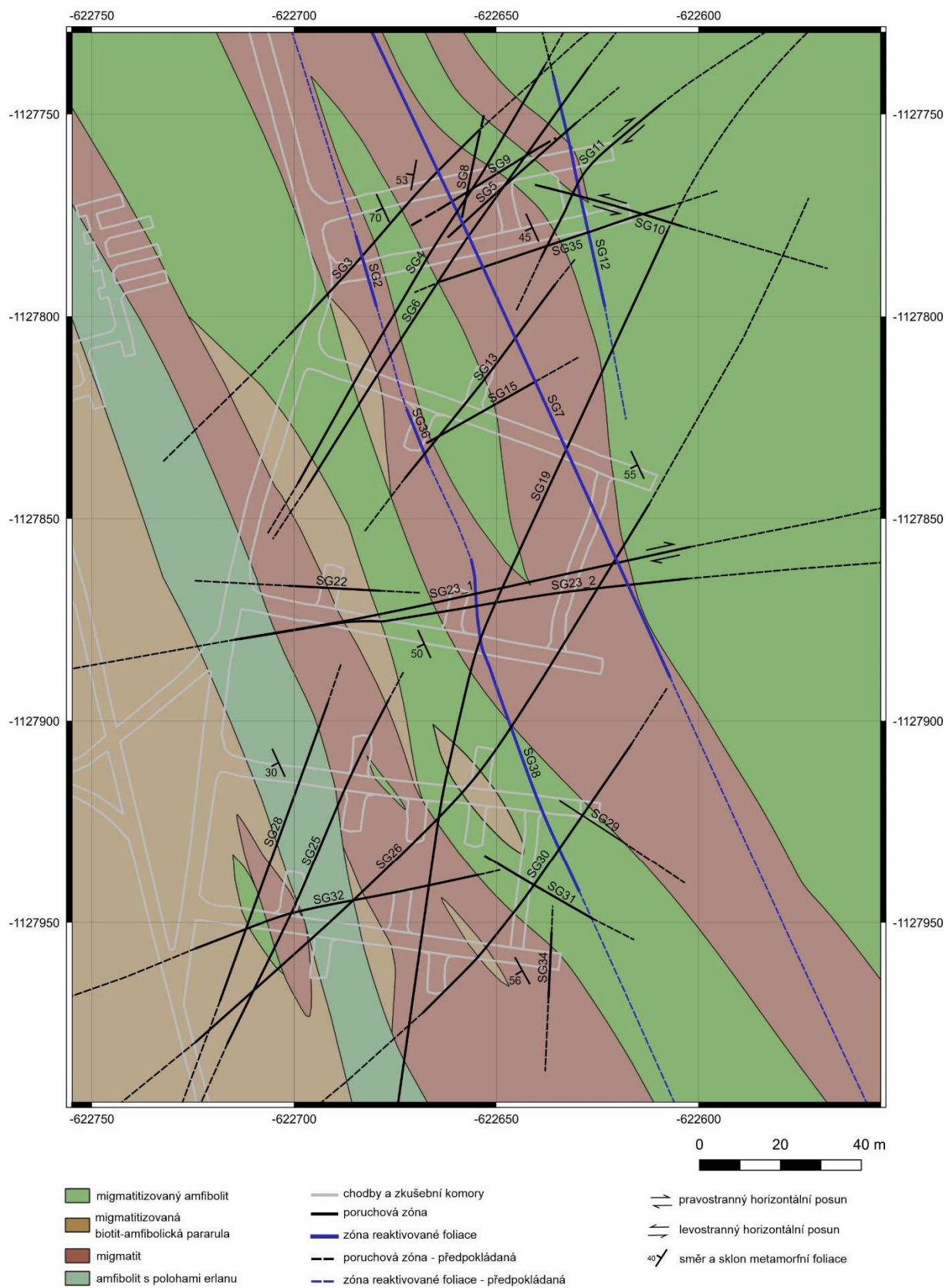
PVP Bukov II je novou částí již existujícího Podzemního výzkumného pracoviště Bukov (Bukovská et al. 2019), využívající infrastrukturu bývalého hlubinného uranového dolu Rožná (Kříbek et al. 2009). Důl Rožná se nachází ve východní části Českého masivu (Obr. 1), ve vysoce metamorfovaných horninách moldanubické oblasti (Dallmeyer et al. 1995), konkrétně v jednotce tzv. svrateckého moldanubika. Moldanubická oblast reprezentuje nejhlubší segment variského orogenního pásma (Matte et al. 1990; Schulmann et al. 2014) a obsahuje horniny metamorfované v podmínkách spodní a střední kontinentální kůry i fragmenty pocházející ze zemského pláště (Schulmann et al. 2005; Tajčmanová et al. 2010; Vrána et al. 1995).

PVP Bukov II se nachází na 12. patře dolu v hloubce cca 500 m pod povrchem (Obr. 2) a je tvořen relativně monotónní sekvencí migmatizovaných pararul, migmatitů a amfibolitů s vložkami erlanů (Obr. 3; Bukovská et al. 2023, 2025b; Soejono et al. 2024). Tato horninová asociace byla polyfázově metamorfovaná v hloubkách střední kůry a podmínkách amfibolitové facie. Maximální teplotně-tlakové podmínky metamorfózy byly stanoveny termodynamickým modelováním hornin z dolu Rožná na 700–750 °C a 0,5–0,7 GPa (Bukovská et al. 2020), což dobře odpovídá hodnotám dokumentovaným z hornin na povrchu (680–720 °C a 0,4–0,5 GPa; Tajčmanová et al. 2010). U–Pb datování detritických zirkonů z migmatitu z PVP Bukov I ukázalo, že sedimentární systém byl dotován především z neoproterozoických (cca 600 Ma) a v menší míře také paleoproterozoických zdrojů (cca 2,0 Ga) zdrojů. Nejmladší zirkony detritické populace indikovaly maximální stáří sedimentace na cca 500 Ma a datování vnějších zirkonových lemů určilo stáří maximálních podmínek vysokoteplotní metamorfózy na cca 345 Ma (Bukovská et al. 2019).



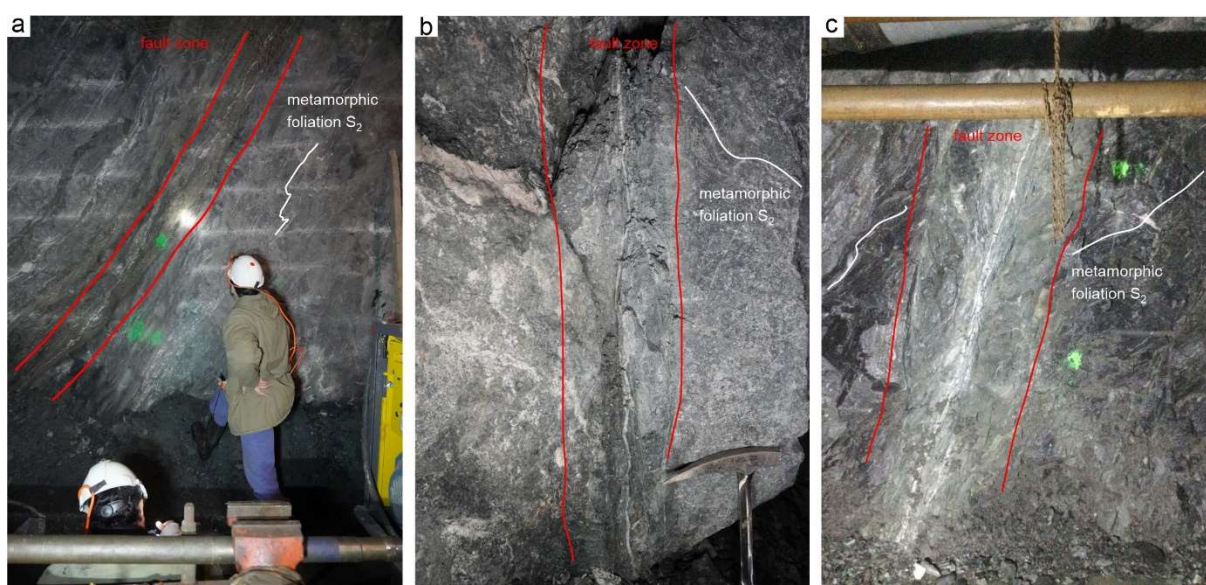
Obr. 2 Schéma bývalého dolu Rožná s lokalizací PVP Bukov II

Hlavní charakteristikou oblasti, významně ovlivňující parametry vstupující do hodnocení kvality horninového masivu, je komplikovaný vrásový vzor vzniklý heterogenní transpozicí primárně strmě orientované vysokoteplotní metamorfní foliace do mladší subhorizontální penetrativní metamorfní stavby (Obr. 4; Bukovská et al. 2019; Soejono et al. 2010; Tajčmanová et al. 2010). Tento strukturní záznam je výsledkem polyfázového deformačního a metamorfního vývoje v centrální části variského kolizního systému (Schulmann et al. 2005, 2008). Tyto metamorfní foliace tvoří výraznou mechanickou anizotropii, která je při vhodné orientaci snadno křehce reaktivovatelná. Metamorfní stavby a jejich geometricky komplikovaný vrásový vzor významně predisponují zlomové a puklinové systémy a jsou důležitým specifickým vysoce metamorfovaných metasedimentárních komplexů, ovlivňujícím strukturní a geomechanické charakteristiky horninového masivu.



Obr. 3 Strukturněgeologická mapa PVP Bukov II.

Regionální zlomový systém je tvořen výraznými střížnými zónami a zlomy subvertikální orientace ssz.–jjv. průběhu, na které je vázaná uranová mineralizace těžba (Kříbek et al. 2009). Dalším výrazným systémem jsou zlomové zóny s vsv. – zjz. průběhem. Mineralizace v dole Rožná je rozdělena do tří fází (Kříbek a Hájek, 2005; Kříbek et al. 2009): před-uranová křemenná-karbonátová-sulfidová mineralizace (296–281 Ma), uranová mineralizace (277–264 Ma) a post-uranová karbonátová-křemenná-sulfidová mineralizace (233–227 Ma). Stáří jílových výplní zlomových zón bylo pomocí K–Ar datování stanoveno na cca 290 Ma pro zlomy s průběhem VSV–ZJZ a cca 250 Ma pro zlomy s průběhem SSV–JJZ (Bukovská et al. 2019). Puklinový systém dokumentovaný na PVP Bukov I i PVP Bukov II zahrnuje dva vzájemně ortogonální sady extenzních puklin subvertikální orientace a průběhy SZ–JV a SV–JZ (Bukovská et al. 2019, 2025b; Soejono et al. 2024).



Obr. 4 Terénní fotografie ukazující příklady litologických typů a strukturních fenoménů PVP Bukov II, poruchové zóny reprezentující typické kritické struktury vstupující do hodnocení horninového masivu. (a) Zóna křehké reaktivace metamorfní foliace a amfibolitu vyplněná chloritem a jílem. (b) Kataklastická zóna postihující penetrativní metamorfní foliaci v migmatitu. (c) Široká zlomová zóna v pararule s jádrem vyplněným křemenem, jílem a karbonátem a silně chloritizovanou obálkou.

Oblast dolu Rožná spadá do hydrogeologického rájónu č. 6560 Krystalinikum v povodí Svatky (vyhláška č. 5/2011 Sb.). Puklinově propustné horniny krystalinika jsou na povrchu pokryty zvětralinovým pláštěm a různými typy kvartérních sedimentů s převládající průlinovou propustností. Pásmo přípovrchového rozpojení puklin zasahuje obvykle do hloubek několik desítek metrů, dále do hloubky je oběh podzemní vody vázán na významné zlomy a poruchové zóny. Hydraulická vodivost hornin krystalinika se v hloubkách do 100 m pod zemským povrchem pohybuje nejčastěji v řádu 10^{-7} m·s⁻¹. Z hydrodynamických testů prováděných v prostoru dolu Rožná vyplývá, že je zde možné očekávat u propustných poloh hydraulické vodivosti v řádu 10^{-6} a 10^{-7} m·s⁻¹ a u běžně či slabě porušených úseků v rozmezí 10^{-11} až 10^{-8} m·s⁻¹ (Bukovská et al. 2022). V rámci dolu byla zjištěna výrazná hloubková stratifikace chemického složení podzemní vody. V mělkých částech horninového prostředí, v oxidační zóně se vyskytují podzemní vody typu Ca-SO₄, hlouběji převažuje hydrochemický typ

Ca-HCO₃ (vody v PVP Bukov I, spodní hranice výskytu 12. patro), dále se vyskytují vody typu Na-HCO₃ a na 24. patře dolu byl zaznamenán typ Na-Cl. Průměrné hodnoty celkového obsahu rozpuštěných látek (TDS) se u jednotlivých hydrochemických typů liší pouze minimálně od 270 mg.l⁻¹ u typu Ca-SO₄ po 370 mg.l⁻¹ u typu Na-Cl (Bukovská et al. 2017). Vlivem oxidačních podmínek dolu se primární podzemní vody s převahou hydrogenuhličitanů mění na důlní vody s převahou síranů. Současně výrazně vzrůstá TDS s průměrnými hodnotami 700 až 1000 mg.l⁻¹. Hydrogeologické poměry PVP Bukov II odpovídají puklinovému prostředí hydrogeologického masivu antropogenně ovlivněného ražbou a provozem uranového dolu i samotného PVP Bukov II. Specifikem hornin PVP Bukov II je značná hydraulická heterogenita, kdy se málo porušený masiv vyznačuje extrémně nízkou hydraulickou vodivostí, a naopak místa s izolovanými puklinami či puklinovými zónami vykazují o několik řádů vyšší propustnost a jsou výrazně hydraulicky vodivé (Bukovská et al. 2023, Soejono et al. 2024). Míra zvodnění v prostoru PVP Bukov II je ve srovnání s jinými částmi dolu velmi nízká. Většina průsaků do chodeb má charakter vlnutí stěn s občasnými úkapy. Nejvyšší měřitelná vydatnost relativně soustředěného přítoku je přibližně 0,001 l.s⁻¹. Ražbou chodeb dochází k rozvolňování a otevírání foliačních ploch, které postupně vytvářejí vodivou síť v okolí výrubu. Podzemní vody v prostoru PVP Bukov II jsou typu Na-HCO₃ až Na-SO₄, převládají smíšené typy vod. Celkový obsah rozpuštěných látek (TDS) je v rozmezí od 200 do 370 mg.l⁻¹ a podzemní vody mají zásaditý charakter s pH 8,4 až 9,2 (Bukovská et al. 2023).

3 Konfigurace plánovaného hlubinného úložiště a specifika PVP Bukov II

Klasifikační systém URA prezentovaný v této zprávě je navržen a testován s ohledem na předpokládanou koncepci technického řešení hlubinného úložiště v ČR (Hausmannová et al. 2023). Tato koncepce detailně specifikuje technické řešení a parametry jednotlivých částí celého komplexu hlubinného úložiště. V této kapitole jsou stručně vysvětleny pouze základní termíny související s měřítkem klasifikačního systému – tj. ukládací chodbou.

Podzemní část hlubinného úložiště bude zahrnovat různé typy chodeb, které budou zajišťovat logistiku související s ražbou úložiště a následně s ukládáním samotným. Na tzv. ukládacím horizontu se bude nacházet systém páteřních a spojovacích chodeb, propojujících jednotlivé ukládací sekce. Ukládací sekce se bude skládat z ukládacích chodeb, ve kterých budou samotné ukládací vrtý. Ukládací chodba bude sloužit k dopravní obsluze během budování ukládacích vrtů a samotnému ukládání RAO. Pro ukládací chodby se předpokládá výška cca 6,7 m a šířka 4 m (Grünwald et al. 2017). V blízkosti ústí zaplněné ukládací chodby bude umístěná betonová těsnicí zátka o celkové šířce 2750 mm (Svoboda et al. 2022). V současnosti se předpokládá vertikální způsob ukládání do svislých vrtů. Ukládací vrt je velkoprofilový vrt umístěný vertikálně do počvy ukládací chodby, ve kterém bude uložen jeden ukládací obalový soubor. Pro ukládací vrt se předpokládá průměr 1650 mm a hloubka cca 6,5 m nebo 8 m podle typu ukládaného materiálu (Svoboda et al. 2022). Minimální vzdálenost mezi jednotlivými ukládacími vrtý je závislá na typu ukládaného materiálu a tepelných vlastnostech horninového masivu a pohybuje se v rozsahu od 4,6 m do 15,25 m (Grünwald et al. 2017).

V kontextu PVP Bukov II, pro které je systém hodnocení URA navržen, jsou ukládací chodby reprezentovány laboratorními chodbami L4a, L4b, L5, L6, L7 a L8, na kterých je v této zprávě nový klasifikační systém testován.

V době zahájení projektu Geologická a geotechnická charakterizace horninového prostředí – PVP Bukov II (2021) byla v technickém konceptu HÚ i varianta horizontálních ukládacích vrtů, která byla později opuštěna (Hausmannová et al. 2023). V průběhu ražby nebylo technicky možné (nebyly dostatečně odkryté, rovné a suché) provádět dokumentaci počev a výzkumné práce byly prováděny na bocích ražených chodeb. Proto byly v rámci projektu ve II. stupni hodnoceny stěny chodeb.

4 Přehled existujících klasifikačních systémů

Tato kapitola shrnuje nejčastěji využívané metodiky používané pro posouzení a kategorizaci kvality a homogenity horninového masivu. Přístupy hodnocení horninového prostředí je možné rozdělit na konvenční geotechnické klasifikační systémy, vyvinuté a využívané pro účely podzemního stavitelství, a klasifikace navržené přímo pro výběr a budování hlubinného úložiště. Dále se využívané systémy rozdělují na popisné a numerické. V popisných klasifikačních systémech jsou pro jednotlivé parametry stanoveny tzv. třídy nebo kategorie, určené na základě vlastností a kvality horniny. V případě numerických klasifikačních systémů jsou vstupní parametry číselně kvantifikovány na základě jejich charakteru. Jednotlivé systémy se od sebe liší jednak používanými parametry a také použitým algoritmem a jsou často navrženy pro specifické využití nebo konkrétní geologické podmínky.

4.1 Konvenční geotechnické klasifikační systémy

Konvenční geotechnické klasifikační systémy jsou primárně navrženy pro posouzení stability podzemního díla, k určení způsobu ražby a stanovení způsobu zabezpečení výrubu. Nepracují s požadovanou dlouhodobou bezpečností horninového prostředí, nicméně mnoho bezpečnostních aspektů koreluje s inženýrsko-geologickými omezeními. Tyto způsoby hodnocení jsou používány převážně pro tunely budované v relativně malých hloubkách, zatímco úložiště radioaktivního odpadu jsou navrhovány v hloubkách dosahujících stovek metrů. Konvenční klasifikační systémy nezohledňují požadovanou vzdálenost vhodného prostředí od poruchových zón. V minulosti bylo publikováno velké množství metodik hodnocení horninového prostředí a studií o vlivu geologických a tektonických vlastností na ražbu a stabilitu tunelů (Lauffer 1958; Hakapää 1968; Brekke a Howard 1972; Maijala et al. 1973; Hoek a Brown 1982; Hudson 1992; Palmén 1999). Podrobněji jsou dále shrnuty principy novějších systémů nejčastěji používaných v geologických podmínkách podobných Českému masivu.

4.1.1 RG-systém

RG-systém je popisný inženýrsko-geologický klasifikační systém (Korhonen et al. 1974; Niini 1976; Gardemeister et al. 1976) vyvinutý pro finské prostředí zahrnující výhradně prekambričké krystalinické horniny. Jedná se o postup pro popis vlastností horninového masivu použitelný v různých fázích výzkumu, plánování a výstavby různých typů podzemních staveb. V rámci RG-systému je kvalita horninového masivu vyjádřena pomocí dvou skupin klasifikačních parametrů: kvalita horniny a stupeň porušení horniny.

Kvalita horniny určuje geotechnické vlastnosti horniny a je definovaná na základě těchto parametrů: stupeň zvětrání (4 třídy), textura (3 třídy), převažující zrnitost (4 třídy) a minerální složení (7 skupin).

Stupeň porušení horniny popisuje celkovou frakturaci horniny a je definovaný na základě těchto parametrů: typ puklin (4 třídy), četnost puklin (4 třídy), charakter puklin (3 skupiny s podskupinami).

4.1.2 RSR

RSR (Rock Structure Rating; Wickham et al. 1974; Skinner 1988) je kvantitativní metodou pro hodnocení kvality horninového masivu. Tato klasifikace zahrnuje geologické/geotechnické a konstrukční parametry. Geologické parametry zahrnují typ horniny, puklinovou síť, orientace ploch nespojitosti vůči orientaci tunelu, úhel vnitřního tření na plochách diskontinuity a stupeň alterace. Konstrukční parametry jsou velikost díla, směr a způsob ražby. Index kvality RSR je součet vážených hodnot stanovených pro každý parametr. Pro RSR = 78 je kvalita masivu klasifikována jako velmi dobrá (není nutné vyztužení) a pro RSR = 27 je kvalita masivu velmi špatná (jsou nutné silné vyztužné konstrukce).

4.1.3 Q a Q'

Q-systém (Quality Index; Barton, 1987; Singh a Goel 2011) se používá především pro tunely. Je také vhodný pro hodnocení méně kvalitního horninového prostředí. Hodnotí vlastnosti horninového masivu pomocí šesti klasifikačních parametrů, kterými jsou pro různé hodnoty přiřazeny body: RQD (rozsah 10–100), počet diskontinuit (rozsah 0,5–20), charakter stěn diskontinuit – drsnost (rozsah 0,5–4), charakter stěn diskontinuit – výplň (rozsah 0,75–20), přítok a tlak podzemní vody (rozsah 0,05–1,0), napjatostní vlastností masivu (rozsah 0,5–400). Výsledné hodnocení je v rozsahu mezi hodnotami 0,001 až 1000. Na základě počtu Q bodů se kvalita horninového masivu rozděluje do devíti kategorií. Nejlepší kategorie je “výjimečně dobrý” (400–1000 bodů), střední kategorie je “slušný” (4–10) a nejhorší kategorie je “výjimečně špatný” (0,001–0,01 bodů).

Stanovení napjatostních vlastností je díky velkým hodnotám napětí ve větších hloubkách problematické, a v mnoha případech nejsou napjatostní podmínky horninového prostředí konstantní a homogenní. Pro tyto aplikace byl Q-systém modifikován na Q' klasifikace (Grimstad a Barton 1993), ve které není zahrnutý poslední parametr napjatostních vlastností masivu.

4.1.4 RMR a MRMR

RMR (Rock Mass Rating; Bieniawski 1989) kvantifikuje kvalitu horninového masivu pomocí šesti parametrů: pevnost v prostém tlaku, RQD, vzdálenost puklin, charakter diskontinuit (výplň), vliv podzemní vody, orientace diskontinuit vzhledem k průběhu ražby. Jednotlivým parametrům jsou přiřazeny body. Body prvních pěti parametrů jsou sečteny a následně redukovány podle orientace diskontinuit vzhledem k probíhajícímu směru ražby. Kvalita horninového masivu je vyjádřena indexem RMR v rozsahu 0–100 bodů. Na základě indexu RMR se kvalita horninového masivu rozděluje do pěti kategorií: velmi dobrý (81–100), dobrý (61–80), slušný (41–60), špatný (21–40) a velice špatný (0–20).

MRMR (Mining Rock Mass Rating; Kendorski et al. 1983; Laubscher 1984) je upravený systém RMR pro hornické účely, kde není zapotřebí tak přísných požadavků na stabilitu a opěrné systémy jako pro ostatní podzemní díla. Systém MRMR přebírá základní principy RMR a dále je upravuje v závislosti na konkrétním důlním prostředí a zahrnuje také další faktory, jako např. zvětrávání, orientaci diskontinuit a účinky trhacích prací.

4.1.5 QTS

QTS (Quality Testing System; Tesař 1990) je česká klasifikace pro hodnocení horninových vlastností zaměřená primárně na ordovické sedimentární sekvence tvořící většinu podloží Prahy a je používána při stavbě pražského metra. QTS systém zohledňuje průběžnost diskontinuit, hloubku posuzovaného díla pod povrchem (v novějších verzích je tento parametr nahrazen rozevřením diskontinuit), orientaci ploch diskontinuit vzhledem k ražbě, průměrnou vzdálenost a rozevření diskontinuit, charakter (výplň) diskontinuit, pevnost horninového materiálu v prostém tlaku a přítok podzemní vody a jeho tlak. QTS systém kvantifikuje vlastnosti horninového prostředí přiřazením klasifikačních bodů TS. Celkový součet bodů se snižuje v případě nevhodné orientace diskontinuit vzhledem k orientaci tunelu, přítomnosti nevhodné výplně, přítomnosti podzemní vody apod. Za velmi dobrý horninový masiv je považovaný ten s 82 TS body a velmi špatné horninové prostředí má 30–44 TS bodů.

4.2 Klasifikační systémy zaměřené na výběr a budování hlubinných uložišť

Pro účely budování HÚ mají některé země svůj vlastní přístup vycházející z lokálních geologických podmínek a vedoucí místně-specifickému hodnocení horninového prostředí pro výstavbu HÚ. Níže jsou uvedené dva systémy použité pro podobné geologické prostředí krystalinických komplexů a aktuální situaci přípravy HÚ v ČR.

4.2.1 Švédský příklad – klasifikace HCR organizace SKB

HCR (Host Rock Classification; Hagros 2006) je systém klasifikace horninového masivu pro potřeby ukládání radioaktivního odpadu ve Švédsku (SKB). Byl vyvinutý a testovaný pro skandinávské geologické poměry prekambriického krystalinického basementu. Důležitým specifikem je výrazné odlehčení horninového masivu vlivem kvartérního ústupu ledovců a s tím spojeným nebezpečím seismické aktivity. Další skandinávské specifikum dané blízkostí moře je výskyt slaných podzemních vod, které výrazně ovlivňují parametr chemického indexu podzemní vody. Podle konceptu ukládání radioaktivního odpadu KBS-3V (SKB 1983; Tanskanen a Palmu 2004), by měl být odpad uložen do vertikálních 7–8 m hlubokých studen hloubených do dna ukládacích tunelů.

Za účelem uložení radioaktivního odpadu posuzuje HCR-systém horninové prostředí ve třech měřítcích. Největší měřítko (dále v textu označováno jako M1, "úložiště") hodnotí, zda je v dané lokalitě vůbec úložiště možné realizovat. V menším měřítku (dále v textu označováno

jako M0,1, “tunel”) se hodnotí dílčí části samotného hlubinného úložiště (ukládací chodby), v nejmenším hodnoceném celku (dále v textu označováno jako M0,01) se hodnotí místa jednotlivých ukládacích vrtů (“kanystr”).

Pro jednotlivá měřítká jsou využity různé hodnotící parametry (Tab. 1). Souhrnně vyjádřené vlastnosti masivu jsou důležitější než jednotlivé hodnotící faktory. V případě, že jeden faktor nabývá nepříznivých hodnot, lze tento parametr kompenzovat jiným parametrem. Dále některé parametry mohou mít nižší nebo vyšší váhu. Jakýkoliv parametr může nabýt takové limitní hodnoty, že už jej nelze kompenzovat žádnými opravnými faktory. Limitní hodnoty parametrů není možné stanovit s obecnou platností, budou závislé na lokálních geologických podmínkách.

Tab. 1 Sady hodnotících parametrů pro jednotlivá měřítká hodnocení horninového masivu HCR

hodnocený parametr / hodnocené měřítko		M1	M0,1	M0,01
poruchové zóny	1. délka	ano	ano	ano
	2. rozevření	ano	ano	ano
	3. transmisivita (m ² /den)	ano	ano	ano
	4. Q'	ano	ano (přesnost 1 m)	ano (přesnost 1 m)
5. pevnost horniny / napětí masivu		ano	ne	ne
6. hydraulická vodivost K		ano	ano	ano
7. geochemický index podzemní vody		ano	ne	-
8. rozevření puklin		ne	ne	ano
9. délka puklin		ne	ne	ano

Pro měřítko M1 je za nejdůležitější faktor považována přítomnost poruchových zón. Existence poruchové zóny nelze kompenzovat žádným dalším parametrem. Pro ostatní parametry může například platit, že méně vhodné chemické parametry podzemní vody (GCI index) mohou být kompenzovány nižším koeficientem hydraulické vodivosti (K). V měřítku M1 vstupují do hodnocení především data z povrchového, ale i z podzemního průzkumu. Cílem prací je předběžné vymezení hlavních poruchových zón a rozdělení lokality do dílčích bloků oddělených poruchovými zónami (Andersson et al. 2000). Výsledkem hodnocení v tomto měřítku by mělo být rozhodnutí, zda je lokalita vhodná pro realizaci úložiště.

Hodnocení v měřítku M0,1 je určené pro ukládací tunely, ale lze je využít i pro přístupové (hlavní, centrální) tunely s tím, že požadavky pro ukládací tunely jsou adekvátně vyšší. Do hodnocení vstupují pouze data přímo z podzemí a průzkumné práce zahrnují dva stupně. První stupeň je založen na pilotních horizontálních průzkumných vrtech provedených z centrální chodby v místech předpokládaných tunelů. Druhým stupněm je dokumentace během ražby a následný průzkum samotných vyražených tunelů. V tomto měřítku je důležitým aspektem vzdálenost poruchových zón od ukládacích tunelů a nejistota, zda tato vzdálenost je dostačující. V případě blízkosti poruchové zóny k chodbě je pak vyšší význam parametrů Q' a K. Mírně snížená hodnota parametru Q' může být nahrazena lepším parametrem hodnoty K. V případě nepříznivosti obou parametrů je celková vhodnost horninového masivu výrazně snížena. Hodnoty zjišťovaných parametrů z pilotních vrtů jsou následně srovnávány

s hodnotami zjištěnými během ražby tunelu. V rámci přístupové chodby (M0,1) může být přítomná poruchová zóna kategorie C (Hagros 2006), ale nesmí být zastižena v ukládacím prostoru (M0,01). Požadovaná vzdálenost takové struktury od ukládacího prostoru je v řádech metrů, tak aby její přítomnost významně nesnižovala stabilitu nejbližšího úložného prostoru.

Pro měřítko M0,01 vstupují do hodnocení data ze tří stupňů průzkumu. Prvním stupněm je detailní mapování počvy tunelu, druhým je studium vertikálních průzkumných vrtů v místech předpokládaných ukládacích vrtů a posledním stupněm je dokumentace samotných vrtů. Do posouzení vhodnosti úložného prostoru vstupují tyto parametry: existence poruchových zón a jejich vzdálenost od úložného prostoru, hydraulická vodivost, hodnota Q' pro vzdálenosti 1 m, výskyt puklin mocnějších než definovaná limitní hodnota na počvě tunelu, výskyt puklin delších než definované limitní hodnoty, které protínají úložný prostor.

4.2.2 Finský příklad – klasifikace RSC organizace Posiva

Kvalita horninového prostředí na finských výzkumných lokalitách byla hodnocena pomocí klasifikačního systému založeného na inženýrsko-geologickém popisu horninových charakteristik rozšířeném o další vstupní parametry (Äikäs et al. 1999 a, b, c; 2000). Klasifikace je založena na systematické analýze geologických dat získaných z průzkumu lokality. Cílem bylo zhodnocení masivu z hlediska možnosti výstavby, vytvoření plánů na umístění a konstrukci úložiště přizpůsobených podmínkám konkrétní lokality. Prvotním účelem nebylo vyvinout novou metodu klasifikace horninového masivu, ani nebyla zvažována dlouhodobá bezpečnost úložiště. Přístup k hodnocení horninového masivu vycházel z údajů získaných z povrchového průzkumu lokalit, z měření ve vrtech a mezi vrty a z 3Dmodelů vytvořených pro dané lokality. Použitá metodika byla postavena na využití Q-systému (kapitola 2.1.4) a navíc zahrnovala informace o litologických vlastnostech, četnosti puklin, napětí na puklinách, rozevření puklin, intenzitě zvětrání, hydrogeologických vlastnostech (intenzita přítoků a chemické složení podzemní vody) a strukturních charakteristikách poruchových zón. Dále byly výsledky klasifikace zhodnoceny s ohledem na pět prostorových proměnných: typ horniny, umístění vzhledem k puklinovým zónám, hloubku, počet bloků a počet vrtů. Na základě kvantifikace všech vstupních parametrů je možné zařadit hodnocenou lokalitu do jedné ze tří kategorií definující konstrukční náročnost: normální, náročná a velmi náročná.

Nejnovější nástroj hodnocení kvality horninového prostředí RCS (Rock Suitability Classification) byl vyvinutý finskou společností Posiva, za účelem výběru částí horninového masivu vhodných pro umístění RAO v rámci lokality Olkiluoto (McEwen et al. 2012; Hagros et al. 2022). Tento systém byl navržen s ohledem na místní geologická a hydrogeologická specifika. Hodnotící postup vychází z bezpečnostní koncepce společnosti Posiva a hlavním účelem je přizpůsobit návrh úložiště lokálním geologickým podmínkám tak, aby dlouhodobá bezpečnost ukládání byla maximálně podpořena přirozenou bariérou horninového prostředí. Systém RCS posuzuje celkem patnáct kritérií vhodnosti hornin, zahrnujících především hydrogeochemické vlastnosti podzemní vody, hydrogeologické charakteristiky a mechanickou stabilitu (strukturněgeologické charakteristiky). Část těchto kritérií souvisí s takzvanými kritickými strukturami, což jsou klíčové prvky negativně ovlivňující dlouhodobou bezpečnost.

Kritické struktury jsou poruchy nebo zlomy, na kterým může potenciálně dojít k dostatečně velkému pohybu ohrožujícímu integritu ukládacího kanystru. Kritický objem je okolí kritické struktury s výrazně horšími vlastnostmi horninového prostředí. V systému RCS jsou kritické struktury a jejich kritické objemy rozděleny do tří kategorií, na základě seismického potenciálu struktury a jejího významu pro proudění podzemní vody. Kritéria mechanické stability definují kategorie kritických objemů, které nesmí zasahovat do jednotlivých částí HÚ.

RCS klasifikace posuzuje horninový masiv v různých měřítkách v pěti fázích, odpovídajících různým etapám budování a různým částem HÚ:

- 1) fáze návrhu uspořádání HÚ,
- 2) fáze centrální chodby,
- 3) fáze ukládací chodby,
- 4) ukládacího vrtu,
- 5) ověřovací fáze.

První fáze je založena především na povrchovém, vrtném a geofyzikálním průzkumu lokality. Výsledky první fáze hodnocení přímo ovlivňují uspořádání ukládacích panelů, přístupových chodeb a dalších podzemních částí HÚ. Fáze 2, 3 a 4 vždy zahrnují primární klasifikaci na základě dat z pilotního vrtu a sekundární klasifikaci provedenou po ražbě tunelu. Pátá fáze po určité době opakovaně hodnotí vhodnost prostředí a plnění některých kritérií (hydrogeologická). Tato fáze je volitelná a má za cíl potvrdit, že nedošlo v čase ke změně hydrogeologických podmínek.

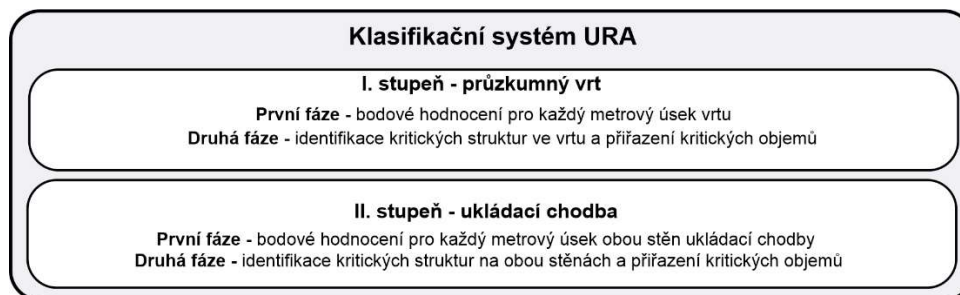
5 Nový systém klasifikace horninového prostředí URA

Prezentovaný systém klasifikace horninového prostředí URA je navržený pro účely ražby ukládacích chodeb a umístění ukládacích vrtů. Výsledky hodnocení mají sloužit jako podklady pro plánování výstavby hlubinného úložiště v úrovni ukládací chodby. To odpovídá měřítku M0,1 systému HRC (Hagros 2006). Nová klasifikace URA ve své základní struktuře vychází z podkladů a doporučení zpracovaných společnostmi Posiva (Hagros et al. 2022), které navazují na práci Hagros (2006). Samotné výstavbě hlubinného úložiště, ražbě ukládacích chodeb a jejich hodnocení dle URA předchází klasifikace horninového prostředí z povrchové fáze průzkumu (vrty, geofyzikální výzkum atd.) v úrovni odpovídající měřítku M1 podle Hagros (2006). Klasifikační systém URA je navržen přímo pro geologické podmínky PVP Bukov II a pro jeho aplikaci na jiné lokality bude nutné zohlednit lokální geologická specifika.

5.1 Přístup a strategie

Klasifikační systém URA je založený na multidisciplinárním přístupu zahrnujícím využití metod několika geovědních oborů: geotechnika, strukturní geologie, hydrogeologie a geofyzika. Výsledky těchto metod jsou kombinovány za účelem identifikace oblastí se sníženou kvalitou horninového prostředí (horší geomechanické vlastnosti, vyšší hydraulická vodivost a transportní parametry) a především poruchových zón. Detailní představa o prostorové distribuci těchto problematických částí horninového masivu a kritických prvků umožní plánování umístění ukládacích vrtů, technickou konfiguraci hlubinného úložiště a logistiku výstavby a provozu. Důležitým nástrojem prezentace výsledků hodnocení a jejich aplikace je 3D zobrazení vhodných, resp. nevhodných částí masivu a jejich prostorový vztah ke geologickým a strukturním prvkům.

Systém URA má modulární strukturu, tzn. hodnotí horninové prostředí ve dvou navazujících krocích (nazývaných dále stupně). Oba stupně se dále skládají ze dvou fází (Obr. 5). První fáze zahrnuje bodové hodnocení metrových úseků vrtů/chodeb podle použitých klasifikačních parametrů. Druhá fáze je založena na lokalizaci kritických struktur a stanovení souvisejících kritických objemů. První stupeň hodnocení je založen na datech získaných studiem subhorizontálních průzkumných vrtů lokalizovaných v osách plánovaných ukládacích chodeb. Výsledky prvního stupně hodnocení slouží k rozhodnutí, zda se daná chodba bude nebo nebude razit. V rámci druhého stupně jsou zpracovány data získaná průzkumnými pracemi provedenými v již vyražené ukládací chodbě. Výsledky druhého stupně hodnocení slouží k určení, které části ukládací chodby jsou vhodné (resp. nevhodné) pro lokalizaci ukládacích vrtů.



Obr. 5 Základní struktura klasifikačního systému URA

5.2 Klasifikační parametry

Na začátku projektu se předpokládalo, že jako hlavní parametry budou do nového klasifikačního systému vstupovat primárně geologická data a geotechnické vlastnosti získané dokumentací jednotlivých čeleb v průběhu ražby, následně doplněné o výsledky dokumentace, měření a zkoušek na stěnách ražených chodeb. V průběhu projektu však postupně vyšlo najevo, že data získaná během ražby z primární geologické a geotechnické dokumentace čeleb jsou silně ovlivněná ražbou. Vzhledem k povaze dokumentace, kdy se zaznamenávají informace z pohledu čelby, tedy z jednoho řezu a díky omezenému rozměru čelby jsou tato data méně reprezentativní než data získaná v kontextu celé chodby. Z hlediska dlouhodobé bezpečnosti jednotlivých částí ukládací chodby (vhodnosti k umístění ukládacího vrtu) je proto výhodnější využít strukturní, hydrogeologická a geofyzikální data získaná přímo ze stěn chodby případně 3D modelu již vyražených chodeb. Použité klasifikační parametry charakterizují první dvě skupiny vlastností horninového prostředí (mechanické a transportní vlastnosti viz kapitola 1.3). Níže popsané parametry použité v našem klasifikačním systému jsou tedy závislé především na litologických, strukturních a hydrogeologických charakteristikách hodnoceného horninového bloku.

Geochemické a hydrochemické parametry definující třetí skupinu chemických vlastností horninového prostředí (kapitola 1.3) nejsou v systému zohledněny, protože v porovnání s penetrativním tektonickým porušením a lokalizovanými poruchovými zónami je jejich vliv na celkovou kvalitu a horninového prostředí PVP Bukov II minimální. Navíc v době trvání projektu nebyly zadavatelem definovány limitní hodnoty chemických parametrů pro plánované obalové materiály. Pro určení nežádoucích chemických vlastností prostředí je nutné znát omezení daná konstrukčním materiálem ukládacích obalových souborů. V rámci požadované homogenity horninového prostředí nepředpokládáme, že se budou geochemické a hydrochemické vlastnosti horninového masivu výrazně měnit. Pokud bude v budoucnu zjištěna nějaká chemická vlastnost, která vylučuje umístění ukládacích obalových souborů, pak by měl být příslušný geochemický nebo hydrochemický parametr do klasifikačního systému doplněn. Dále by měly být vůči výskytu takového vylučujícího parametru definovány případné kritické objemy, které budou vylučovat možnost umístění ukládacích obalových souborů.

Pro hodnocení charakteru horninového masivu URA je využito tří klasifikačních parametrů (Tab. 3), které se pro jednotlivé stupně hodnocení částečně liší: RQD index, rychlosti šíření seismických vln a hydraulická vodivost. Detailní popis jednotlivých parametrů a metod jejich stanovení je uveden v kapitole 6. V každém stupni hodnocení jsou zahrnuty parametry získané v odpovídající etapě průzkumných prací. Podle hodnot těchto parametrů je příslušným částem hodnoceného vrtu nebo chodby přiřazeno bodové hodnocení, které dále vstupuje do výsledné klasifikace podle daného stupně. V případě, že některý typ dat není dostupný, hodnotí se daný vrt nebo chodba bez těchto dat s využitím ostatních parametrů.

Rozsahy hodnot jednotlivých klasifikačních parametrů a jejich bodové hodnocení jsou stanoveny specificky pro prostředí PVP Bukov II. Hraniční hodnoty jednotlivých klasifikačních parametrů a jejich kategorizace byly stanoveny na základě zkušeností přímo z PVP Bukov II (Bukovská et al. 2022, 2023, 2025a; Soejono et al. 2024), ale i z předchozích projektů SÚRAO realizovaných v dole Rožná, především z projektu Komplexní geologická charakterizace prostor PVP Bukov I a Získání dat z hlubokých horizontů dolu Rožná (Bukovská et al. 2017, 2019, 2020). Při použití klasifikace URA na jiné lokalitě je nutné nastavit tyto hodnoty na základě konkrétních vlastností hodnocené oblasti. Jednotlivé parametry, které jsou použity pro klasifikaci horninového masivu, hodnotí jinak velkou část prostoru horninového prostředí. Například RQD a karotáž vrtu hodnotí válec průměru 76 mm délky 1 m. Terénní strukturní dokumentace hodnotí plochu stěny chodby do výšky cca 2 m a fotogrammetrické modely reprezentují kompletní plochu chodby včetně stropu. Vodní tlakové zkoušky hodnotí těžko definovatelnou oblast horninového prostředí, která je však větší než samotný objem vrtu, v kterých je realizována. Geofyzikální průzkum hodnotí, např. v případě seismické tomografie, prostor mezi snímači a zdrojem osazeným ve vrtech. Z tohoto je patrné, že výsledky z jednotlivých metod reprezentují odlišné prostorové celky. Pro správné zhodnocení všech dat a parametrů získaných jednotlivými metodami je nutná jejich dostatečně přesná lokalizace (0,1 m).

5.3 Kritické struktury a kritický objem

5.3.1 Kritická struktura

Po bodovém zhodnocení vrtu/chodby pomocí klasifikačních parametrů zahrnují oba stupně klasifikace druhou fázi, která určí nevhodné části vrtu/chodby na základě přítomnosti významných zlomů, poruchových zón apod., zde nazývaných kritické struktury. Kritická struktura je část horninového prostředí, která svými vlastnostmi může:

- 1) způsobit geotechnický/geomechanický problém při budoucí ražbě a může vyžadovat změnu technologie, využití injektáže, stabilizačních konstrukcí apod., a/nebo
- 2) negativně ovlivnit dlouhodobou bezpečnost v daném místě ukládací chodby nebo ukládacího vrtu.

Jedná se o zónu intenzivní křehké nebo křehce-duktilní deformace, která má subplanární tvar a na které může dojít ke kritickému posunu, seismické aktivitě nebo může představovat oblast zvýšené hydraulické vodivosti. Kritickým posunem je míněna taková velikost přemístění při křehké reaktivaci, při které dojde k porušení ukládacího obalového souboru. Přesná hodnota kritického posunu nebyla zadavatelem specifikována. Limitní hodnotou pro velikost možného posunu bylo švédskou SKB stanoveno 10 cm (Börgesson et al. 2003, Cosgrove et al. 2006) a finskou organizací Posiva 5 cm (Hagros et al. 2022). Pomocí terénních pozorování i numerického modelování byl odvozen vztah maximální možné velikosti přemístění na zlomu v závislosti na jeho délce (La Pointe a Caldouhos 1999; La Pointe et al. 2002). Na základě závislosti velikosti posunu a délky zlomu je pro seismicky indukovanou reaktivaci navrženo, že větší posun než 10 cm je možný na zlomu delším než cca 50 m (Munier a Hökmark 2004).

Dalším důležitým atributem délky struktury je její hydraulická vodivost. Čím je struktura delší, tím je větší pravděpodobnost, že bude propojena s jinými puklinami nebo zlomy a je (nebo v minulosti byla) hydraulicky vodivá. Výraznější délka zlomové struktury může, kromě její mocnosti, být nepřímou indikována současnou hydrogeologickou aktivitou nebo přítomností projevů dokumentujících konduktivitu zlomu v minulosti (výplň zlomu nebo alterace v okolí struktury).

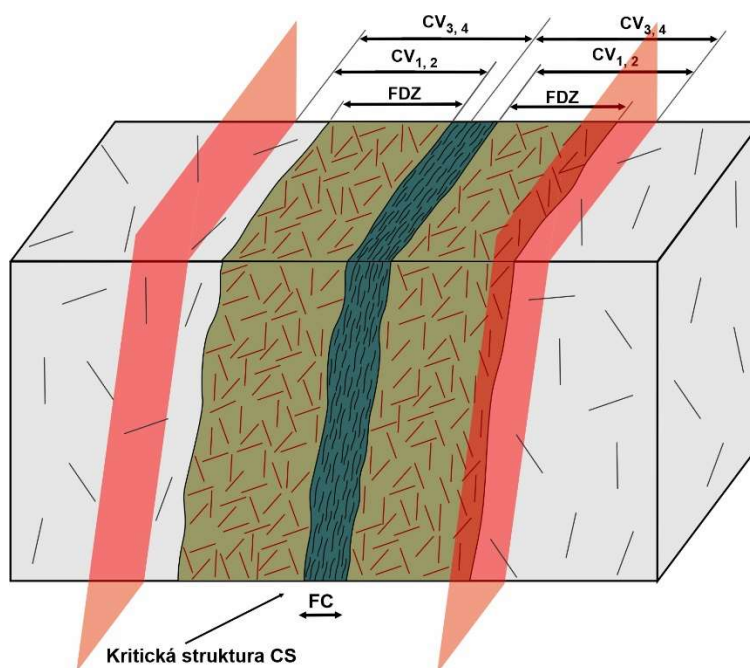
V rámci klasifikačního systému URA je pro horninové prostředí PVP Bukov II za kritickou považována každá zjištěná křehká struktura vyplněná kdekoli podél jejího průběhu, tzv. „zlomovou“ (měkkou) **výplní o mocnost větší než 10 mm**. Zlomová výplň je jakýkoliv materiál, který má výrazně horší mechanické a méně vhodné transportní vlastnosti než neporušená hornina. Typicky se jedná o různé typy zlomových výplní (Fault Gouge) jako jsou nepevněná brekcie, kataklazit, jílové minerály, mastek, grafit apod., vzniklé primárně během zlomové aktivity nebo sekundárně alterací, hydrotermálně apod. Mocností kritické struktury (Obr. 6) je míněna mocnost jejího jádra/výplně (FC – Fault Core).

Za kritickou strukturu je také považována i **zóna křehce reaktivované a retrogradně postižené duktilní planární stavby** (foliace, starší střížná zóna), obsahující významnější podíl sekundárních fází s horšími mechanickými a transportními vlastnostmi (např. bohatší fylosilikáty, chloritem, jílovými minerály apod.). Definice kritické struktury platí pro oba stupně hodnocení URA.

5.3.2 Kritický objem

U střížných deformačních zón (zlomů) dochází také k doprovodné křehké deformaci okolní horniny a vzniká méně lokalizované porušení, které je prostorově a geneticky (kinematicky) spojené se vznikem zlomu a jeho aktivitou (FDZ – Fault Damage Zone; Choi et al. 2016; Kim et al. 2003; Peacock et al. 2017). Doprovodné porušení v FDZ se projevuje řádově větším výskytem puklin, než je běžné v „neporušené“ hornině (Obr. 6). FDZ představuje oblast s méně vhodnými mechanickými a transportními vlastnostmi (Faulkner et al. 2010; Wibberley et al. 2008) a potenciálně negativním dopadem na stabilitu podzemního díla a dlouhodobou bezpečnost. Z tohoto důvodu je nutné pro každou identifikovanou kritickou strukturu stanovit

bezpečnostní obálku, tzv. kritický objem (Obr. 6) definující jaké okolí kritické struktury bude v rámci klasifikace označené jako nevhodné. Kritický objem je tedy prostor deskovitého tvaru obklopující kritickou strukturu definovaný dvěma subparalelními plochami (okraj CV) ve stejné vzdálenosti od struktury. Tento objem je určený vzdáleností okraje CV od kritické struktury. Definice kritického objemu platí pro oba stupně hodnocení URA. Cílem zavedení kritického objemu je vyloučit FDZ z částí vrtů/chodeb klasifikovaných jako vhodné. Proto je nutné určit šířku kritického objemu jako větší, než je maximální možná mocnost FDZ dané kritické struktury.



Obr. 6 Schematický blokdiagram ukazující zjednodušený řez zlomovou zónou (kritickou strukturou) a kritický objem. FC – fault core, FDZ – fault damage zone, CV_{3,4} – kritický objem pro struktury kategorie 3 a 4 v Tab. 2, CV_{1,2} – kritický objem pro struktury kategorie 1 a 2 v Tab. 2.

Mocností FDZ je v tomto dokumentu myšlena velikost FDZ kolmo k ploše zlomu na jednu stranu od zlomu (Obr. 6). Stejně jako u FDZ je velikostí kritického objemu myšlena velikost bezpečnostní obálky na jedné straně kritické struktury (Obr. 6). Reálný tvar a mocnost FDZ je, stejně jako FC, často nepravidelný a mění se výrazně podél průběhu zlomu. V případě poklesových nebo násunových zlomů je často FDZ asymetrická s výraznými rozdíly velikosti v podloží a nadloží zlomu (Berg a Skar 2005; Flodin a Aydin 2004). Pro zjednodušení je kritický objem uvažovaný v klasifikaci URA vždy symetrický, se shodnou vzdáleností okrajů CV od kritické struktury. Pro stanovení mocnosti FDZ je nutné definovat její hranice, což je často problematické a existuje několik přístupů k přesnému určení hranic FDZ (Balsamo et al. 2019; Choi et al. 2016; Gudmundsson et al. 2010; Marrett et al. 2018; Schueller et al. 2013; O'Hara et al. 2017). Většinou se jedná o statisticky určenou vzdálenost od FC, ve které dochází k prudkému snížení četnosti mezoskopických fraktur. Rozdíly dosažené použitím jednotlivých

metod však nejsou většinou nijak velké a pro účely stanovení potřebného kritického objemu to není zásadní.

Mocnost FDZ závisí na mnoha faktorech jako jsou litologické a reologické vlastnosti, velikost a rychlost deformace, teplotně-tlakové podmínky, složení a tlak fluid a převažující deformační mechanismus (Byerlee 1990; Mandl 2000; Torabi et al. 2020), nicméně podle mnoha studií je hlavním faktorem velikost zlomu a velikost pohybu na tomto zlomu (Celestino et al. 2020; Childs et al. 2009; Faulkner et al. 2010; Fossen 2010; Knott 1994; Shipton a Cowie 2001; Torabi et al. 2020). Na základě studia reálných zlomů a jejich FDZ je prokázáno, že mezi šířkou FZD a velikostí přemístění na zlomu je pozitivní korelace. Odvozené hodnoty poměru mocnosti FDZ a velikosti přemístění se pohybují v hodně širokém intervalu od 1 : 15 do 5 : 1 s průměrnou hodnotou cca 1 : 2 (Hull 1988; Knott 1994; Shipton et al. 2006; Childs et al. 2009; Fossen 2010). V měřítku vrtu nebo ukládací chodby (případně několika sousedních vrtů nebo chodeb) a v případě litologicky homogenního prostředí není většinou možné určit velikost pohybu na kritické struktuře. Nicméně podobný vztah jako pro mocnost FDZ a velikost přemístění existuje i pro poměr mezi mocností FC a velikostí přemístění (Fossen 2010; Wibberley et al. 2008). Velikost jádra zlomů s velikostí přemístění do 100 m je statisticky cca 1 : 6 velikosti pohybu na zlomu. Z těchto zjištěných vztahů lze odvodit závislost mezi velikostí FC a mocností FDZ. Při použití průměrných hodnot empiricky získaných poměrů mezi mocností FDZ a velikostí přemístění (1 : 2) a mocností FC a velikostí přemístění (1 : 6) je vztah mezi mocností FDZ a mocností FC definován jako:

$$[1] \text{ FDZ} = (6 * \text{FC}) / 2$$

Vzhledem k výše popsaným nejistotám stanovení mocnosti FDZ je v klasifikačním systému URA pro každou kritickou strukturu stanovena velikost CV minimálně o 25 % větší, než je mocnost FDZ odvozená na základě uvedeného vztahu [1]. V rámci PVP Bukov II byly jako kritické struktury identifikovány zlomy s mocností od 10 do 600 mm (kapitola 7.6). Pro zjednodušení jsou na základě mocnosti kritické struktury zavedeny čtyři kategorie velikosti CV (Tab. 2).

Tab. 2 Rozsahy mocností kritických struktur, jejich FDZ a kategorie kritických objemů stanovených pro prostředí PVP Bukov II

kategorie	mocnost FC (mm)	max. mocnost FDZ (mm)	125 % max. FDZ (mm)	CV (m)
1	> 400	1800	2250	2,5 m
2	> 250–400	1200	1500	1,5 m
3	> 100–250	750	937,5	1 m
4	≤ 100	300	375	0,5 m

Pro zóny s větší mocností kategorie 1 a 2 (250–600 mm) je nutné počítat kritický objem od okraje FC (Obr. 6). Pro úzké kritické struktury kategorie 3 a 4 (1–250 mm) je pro zjednodušení počítán kritický objem od středu dané struktury (Obr. 6). Kritické objemy pro jednotlivé hodnocené stěny ukládacích chodeb jsou počítány z mocnosti struktury na dané stěně. Některé struktury nemusí mít na konkrétní stěně požadovanou minimální mocnost 10 mm, ale díky vlastnostem detekovaným na jiné stěně/chodbě jsou zařazeny mezi kritické. Pro tyto kritické struktury s mocností menší než 10 mm je přiřazen nejmenší kritický objem jako pro struktury kategorie 4 (0,5 m; Tab. 2).

V případě křehké reaktivace již existující mechanické anizotropie (metamorfní foliace, duktilní střížná zóna) se většina deformace a pohybu lokalizuje přímo v této starší struktuře a okolí není výrazněji postižené doprovodnou křehkou deformací. To je způsobené lokalizací deformace v důsledku synkinematické alterace např. živců na fylosilikáty, chlorit a jílové minerály, typické především pro zlomové zóny v krystalinických komplexech (Janecke a Evans 1988; Wintsch et al. 1995; Stewart et al. 2000; Handy a Stünitz 2002; Wibberley 2005). Takové kritické struktury představují oblasti zvýšené hydraulické vodivosti a snížených mechanických vlastností potencionálně náchylné ke kritickému posunu. Nedochozí u nich ke vzniku FDZ. Přesné stanovení okrajů zón reaktivované foliace je vzhledem k pozvolným přechodům problematické. Proto se u takových struktur vymezuje kritický objem o velikosti 0,5 m od okraje.

5.4 Kritické hydrogeologické projevy a bezpečnostní obálky

Za kritický hydrogeologický projev je považován stabilní přítok podzemní vody s vyšší vydatností. Ta se projevuje výskytem výtoku/úkapů s vydatností/četností umožňující odběr vzorků podzemní vody (minimálně 0,5 l/hod včetně použití odběrů na více místech struktury). Průsaky, které se projevují pouze vlhnutím stěn či stropu nebo občasným úkapem, nejsou považovány za kritické.

Pokud je přítok vázán na konkrétní kritickou strukturu, je mocnost kritické hydrogeologické struktury dána dosahem výrazného zvodnění od středu struktury. Tedy pokud se zvodnění vyskytuje ve vzdálenosti 2 m od středu struktury, je mocnost kritické hydrogeologické struktury 4 metry. V případě výskytu kritického přítoku bez jasné vazby na konkrétní kritickou strukturu, je mocnost kritického přítoku dána rozsahem zvodnění v chodbách.

K vyloučení nejistoty stanovení mocnosti je kolem každého kritického hydrogeologického projevu stanovena bezpečnostní obálka o šířce 0,5 m na každou stranu od okraje průsaku.

5.5 I. stupeň hodnocení

Průzkumné práce v I. stupni hodnocení jsou vázány na průzkumné subhorizontální vrtý provedené v osách plánovaných ukládacích chodeb. Jejich realizace je nezbytnou podmínkou pro potvrzení absence velké zlomové zóny (předpokládané na základě předchozích průzkumů na lokalitě) a pro odhad využitelnosti plánované chodby pro umístění ukládacích vrtů. Vrt je hodnocen po 1 m dlouhých úsecích. Hodnocení masivu v tomto stupni by mělo poskytnout

informace o tom, v jakých částech posuzované ukládací chodby je horninové prostředí dostatečně kvalitní a jestli je možné do něj umístit požadovaný počet ukládacích vrtů. Celkovým výsledkem hodnocení horninového prostředí oběma fázemi I. stupně URA je procentuální podíl horninového prostředí vhodného k umístění úložných vrtů k celkové délce průzkumných vrtů a distribuce úseků podél vrtu. V případě, že v rámci některého vrtu nebude identifikován dostatečný rozsah vhodného prostředí pro lokalizaci ukládacích vrtů, nebude ražba této chodby realizována. Stanovení minimálního podílu vhodného horninového prostředí a rozhodnutí o realizaci ražby konkrétní ukládací chodby není úkolem klasifikačního systému. Výsledky hodnocení slouží jako podklady pro rozhodnutí projektantů úložiště.

5.5.1 První fáze I. stupně

Průzkumné práce prováděné v rámci první fáze I. stupně hodnocení horninového masivu zahrnují:

- 1) stanovení RQD indexu pro každý metr vrtného jádra – parametr A;
- 2) intervalové určení rychlosti šíření seismických vln, které bude vztaženo k polovině hodnoceného metrového úseku – parametr B;
- 3) stanovení hydraulických charakteristik v úsecích definovaných použitou metodou (např. 0–10 m) – parametr C.

Tab. 3 Parametry, rozsahy jejich hodnot a bodové hodnocení pro I. stupeň URA

(A) RQD		(B) rychlost šíření seismických vln		(C) hydraulická vodivost K	
RQD [%]	počet bodů	rychlost [m.s ⁻¹]	počet bodů	hydraulická vodivost K [m.s ⁻¹]	počet bodů
0–50	0	<4800	0	$K > 10^{-6}$	0
51–75	1	4800–5300	1	$10^{-6} > K > 10^{-9}$	1
76–90	2	5300–5800	2	$10^{-9} > K > 10^{-12}$	2
91–100	3	>5800	3	$10^{-12} > K$	3
Pozn: Počty bodů přiřazených k posuzovaným parametrům byly určeny na základě rozptylu naměřených hodnot zjištěných na PVP Bukov II.					

Ke zjištěným hodnotám výše uvedených klasifikačních parametrů je přímo úměrně přiřazeno bodové hodnocení v rozmezí 0–3 body. Rozsahy hodnot jednotlivých parametrů a jejich bodové hodnocení jsou uvedeny v Tab. 3. Hodnoty jednotlivých klasifikačních parametrů jsou lokální charakteristikou danou geologickými poměry na lokalitě. To se vztahuje především na rychlosti šíření seismických vln. Hodnoty uvedené v Tab. 3 jsou specifické pro prostředí vysoce anizotropních metamorfovaných hornin PVP Bukov II. Uvedené hodnoty RQD indexu jsou vztaženy k vrtu o průměru cca 50 mm. Hodnoty rychlostí šíření seismických vln jsou vypočteny v ploše určené geometrií měření (např. mezi stěnou a vrtem, nebo mezi dvěma vrty). Jako hodnota klasifikačního parametru B je využita seismická rychlost odečtená v dané hloubce vrtu. Hodnoty parametru C jsou vztaženy k celému měřenému intervalu vodní tlakové zkoušky daného vrtu. Vrt je možné hodnotit pomocí minimálně dvou těchto parametrů.

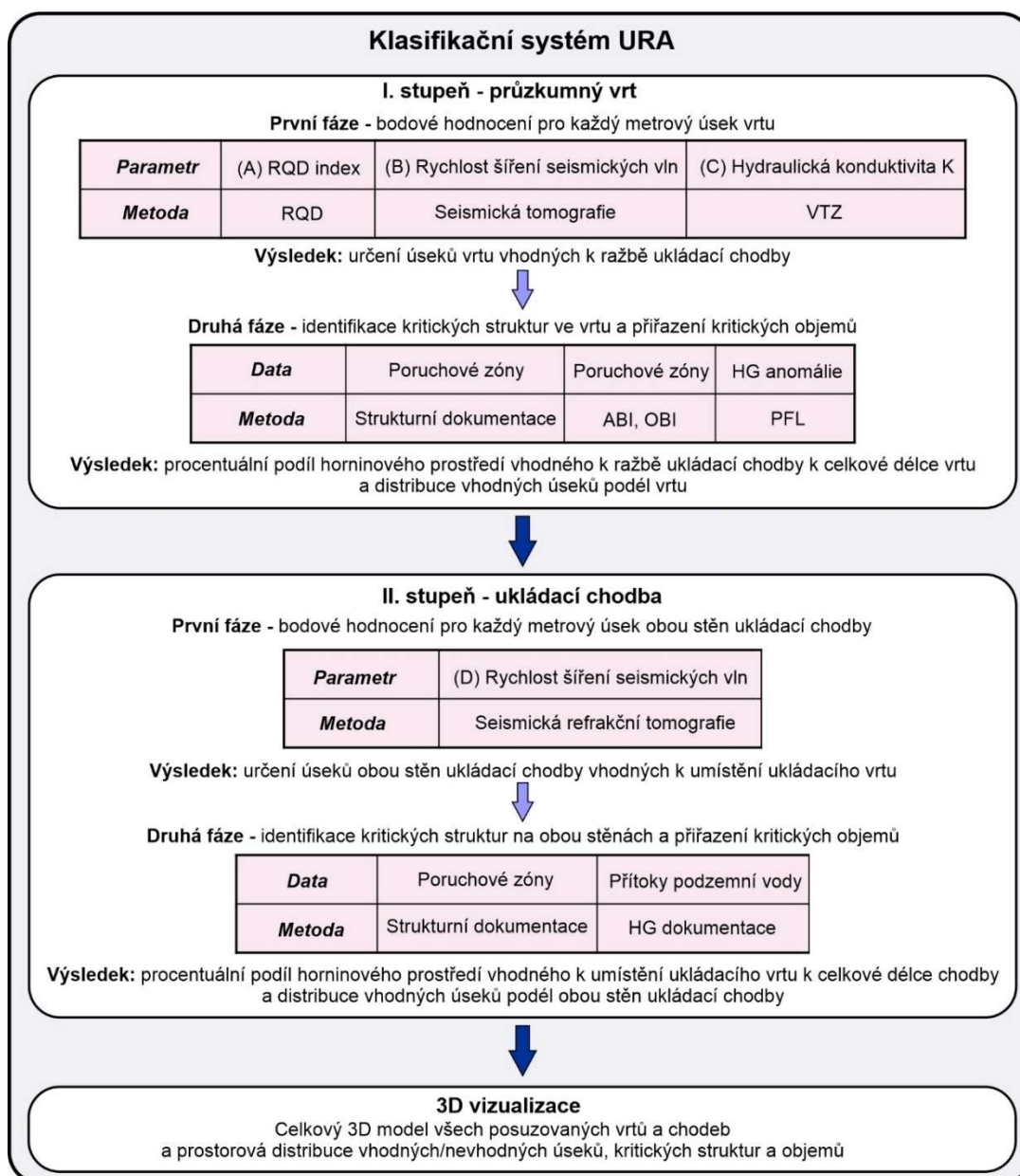
Jako oblast vhodná pro ražbu ukládací chodby je považován ten metrový úsek průzkumného vrtu, pro který součet hodnotících bodů odpovídá rovnici [2a]:

$$[2a] A + B + C \geq 6$$

V případě hodnocení vrtu pomocí pouze dvou parametrů je jako oblast vhodná pro ražbu ukládací chodby považován ten metrový úsek průzkumného vrtu, pro který součet hodnotících bodů odpovídá rovnici [2b]:

$$[2b] A + B > 4$$

Členy A, B, C odpovídají počtu bodů pro jednotlivé parametry v Tab. 3. Bodové ohodnocení je přiřazeno pro každý jednotlivý metrový úsek vrtu.



Obr. 7 Schéma klasifikačního systému URA

5.5.2 Druhá fáze I. stupně

Následující druhá fáze I. stupně spočívá v identifikaci kritických struktur ve vrtech pomocí karotážních metod, geologické a strukturní dokumentace vrtného jádra a PFL. Úseky, které jsou na základě kritéria [2a] nebo [2b] považovány za vhodné, je tedy nutné navíc **redukovat o rozsahy stanovené kritickými objemy okolo kritických struktur** stanovených v druhé fázi.

5.6 II. stupeň

Průzkumné práce v druhém stupni hodnocení jsou prováděné na obou stěnách již vyražených ukládacích chodeb a každá stěna je hodnocena nezávisle. Obě stěny jsou hodnoceny po 1 m dlouhých úsecích. Hodnocení horninového prostředí v tomto stupni by mělo určit, ve kterých částech posuzované ukládací chodby je horninové prostředí dostatečně kvalitní pro umístění ukládacích vrtů. V rámci II. stupně nejsou do hodnocení opakovaně zahrnuty hodnoty parametrů a data z I. stupně a jsou využita jen data získaná během této etapy průzkumných prací. Koncovým výsledkem hodnocení horninového prostředí oběma fázemi II. stupně URA je procentuální podíl horninového prostředí vhodného k umístění úložných komor k celkové délce obou stěn ukládacích chodeb a distribuce těchto úseků v prostoru. Na základě těchto výstupů lze napláňovat konkrétní místa, ve kterých lze vybudovat ukládací vrty pro obalové soubory.

5.6.1 První fáze II. stupně

Průzkumné práce prováděné v rámci první fáze II. stupně hodnocení horninového masivu zahrnují geofyzikální průzkum provedený metodou seismické refrakční tomografie (parametr D) provedený na stěnách ukládacích chodeb (do boku). Rychlost šíření seismických vln je, z důvodu vyloučení vlivu porušení způsobeného ražbou (EDZ), odečtena ve vzdálenosti 2 m od líce stěny ukládací chodby, a to v úrovni staničení, které odpovídá středu hodnoceného metrového úseku. K získaným hodnotám parametru D je přímo úměrně přiřazeno bodové hodnocení v rozmezí 0–3 body. Rozsahy hodnot parametru D a jejich bodové hodnocení jsou uvedeny v Tab. 4.

Tab. 4 Přehled bodového hodnocení výsledků měření parametru D v II. stupni hodnocení URA

(D) rychlost šíření seismických vln	
rychlost [m.s-1]	počet bodů
<4800	0
4800–5300	1
5300–5800	2
>5800	3

Jako vhodné prostředí pro ukládací vrt považujeme takové, kde bodové hodnocení posuzovaného parametru je:

$$[3] D \geq 2$$

Člen D odpovídá počtu bodů pro parametr D v Tab. 3 a Tab. 4. Bodové ohodnocení je přiřazeno pro každý jednotlivý metrový úsek obou stěn ukládací chodby.

5.6.2 Druhá fáze II. stupně

Identicky jako pro I. stupeň je cílem druhé fáze II. stupně identifikace kritických struktur a kritických hydrogeologických projevů na stěnách ukládací chodby pomocí geologické, strukturní a hydrogeologické dokumentace stěn. Úseky stěn, které jsou na základě kritéria [3] považovány za vhodné, je tedy nutné navíc redukovat o rozsahy stanovené kritickými objemy okolo kritických struktur a bezpečnostní obálkou (0,5 m) kritických hydrogeologických projevů identifikovaných v této fázi. Lokalizace kritických struktur a stanovení rozsahů asociovaných kritických objemů i kritických hydrogeologických průsaků a jejich bezpečnostních obálek je provedeno pro každou stěnu ukládací chodby zvlášť.

5.7 3D model

Posledním krokem je vhodná prezentace a vizualizace výsledků hodnocení. Pro plánování umístění ukládacích vrtů a dalších konstrukčních prvků hlubinného úložiště, jako je těsnící zátka, je nutné vizualizovat skutečnou geometrii vhodných/nevhodných partií hodnoceného horninového masivu, jejich prostorové vztahy ke kritickým strukturám a rozsahy stanovených kritických objemů. Prostorové vztahy výsledků hodnocení k hlavním geologickým a strukturním prvkům, stejně jako k jednotlivým částem podzemního díla, je vhodné zobrazit v 3D modelu.

6 Metodika stanovení parametrů, identifikace kritických struktur a 3D vizualizace

V této kapitole jsou detailně popsány jednotlivé výzkumné metody, způsoby měření a postupy zpracování dat využívané na PVP Bukov II pro stanovení hodnotících parametrů, identifikaci kritických struktur a 3D vizualizaci výsledků hodnocení horninového masivu dle URA.

6.1 RQD

Parametr RQD vypočtený pro metrové úseky vrtného jádra vstupuje do první fáze I. stupně klasifikačního systému. RQD (Rock Quality Designation; Deere et al. 1967) je standardní metodou používanou v hornictví a těžebním průmyslu pro kvantitativní hodnocení kvality hornin a stupně spojitosti a rozpukání v horninovém masivu. RQD je definováno jako procento nebo poměr neporušených částí vrtného jádra delších než 10 cm zachycených v rámci jednoho jádra nebo jeho vybrané části. Indukované porušení, vzniklé v důsledku ražby apod. není do hodnocení RQD zahrnuto. Výsledkem je přiřazení jedné z pěti kategorií popisujících kvalitu horniny: výborný (≥ 90 –100 %), dobrý (≥ 75 –90 %), slušný (≥ 25 –50 %), špatný (≥ 25 –50 %) a velice špatný (≤ 25 %). RQD index vstupuje jako jeden z klasifikačních parametrů do celé řady hodnotících systémů.

6.2 Karotáž

V rámci druhé fáze I. stupně klasifikačního systému jsou pro identifikaci kritických struktur využity výsledky karotážních měření provedené na průzkumných vrtech. Za účelem detekce poruch a stanovení jejich orientace a určení prostorového průběhu vrtů byly použity karotážní metody akustického televizoru, optického televizoru a vrty byly také prohlédnuty optickou vrtnou televizní kamerou. Akustický televizor ABI40 (Acoustic Borehole Imager) v příznivých podmínkách umožňuje identifikaci ploch nespojitosti (zejména otevřených puklin) na principu ztráty akustického signálu v puklinách a porušených úsecích vrtu a stanovení jejich prostorové orientace (sklon a směr sklonu). Optický televizor OBI40 (Acoustic Borehole Imager) umožňuje identifikaci ploch nespojitosti (zejména vyplněných puklin) a stanovení jejich prostorové orientace.

Přístrojové vybavení:

- měřicí jednotka Matrix (Advanced Logic Technology) a přenosný vrátek K-300 (Rochester Corp.);
- akustický televizor ABI40 (Advanced Logic Technology);
- optický televizor OBI40-2G (Advanced Logic Technology);
- přenosná vrtná televizní kamera (GeoVISION).

Data z akustické i optické karotáže byly zpracované ve speciálním modulu programu WellCad (Advanced Logic Technology). Metodické postupy a zpracování dat použitých karotáží jsou detailně popsány ve zprávě Kořalka a Sánchez (2023).

6.3 Geofyzikální průzkum

Jedním z parametrů, který vstupuje do obou stupňů klasifikačního systému, je rychlost šíření podélných seismických vln. Rychlost šíření podélných seismických vln v hornině je závislá na jejím geomechanickém stavu. Přítomnost mechanického porušení (rozpukání) snižuje hodnoty rychlosti šíření seismických vln. Intenzitu porušení lze charakterizovat vzdáleností diskontinuit (v souladu s ČSN EN ISO 14689). Geofyzikálními metodami lze také zjistit existenci významnějších poruchových zón.

6.3.1 Seismická tomografie

Seismická tomografie je jednou z metod vrtného průzkumu poskytující informace o kvalitě horninového prostředí vstupující do I. stupně hodnocení. V případě PVP Bukov II byl proveden geofyzikální průzkum s využitím seismické tomografie (měření mezi vrtů) před zahájením ražeb. Ve variantě seismického prosvěcování mezi vrtů je jeden z použité dvojice měřících vrtů osazen seismickými snímači (obvykle s krokem 0,5–2 m) a druhý vrt je osazen zdrojem spouštěným a aktivovaným s krokem 1–2 m. Použitá konfigurace sleduje rozložení rychlostí šíření seismických vln v horninovém prostředí v prostoru řezu vymezeném liniemi seismických zdrojů a snímačů ve dvou vrtech. Zpracování naměřených dat zahrnuje zejména získání tzv. časů prvních nasazení, tedy časů příchodu signálu od zdroje ke snímači. Tyto časy spolu s lokalizací pozic zdrojů a snímačů tvoří vstupní matici dat, která vstupuje do procesu numerického řešení úlohy. V případě dat z PVP Bukov II byla použita metoda SIRT (Simultaneous Iterative Reconstruction Technique; Gilbert 1972), což je obecná metoda používaná pro řešení tomografických úloh nejen v geofyzice. Výstupem zpracování vstupního souboru časů a pozic je rychlostní pole, které je definované hodnotami rychlosti v každém uzlovém bodě výpočtové sítě a graficky prezentované ve formě mapy izolinií.

Přístrojové vybavení:

- seismograf Terraloc PRO – 48 kanálů, registrace signálu ze snímačů ve vrtu (sonda SSI-8) a na stěně chodeb (výrobce ABEM, Švédsko);
- seismograf Terraloc MK6 – 24 kanálů, registrace signálu hydrofony ve vrtech (ABEM);
- snímače rychlosti kmitání (geofony) osazené elementy SM-11 (Sensor) o vlastní frekvenci 30 Hz (stěny chodeb);
- vrtná sonda vlastní konstrukce SSI-8 osazená osmi trojosými snímači rychlosti kmitání s měřícími elementy OMNI-2400 (15 Hz) s krokem 0,5 m;
- řetězec hydrofonů BHC4 s 24 snímači osazenými elementy AQ2000 s frekvenčním rozsahem 1–10 000 Hz (výrobce Geotomographie GmbH, Německo);

- elektrodynamický vrtný seismický zdroj BIS-SH s pulsním generátorem IPG (Geotomographie GmbH, Německo).

Úprava a zpracování dat, včetně matematických výpočtů rychlostního pole byly provedeny v programovém prostředí ReflexW (Sandmeier Geophysical Research, Německo). Základní kroky zpracování naměřených dat jsou tyto:

- prvotní editace, odstranění chyb;
- rozřazení seismických tras do logických celků;
- přiřazení prostorových souřadnic jednotlivým seismickým trasám;
- úprava signálu, filtrace, vyrovnaní amplitud;
- vyčíslení časů příchodu seismické vlny od zdroje ke snímači (první nasazení).

6.3.2 Mělká refrakční seismika v modifikaci seismické refrakční tomografie

Detailní seismické refrakční měření realizované na obou stěnách již vyražených chodeb poskytuje informace o rychlosti šíření seismických vln vstupujících jako hlavní parametr do II. stupně klasifikačního systému. Refrakční seismika analyzuje časy tzv. prvních nasazení, tedy nejnižší časy, ve kterých seismická vlna dorazí od zdroje k přijímači. Jako první překoná trasu mezi vysílačem a přijímačem přímá vlna (v oblasti malých vzdáleností od zdroje energie) nebo vlna čelná (dále od zdroje), označovaná také jako lomená či refragovaná. Klasické metody refrakční seismiky popisují zkoumané prostředí jako vrstevnaté, kde každá vrstva je charakterizována svou mocností a rychlostí šíření seismických vln. Tento přístup má několik omezení a zejména v prostředí bez výrazných skokových změn seismických rychlostí nepřináší realistické výsledky. V těchto situacích, kdy se rychlosti mění spojitě (gradientově), je výhodnější zpracování metodou seismické refrakční tomografie. V tomto případě je na sledované prostředí nahlíženo jako na spojitě (Azwin et al. 2013). Pro účely výpočtu je prostředí reprezentováno sadou buněk, ve kterých je určena rychlost šíření seismických vln (Osypov 2001).

Metodami matematické inverze je hledán takový model prostředí (tedy přiřazení rychlostí šíření jednotlivým buňkám), jehož teoretická odezva nejlépe vystihuje měřená data. Volba malé (submetrové) vzdálenosti snímačů (krok geofonů) umožňuje detailní sledování horninového prostředí v blízkosti povrchu stěny laboratorní chodby. Výsledkem průzkumných měření je rychlostní profilový řez s hloubkovým dosahem jednotek metrů. Odečtení hodnot seismických rychlostí ze získaného řezu je provedeno ve vzdálenosti (hloubce) cca 2 m od líce stěny chodby s krokem 1 m. Tato hodnota je následně využita jako parametr v hodnocení. Tím jsou v maximální míře potlačeny rychlostní změny při povrchu stěny způsobené porušením horninového masivu vlivem ražby. Odečtené rychlosti tak reprezentují stav horniny v primárním (nedotčeném) stavu. Hodnotící škála (tedy limitní hodnoty) pro rozčlenění horninového prostředí podle geomechanického stavu je obdobná jako v případě hodnocení podle výsledků seismických tomografických měření. Podkladem pro hodnocení jsou rychlostní limity uvedené v Tab. 5. Konkrétní představu o stavu horniny může přinést orientační navázání

na vzdálenost diskontinuit v horninovém masivu ve škále používané v ČSN EN ISO 14689-1. Měření proběhlo na stěnách obou laboratorních chodeb L4a a L4b v celé jejich délce 75 m. Vzdálenost mezi jednotlivými geofony (přijímači) byla zvolena 0,5 m, vzdálenost zdrojových bodů pak činila 1 m pro odpaly uvnitř linie snímačů, pro odpaly mimo linii (far offset) pak 5–10 m.

Tab. 5 Vztah mezi velikostí šíření seismických vln a porušením horninového masivu

hodnocení porušení horniny	rychlost seismických vln [m.s ⁻¹]	vzdálenost diskontinuit [mm] dle ČSN EN ISO 14689
intenzivně porušená	<4800	<20
středně porušená	4800–5300	60–20
mírně porušená	5300–5800	200–60
neporušená, slabě porušená	>5800	600–200, 2000–600

Přístrojové vybavení:

- seismograf Terraloc Pro – 48 kanálů, registrace signálu (výrobce ABEM, Švédsko);
- snímače rychlosti kmitání (geofony) osazené elementy SM-11 (Sensor, Holandsko) o vlastní frekvenci 30 Hz, (stěny);
- jako seismický zdroj byly použity údery 1 kg úderníku do ocelové podložky.

Zpracování seismických dat bylo provedeno s využitím programu Rayfract (Intelligent Resources Inc., Canada). Obvyklé kroky při zpracování jsou následující:

- základní editace dat, statické korekce;
- implementace geometrických souřadnic do datového souboru;
- vyčíslení prvních nasazení (čas příchodu seismické vlny od zdroje do snímače);
- numerické zpracování – výpočet rychlostního řezu;
- export rychlostního řezu.

6.4 Vodní tlakové zkoušky

Vodní tlakové zkoušky (VTZ) poskytují informace o propustnosti horninového masivu v okolí měřené části vrtu. Výsledkem měření VTZ jsou hodnoty hydraulické vodivosti vstupující do první fáze I. stupně klasifikačního systému. Vzhledem k obvykle několikametrové délce měřeného úseku se měřená hodnota hydraulické vodivosti přiřazuje každému metru v celém úseku. Vodní tlakové zkoušky charakterizují hydraulické parametry porušené horniny v blízkosti vrtu i hydraulické parametry potenciálně neporušené horniny masivu zastižené průzkumným vrtem. Metoda je založena na hydraulickém oddělení měřeného úseku vrtu pomocí pakrů a následné injektáže vody při konstantním známém průtoku nebo vstupním tlaku. Měří se nárůst tlaku nebo průtok vtlačené vody až do ustálení. Pro zjištění hydraulických parametrů horninového prostředí byla využita metoda dle Moye (1967). U této metody vstupují do výpočtu kromě průměru vrtu a délky testovaného intervalu především ustálená hodnota průtoku Q a tlakový gradient vodní tlakové zkoušky ΔP . ΔP je stanoven jako rozdíl přirozeného

hydrostatického tlaku v horninovém prostředí a ustálené tlakové úrovně při injektáži během VTZ.

Přístrojové vybavení:

- souprava dvojice pakrů použitých k vymezení testovaného úseku vrtu, hadiček a hydraulické pumpy pro hydraulickou izolaci měřeného úseku (Geopro Bimbar 1);
- pro vyšší spotřebu vtláčené vody bylo použito mobilní zařízení obsahující digitální tlakoměr (BDSensors DMP 331i) a průtokoměr (Bronkhorst ES-113I), čerpadlo (Walrus TH 400P) a datalogger (Comet MS6);
- pro nižší spotřebu vtláčené vody bylo použito mobilní zařízení obsahující digitální tlakoměr, vysokotlaké čerpadlo (DeltaChrom SDS 030) a datalogger nebo zařízení obsahující digitální tlakoměr, expanzní nádobu, digitální váhu a datalogger.

6.5 Posiva Flow Log

Data získaná metodou Posiva Flow Log jsou ve druhé fázi I. stupně klasifikačního systému využita pro identifikaci kritických struktur a následné stanovení kritických objemů. Metoda zjišťuje přítomnost hydrogeologických anomálií (projev kritické struktury) zastižených vrtem, které se projevují přítokem vody do vrtu na dané metráži. Přístrojové vybavení, postup měření a vyhodnocení dat této metody jsou v detailu popsány ve zprávě Komulainen et al. (2023). Měřicí procedura je dvakrát prováděna kontinuálním automatizovaným protahováním průtokoměrné sondy umístěné mezi izolačními disky vrtem, přičemž je zaznamenávána metráž a měřený průtok v rozsahu 0,03–300 l/h. Při prvním měření se měřil přítok do prostoru mezi disky za přirozených tlakových podmínek ve vrtu, při druhém měření průtoku byl zvýšen tlak vody ve vrtu, což stimuluje odtok vody z vrtu do vodivých struktur.

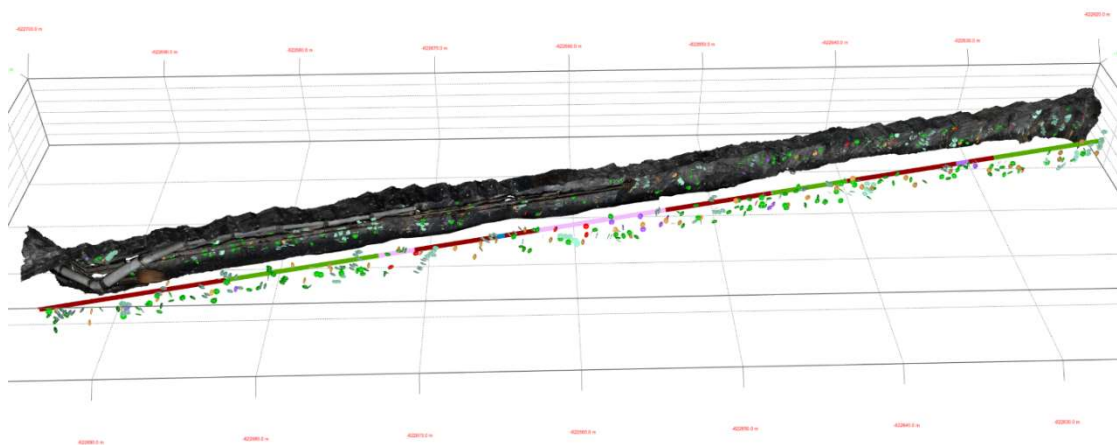
6.6 Strukturní dokumentace

6.6.1 Vrtná jádra

Strukturní data pořízená na základě dokumentace vrtných jader vstupují jako kritické struktury a kritické objemy do druhé fáze I. stupně klasifikačního systému. Kritické struktury a jejich lokalizace byly v hodnocených vrtech určeny na základě strukturní dokumentace a fotografické dokumentace ve vrtných kolonkách příslušných vrtů (v přílohách zprávy Patočka et al. 2018). Kritické struktury (kapitola 5.3.1) byly identifikovány na základě charakteru dokumentovaných strukturních prvků, jejich mocnosti a typu výplně. Je nutné zmínit, že lokalizace jednotlivých struktur na základě studia vrtných jader je, vzhledem k často špatně určeným staničením jádra, silně nejistá. Detailní popis problematického staničení vrtných jader a možný způsob řešení je uveden v kapitole 2.1.3 ve zprávě Soejono et al. (2024).

6.6.2 Stěny ukládacích chodeb

Na základě detailní strukturní dokumentace stěn ukládacích chodeb jsou, v kombinaci s hydrogeologickými a geofyzikálními indikacemi, identifikovány kritické struktury zahrnuté jako vylučující prvky do druhé fáze II. stupně klasifikačního systému. Komplexní přístup identifikace kritických struktur je detailně popsán v kapitole 6.8. Strukturněgeologická dokumentace byla prováděna na stěnách ukládacích chodeb zhruba do výšky 2 m stěny za využití geologického kompasu, fotoaparátu a tabletu. Zvláštní důraz byl kladen na dokumentaci četnosti, orientace a charakteru křehkých struktur (puklinové systémy, zlomy apod.), ale také na dokumentaci charakteru a orientace duktilních metamorfních staveb. Za účelem tvorby fotogrammetrických modelů probíhala krátce po ražbě také systematická fotografická dokumentace stěn a stropu chodeb včetně stropu a počvy. Jednotlivé dokumentované prvky byly zanášeny do fotografie stěny tak, aby mohly být správně lokalizovány a usazeny ve fotogrammetrickém modelu (Obr. 8). U všech planárních i lineárních struktur byla měřena orientace ve smyslu směr sklonu/sklon. Dále byly zaznamenány vztahy mezi jednotlivými strukturami, jejich četnost, mocnost a typ výplně a jejich kinematika. Kvalita strukturních a geologických pozorování může být ovlivněna podmínkami terénních prací v podzemí, jako je nedostatečné osvětlení, nečistoty způsobené těžbou apod. Nejvíce jsou data limitována tím, že pozorování je omezeno pouze na rozměr stěny a často není možné určit délku struktury a její vztahy k okolním prvkům. Dále může být kompasové měření ovlivněno přítomností kovových konstrukčních prvků. Navíc orientace, mocnost a typ výplně jedné struktury se může dramaticky měnit podél jejího průběhu. Tím vzniká nejistota, jestli dokumentované charakteristiky jsou dostatečně reprezentativní pro danou strukturu jako celek. Z těchto důvodů byly významnější struktury dokumentované na jednotlivých stěnách korelovány se strukturními prvky a texturou 3D modelu (viz kapitoly 6.8 a 6.9).



Obr. 8 Fotogrammetrický model chodby L4a s usazenými daty ze strukturní dokumentace a petrologickou charakterizací podél chodby

6.7 Hydrogeologická dokumentace

Výraznější hydrogeologické (HG) projevy jsou do hodnotícího procesu zahrnuty ve druhé fázi II. stupně klasifikačního systému jako kritické průsaky a jejich bezpečnostní obálky. Po vyražení ukládacích chodeb L4a a L4b byla opakovaně prováděna hydrogeologická dokumentace průsaků podzemní vody. Rozsah zvodnění je veličina časově proměnná, závislá na režimu důlního díla, zejména na způsobu větrání a na dalších technických aktivitách realizovaných v blízkosti přítoků. Z důvodu stabilizace hydrologických poměrů horninového masivu po ražbě je vhodné provádět HG dokumentaci chodeb s dostatečným časovým odstupem. Pro potřeby testování klasifikačního systému URA na PVP Bukov II byly zahrnuty HG projevy dokumentované cca 14 měsíců po dokončení ražeb. U průsaků byly dokumentovány následující parametry:

- 1) zdroj přítoku (puklina, poruchová zóna, návrt, vrt);
- 2) lokalizace (chodba, stěna, pozice nad počvou, metráž);
- 3) související strukturní prvek (typ, orientace, výplň, mocnost);
- 4) vydatnost ve třech kategoriích (vlhnutí stěny, kapky, výtok);
- 5) vydatnost přítoku (pokud to charakter přítoku umožňoval).

6.8 Identifikace kritických struktur a přiřazení kritických objemů

Jak je popsáno v kapitole 5.3.1, kritická struktura je definovaná přítomností „měkké“ výplně o mocnosti větší než 10 mm. Kritické struktury jsou zahrnuty do hodnotícího procesu v obou stupních.

6.8.1 I. stupeň hodnocení

V I. stupni klasifikačního systému je lokalizace kritických struktur odvozena z geologické dokumentace vrtných jader (kapitola 6.6.1), z výsledků vrtné karotáže (kapitola 6.2) a z výsledků měření metodou Posiva Flow Log (kapitola 6.5). Jsou to tedy jakékoliv struktury dané mocnosti a typu výplně fyzicky dokumentované na vrtných jádrech nebo interpretované v akustickém nebo optickém karotážním záznamu na příslušné metráži jádra/vrtu. Jako kritické struktury jsou při měření metodou Posiva Flow Log považovány všechny části vrtu s průtokem větším než 10^2 ml/h (Komulainen et al. 2023).

Dalším krokem je určení kritického objemu pro každou kritickou strukturu, který označí daný úsek jako nevhodný. V kapitole 5.3.2 bylo odvozeno, že velikost kritického objemu je stanovena na základě mocnosti struktury. Je však nutné vzít v úvahu, že určení mocnosti struktury na základě informací získaných z jádra/vrtu je velice problematické. Vrtné jádro je v místech výraznějších poruch přerušené nebo rozdrčené, není možné určit, jaké množství materiálu bylo vyplaveno technologickou vodou apod. Podobně z karotážních metod a Posiva Flow Log je určení reálné mocnosti nejisté. Proto nejsou v I. stupni identifikovaným kritickým strukturám přiřazeny kritické objemy podle jejich mocnosti. Místo toho je kritický objem konvenčně stanoven jako 1 m na obě strany od středu kritické struktury.

6.8.2 II. stupeň hodnocení

V rámci II. stupně klasifikačního systému je identifikace kritických struktur na hodnocených stěnách, a především stanovení kritických objemů, založena na rozměrech a vlastnostech jednotlivých struktur a jejich HG vlastnostech dokumentovaných přímo na stěnách (kapitola 6.6.2, 6.7) nebo nepřímo z fotogrammetrických modelů chodeb (kapitola 6.9).

Vzhledem k tomu, že mocnost a typ výplně se často výrazně mění podél průběhu struktur, je nutné předpokládat, že stejná struktura identifikovaná jako kritická na jiné stěně nebo jiné chodbě je kritická i na hodnocené chodbě (i když na této stěně není možné pozorovat dostatečnou mocnost a výplň). To bylo potvrzeno v 3D fotogrammetrickém modelu chodeb na PVP Bukov II, ve kterém je zjevné, že větší zlomy v naprosté většině případů protínají celou chodbu. Tyto struktury však často na jedné stěně chodby nemají mocnost výplně odpovídající kritické struktuře (kapitola 5.3.1). Proto jsou za kritické považovány i struktury, které sice nevykazují na hodnocené stěně charakteristické znaky kritické struktury, ale protínají jinou stěnu nebo chodbu, na které parametry kritické struktury splňují.

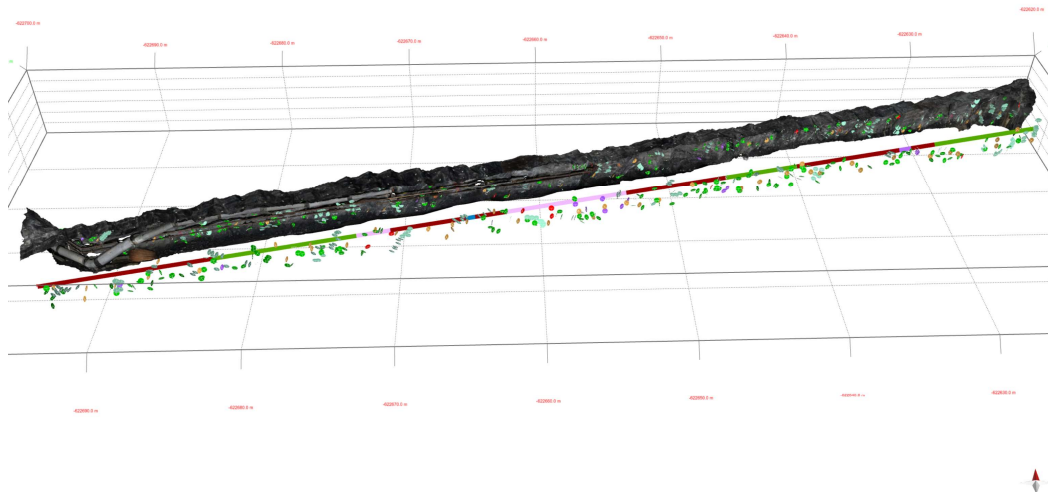
Podle vztahu mezi FC a FDZ (kapitole 5.3.2) je na základě mocnosti (Tab. 2) okolo každé kritické struktury vyhrazen kritický objem. Zlomové zóny mají často difuzní charakter a nejsou tvořené jedinou dlouhou plochou, ale systémem anastomózních a navzájem propojených menších struktur. Takové uspořádání je časté i na PVP Bukov II. V případě, že subparalelní kritické struktury spolu prostorově i kinematicky souvisí, je kritický objem přiřazen pro každou jednotlivou dokumentovanou strukturu zvlášť.

6.9 3D modelování

3D strukturní model hodnocených chodeb slouží pro prezentaci výsledků hodnocení a vizualizaci jejich prostorových vztahů k důležitým geologickým a strukturním prvkům, ale i konstrukčním prvkům (bezpečnostní zátky, rozměry ukládacích vrtů apod.). 3D model je možné využít také pro doplnění a korekci strukturních dat získaných přímou dokumentací stěn ukládací chodby. Z tohoto důvodu je nutné, aby 3D model ukládací chodby zahrnoval reálnou horninovou texturu v dostatečném rozlišení (např. fotogrammetrie nebo laserscan s fototexturou). V případě PVP Bukov II byly jednotlivé kritické struktury identifikované přímo na stěnách chodeb nebo nepřímo v 3D modelu vzájemně korelovány. Dále byly korelovány s výsledky plošné seismické tomografie (kapitola 7.3.1). Na základě orientace, mocnosti, výplně a hydrogeologických charakteristik jednotlivých struktur byly propojeny a syntetizovány do interpretativního 3D modelu zlomové sítě celého PVP Bukov II (Elektronická příloha 4; Elektronická příloha 5). Fotogrammetrické modely byly vytvořeny v programu Agisoft Metashape Professional v. 1.8.4. a posléze usazeny do souřadného systému S-JTSK pomocí měřičských bodů získaných v rámci projektu od firem Inset, s.r.o. a SG Geotechnika, a.s.



Obr. 9 Fotogrammetrický 3D model stěny ukládací chodby s dokumentovanými strukturními prvky reprezentovanými diskovými plochami. Zelené – pukliny, žluté – poruchové zóny/zlomy, modré – metamorfnní foliace



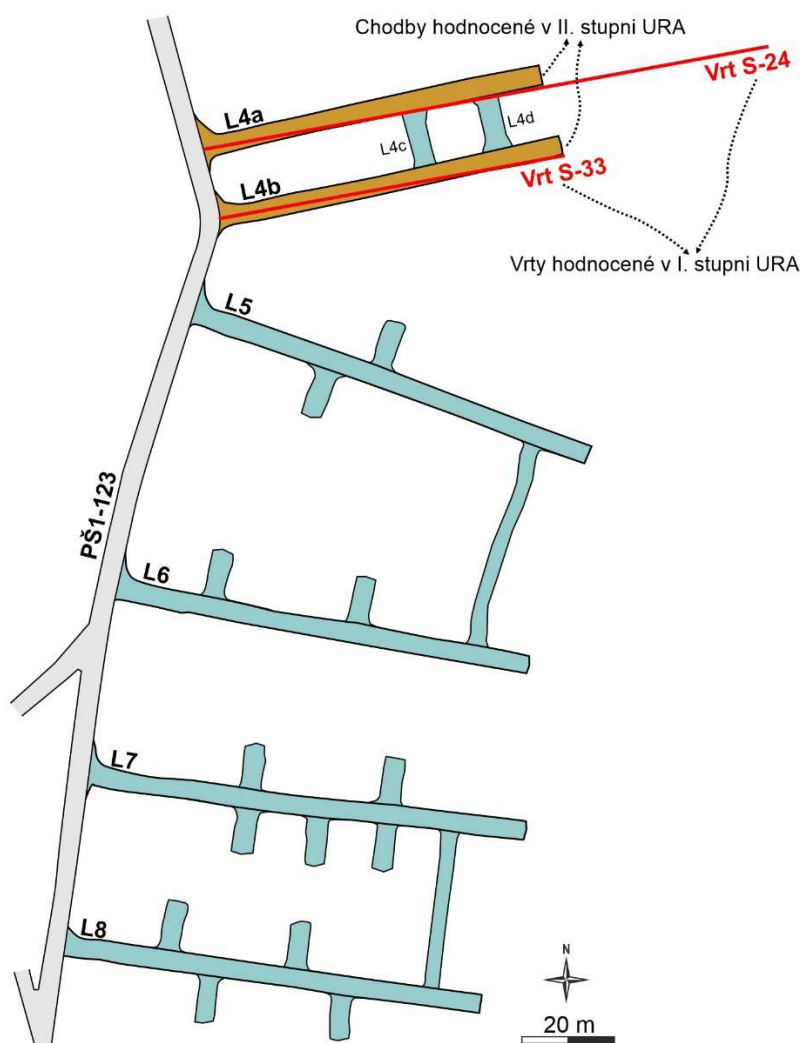
Obr. 10 Fotogrammetrický model chodby L4a s usazenými daty ze strukturní dokumentace a petrologickou charakterizací podél chodby

Model je konstruován jako vizualizace geologické a strukturní stavby PVP Bukov II v oblasti chodeb L4a a L4b. Půdorys strukturního modelu je 120×100 m a jeho střed je situován na úroveň 22,5 m. n. m. Výška modelu je pak 25 m, v rozmezí od -10 až 355 m. n. m. Model byl konstruován v software MOVE™ ve verzi 2023.1.

Výsledný 3D model chodeb L4a a L4b obsahuje kritické struktury a jejich zjednodušené kritické objemy dokumentované na stěnách chodeb a pozorované ve fotogrammetrickém modelu. Tyto jsou vizualizovány ve formě zakřivených čtvercových a obdélníkových ploch protínajících jednotlivé chodby. Jejich orientace odpovídá lokálnímu měření kompasem upravené o korekci konvergence do souřadného systému S-JTSK a lokální magnetickou deklinaci. Kontrola správné orientace strukturních prvků byla provedena pomocí fotogrammetrických modelů chodeb a usazení strukturních měření na odpovídající pozice. Ke snížení datové náročnosti byly chodby rovněž vytvořeny ve formě zjednodušeného mesh-modelu s odpovídajícím půdorysem i výškou, který je součástí modelu.

7 Výsledky použitých metod na PVP II

V rámci celého projektu byly výše popisovanými metodami (kapitola 6) studovány různé parametry a získáno velké množství různých dat detailně charakterizujících horninové prostředí PVP Bukov II (Bukovská et al. 2022, 2023, 2025a; Soejono et al. 2024). V této zprávě jsou popsána a diskutována pouze data a výsledky, které nějakým způsobem vstupují do klasifikačního systému URA. Pro testování I. stupně klasifikačního systému byla použita data z průzkumných vrtů S-24 a S-33 (Obr. 11). Pomocí II. stupně byly zhodnoceny všechny hlavní chodby PVP Bukov II, nicméně v této zprávě jsou detailně popsána data z chodeb L4a a L4b (Obr. 11).



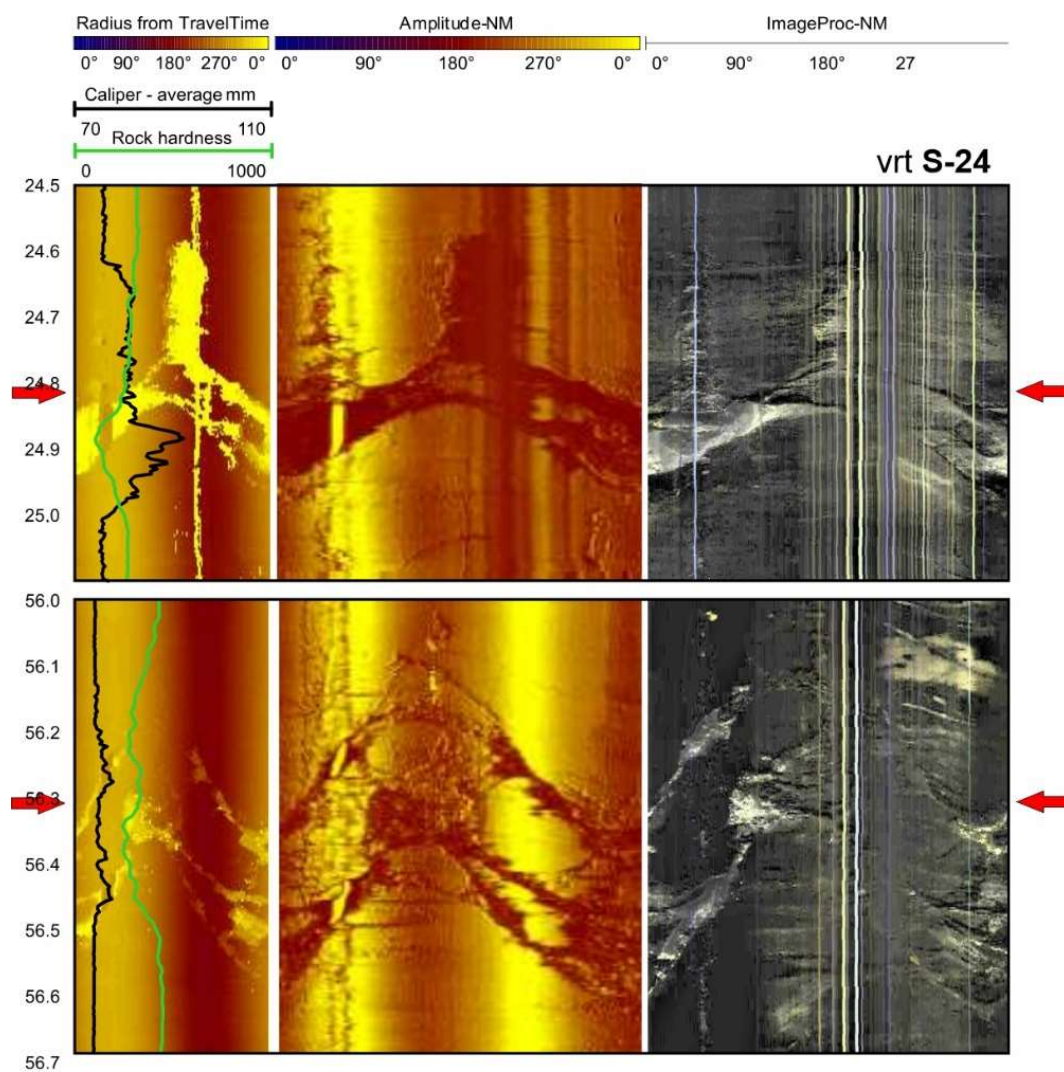
Obr. 11 Mapa chodeb PVP Bukov II použitých pro testování klasifikačního systému URA

7.1 RQD

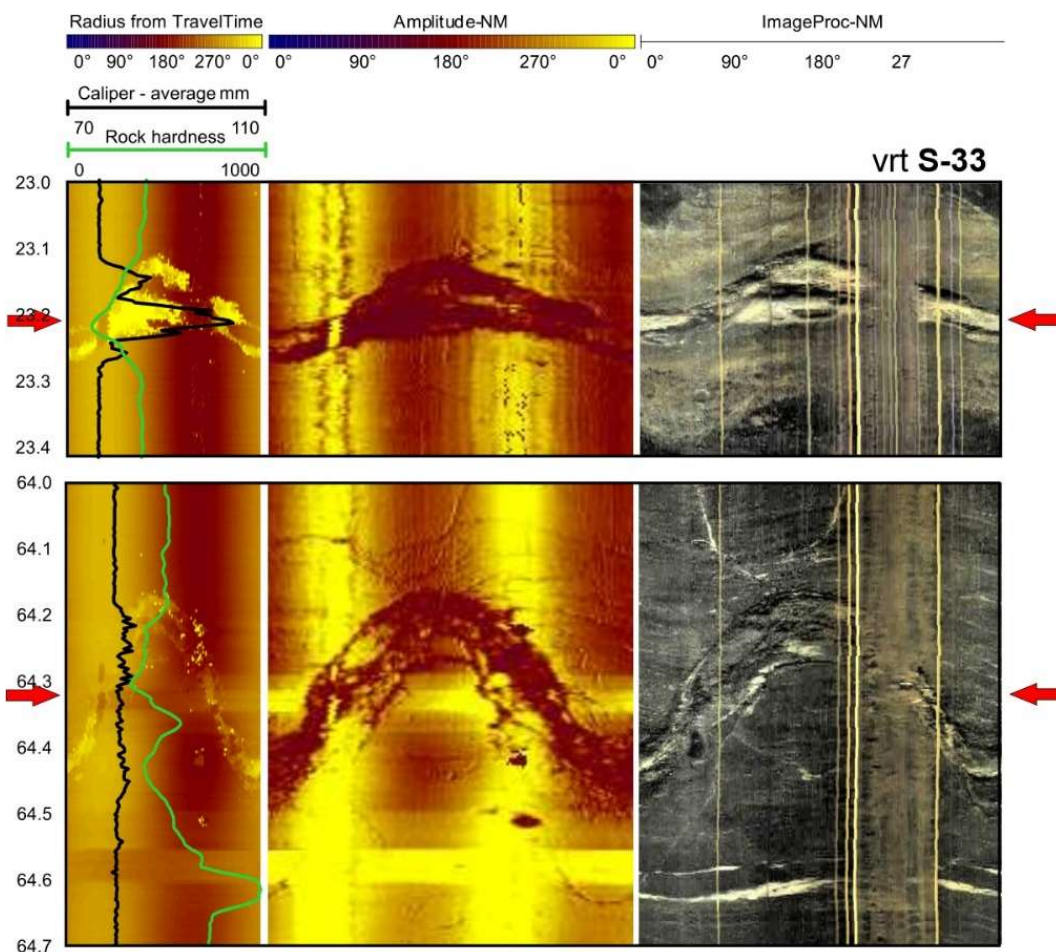
Detailní popis vrtných jader hodnocených vrtů a jejich RQD je uveden ve zprávě Patočka et al. (2018). Hodnoty RQD indexu pro metrové úseky jader průzkumných vrtů S-24 a S-33 jsou uvedeny v celkové klasifikační tabulce v Elektronická příloha 1. Jádra obou vrtů se na základě parametru RQD jeví jako relativně málo porušená a až na výjimky spadají do kategorií dobrá a výborná kvalita (kategorie 1–2; RQD 75–100). V rámci jednočíselného parametru RQD se jeví mírně kvalitnější vrt S-24, nicméně rozdíl je minimální. Vrtné jádro S-24 (L4a) vykazuje výraznější porušení v úvodní části (cca 0–8 m; RQD 62–68) a úsecích cca 50–57 m (RQD 25–44), cca 60–61 m (RQD 72) a cca 80–89 m (RQD 73). Jednočíselná hodnota RQD pro celou délku vrtu odpovídá číslu cca 90,3. Vrtné jádro S-33 není, kromě několika krátkých úseků, výrazněji porušeno a má pro většinu délky relativně vysokou hodnotu RQD (cca 87–100). Největší porušení se vyskytuje v úvodním úseku cca 4–11 m (RQD 40–70) a v několika metrových částech (24–25 m, 27–28 m, 33–34 m; RQD 54–73). Další relativně více porušená část jádra byla zjištěna v úseku 62–65 m (RQD 54–66). Jednočíselná hodnota RQD pro celou délku vrtu odpovídá číslu cca 89,2.

7.2 Karotáž

Detailní popis všech dat získaných pomocí karotážních metod z hodnocených vrtů a jejich interpretace jsou uvedeny ve zprávě Kořalka a Sánchez (2023). Lokalizace jednotlivých kritických struktur zjištěných karotážemi v průzkumných vrtech S-24 a S-33 jsou uvedeny v celkové klasifikační tabulce v Elektronická příloha 1. Pomocí akustické a optické karotáže bylo ve vrtu S-24 indikováno celkem 18 nehomogenit, v intervalech cca 7,5 m, 8 m, 24,5 m, 32–33 m, 50 m, 55 m, 56 m, 63 m a 77,5 m, které byly na základě rozměrů, optických a akustických charakteristik interpretovány jako kritické struktury (Obr. 12). Ve vrtu S-33 bylo detekováno celkem 8 kritických struktur, v intervalech cca 4 m, 7 m, 23–23,5 m a 33–33,5 m (Obr. 13).



Obr. 12 Příkladů kritických struktur (zvýrazněné červenou šipkou) detekovaných akustickou a optickou karotáží ve vrtu S-24



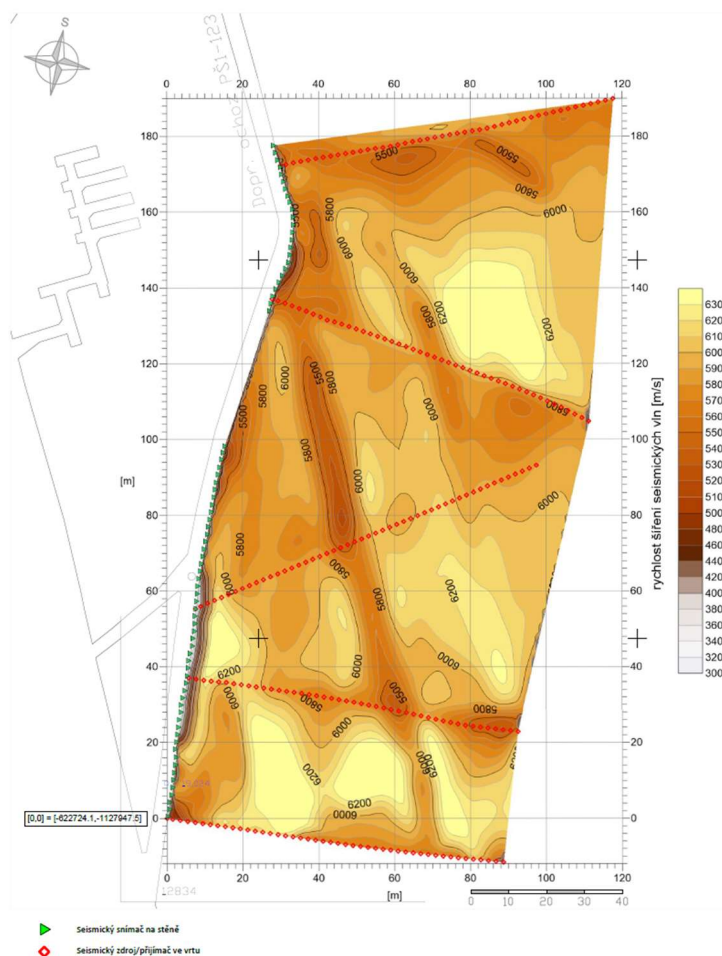
Obr. 13 Příklady kritických struktur (zvýrazněné červenou šipkou) detekovaných akustickou a optickou karotáží ve vrtu S-33

7.3 Geofyzikální průzkum

7.3.1 Seismická tomografie

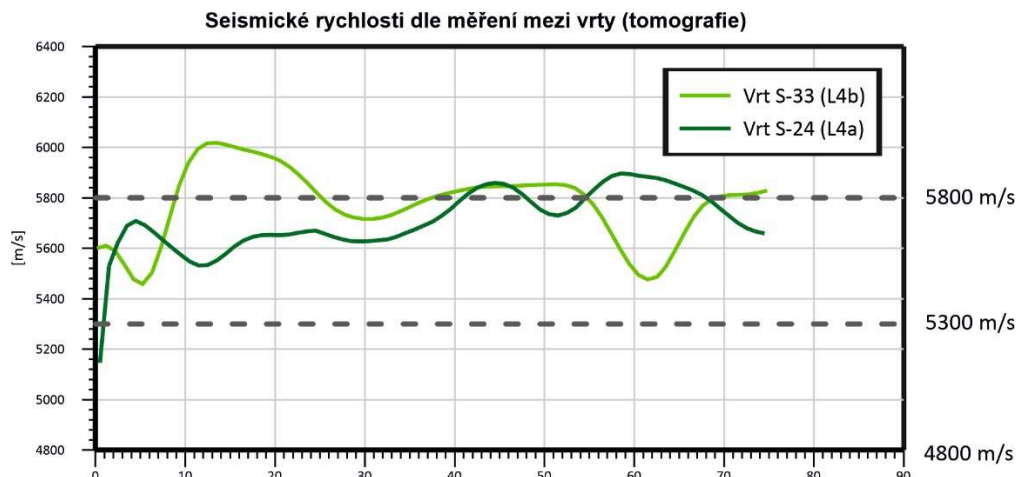
Detailní popis všech dat získaných pomocí seismické tomografie z vrtů v oblasti budoucího PVP Bukov II a jejich interpretace jsou uvedeny ve zprávě Chabr a Filipický (2021). Zjištěné hodnoty seismických rychlostí se v rámci celé zkoumané oblasti pohybují v rozmezí 5400–6300 m.s⁻¹ (Obr. 14). V okrajové části se v blízkosti stěny hlavního překopu samozřejmě objevují i nižší rychlosti (Obr. 14), což je důsledkem mechanického narušení horniny vlivem ražby. S ohledem na výsledky získané při obdobných tomografických průzkumech v prostředí dolu Rožná (Bukovská et al. 2020), lze za neporušenou nebo slabě porušenou považovat horninu, ve které se seismické rychlosti pohybují nad 5800 m.s⁻¹. S vyšší intenzitou porušení seismické rychlosti klesají, oblasti mírně porušené lze charakterizovat rychlostmi 5300–5800 m.s⁻¹, porušení střední intenzity pak charakterizují rychlosti v rozmezí 4800–5300 m.s⁻¹. Intenzivně narušené horniny v blízkém okolí velkých poruchových zón (zóna

R1) vykazují hodnoty seismických rychlostí v rozmezí $4300\text{--}4800\text{ m.s}^{-1}$ a uvnitř poruchové zóny lze pozorovat rychlosti šíření seismických vln v hodnotách $3500\text{--}4300\text{ m.s}^{-1}$.



Obr. 14 Pole seismických rychlostí prostoru budoucího PVP Bukov II sestavené na základě výsledků měření seismické tomografie ve vrtech

Hodnoty rychlostí šíření seismických vln, použité jako parametr v klasifikačním systému, jsou odečteny z výsledného rychlostního pole v pozicích průzkumných vrtů (které odpovídají pozicím plánovaných chodeb) s krokem 1 m. V případě, že plánovaná pozice chodby nebude odpovídat pozici průzkumného vrtu, je možné také odečíst rychlosti seismických vln v pozici budoucí chodby a předat ji do klasifikačního systému. Průběh odečtených seismických rychlostí v závislosti na staničení průzkumného vrtu je zobrazen grafem na Obr. 15. Pro vrt S-24 se odvozené seismické rychlosti pohybují většinou v intervalu $5500\text{--}5700\text{ m.s}^{-1}$. Hranici 5800 m.s^{-1} překračují pouze na metrůžce cca 44 m a 55–68 m. Oproti tomu mají seismické rychlosti pro vrt S-33 větší rozsah s nejnižšími hodnotami cca 5500 m.s^{-1} na metrůžkách cca 10 m a 62 m a vysokými hodnotami cca 6000 m.s^{-1} na metrůžce 11–19 m (Obr. 15).



Obr. 15 Průběh seismických rychlostí v pozicích průzkumných vrtů pro laboratorní chodby odvozený z výsledků měření seismické tomografie. Šedé přerušované linie indikují rozsahy hodnot parametru odpovídající bodovým kategoriím.

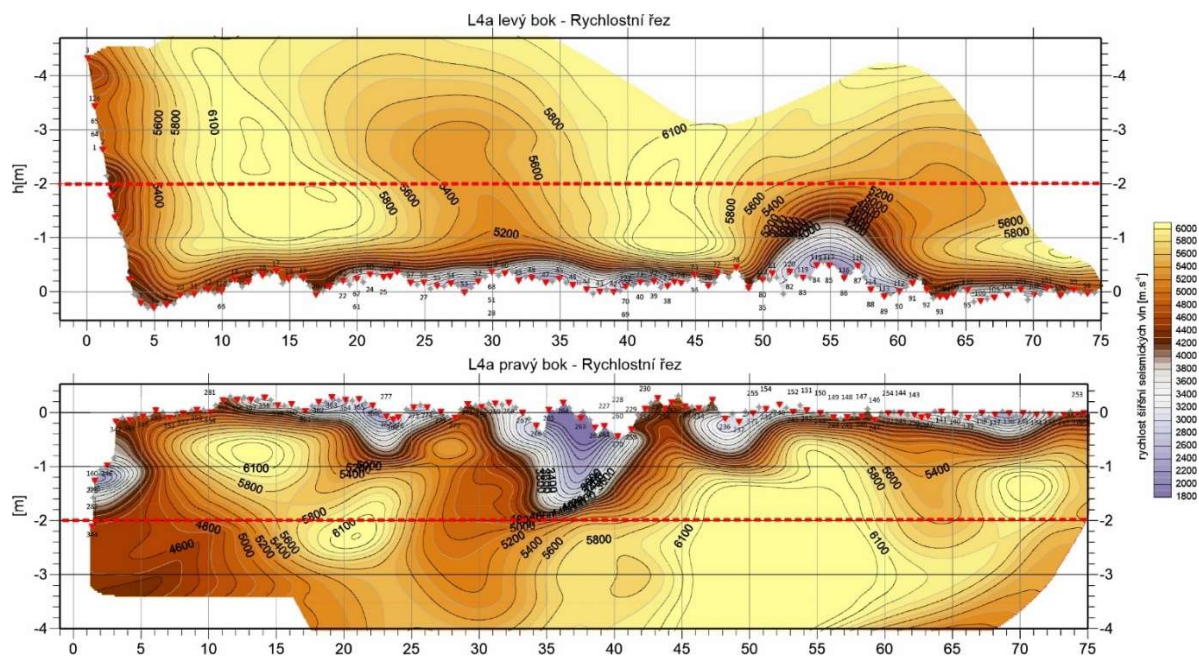
7.3.2 Mělká refrakční seismika ve variantě seismické refrakční tomografie

Výsledky seismických refrakčních měření jsou pro každou stěnu chodby graficky zobrazeny ve formě rychlostních řezů (Obr. 16, Obr. 18) a ve formě diagramů zobrazujících hodnoty seismických rychlostí odečtených hodnot z rychlostního řezu ve vzdálenosti (hloubce) cca 2 m od líce stěny chodby mimo potencionální dosah EDZ a s krokem 1 m podél stěny chodby (Obr. 17). Z důvodu menšího hloubkového dosahu měření jsou na konci stěn hodnoty odečteny z menších vzdáleností (hloubek). Všechny čtyři stěny (chodeb L4a a L4b) vykazují výrazný pokles seismických rychlostí při ústí chodby (rychlosti menší 3000 m.s^{-1}) způsobený porušením ražbou hlavního překopu v minulosti i ražbou samotných chodeb (Obr. 16, Obr. 17, Obr. 18). Ostatní domény nižších seismických rychlostí detekované podél jednotlivých stěn jsou interpretovány jako výsledek tektonického porušení horninového prostředí. Detailní popis všech dat získaných pomocí seismických refrakčních měření v chodbách L4a a L4b a jejich interpretace jsou uvedeny ve zprávě Soejono et al. (2024).

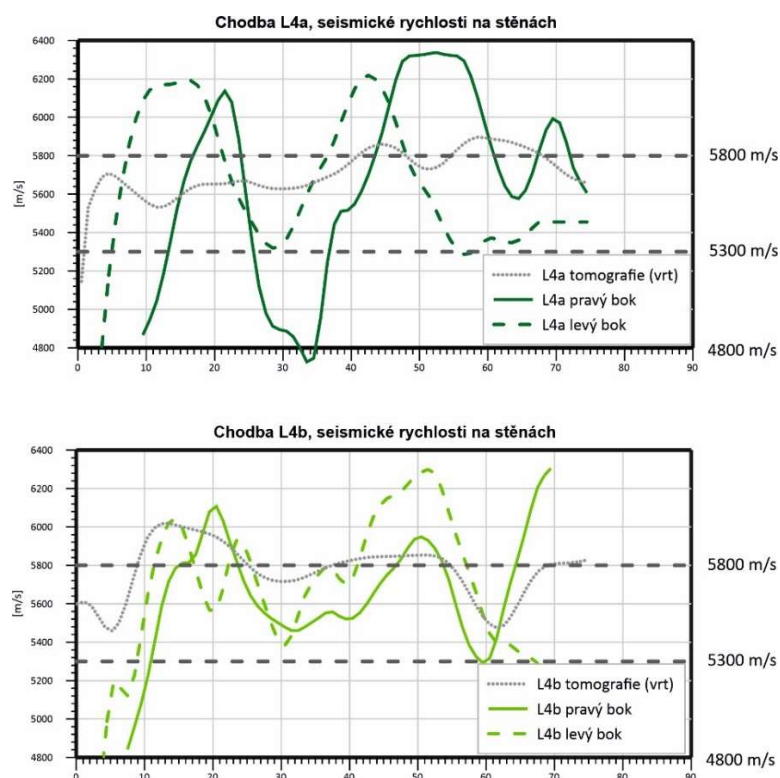
L4a

Na pravé stěně chodby L4a (Obr. 16, Obr. 17) byl zjištěn široký rozptyl seismických rychlostí a je možné rozlišit několik rozdílných částí. Průběh seismických rychlostí podél stěny ukazuje výrazná minima (pod 4800 m.s^{-1}) v úsecích 0–11 m, 27–36 a 70 m a méně výrazný propad v cca 64 m, přecházející na metrážích cca 21 m a 47–56 m do velmi vysokých rychlostí (cca $6000\text{--}6300 \text{ m.s}^{-1}$).

Na levé stěně chodby L4a (Obr. 16, Obr. 17) byly extrémně nízké seismické rychlosti naměřeny pouze na prvních třech metrech. Podél zbytku celé chodby byly odvozeny rychlosti v rozsahu $5300\text{--}6000 \text{ m.s}^{-1}$ s maximálními hodnotami v úsecích 10–18 m a cca 42 m a minimálními hodnotami na cca 30 m a 55–75 m.



Obr. 16 Seismické rychlostní řezy podél stěn chodby L4a. Červená přerušovaná linie ukazuje hloubkovou úroveň, ve které byly odečteny hodnoty rychlostí vstupující jako hodnota parametru do hodnocení.

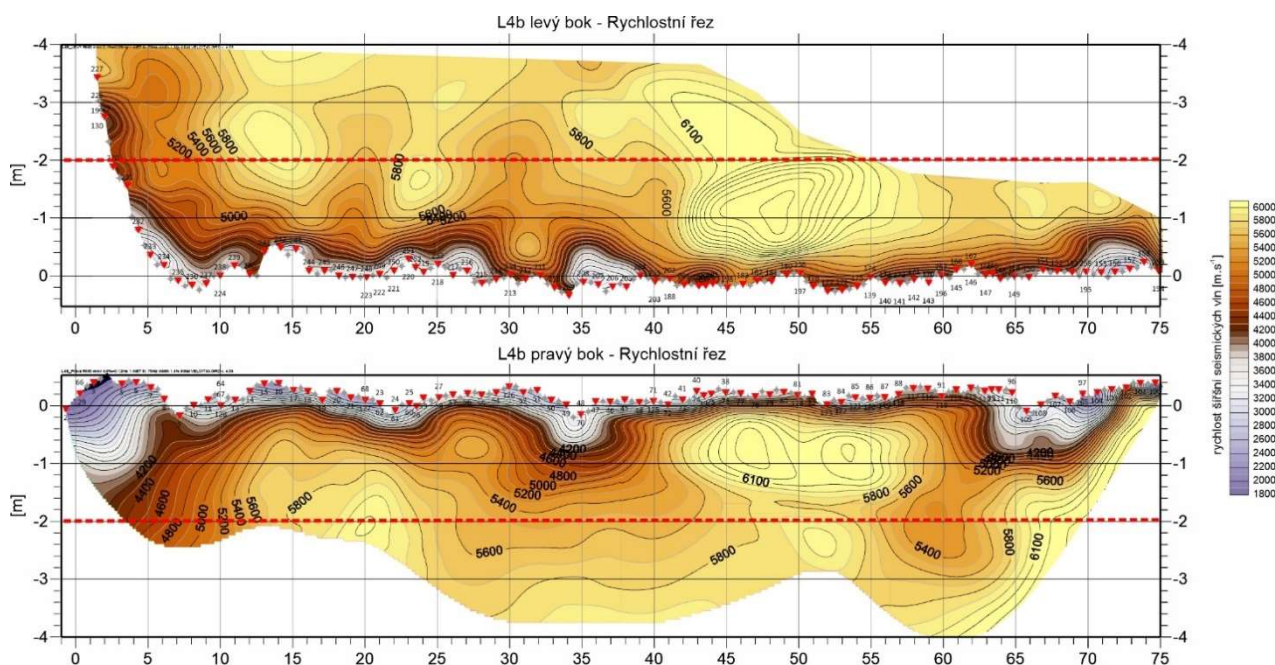


Obr. 17 Hodnoty seismických rychlostí ve stěnách laboratorních chodeb L4a a L4b ve vzdálenosti cca 2 m od líce stěn. Šedá tečkovaná linie zobrazuje hodnoty seismických rychlostí zjištěné seismickou tomografií ve vrtech situovaných v pozici laboratorních chodeb L4a a L4b.

L4b

Na pravé stěně chodby L4b (Obr. 17, Obr. 18) lze pozorovat úsek velice nízkých rychlostí na prvních 8 metrech. Na zbytku stěny byly odvozeny hodnoty seismických rychlostí od 5300 do 6300 m.s⁻¹. Vyšší rychlosti byly zjištěny na metrážích 20 m (6100 m.s⁻¹), 50 m (5900 m.s⁻¹) a 75 m (6300 m.s⁻¹), zatímco v úsecích 25–45 m a 55–63 m byly zjištěny nižší rychlosti (5300–5600 m.s⁻¹).

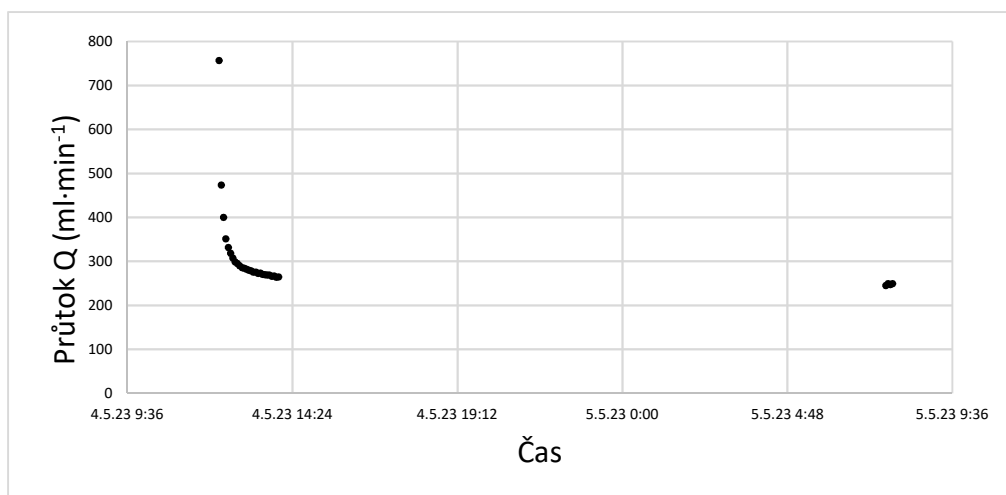
Průběh seismických rychlostí podél levé stěny chodby L4b (Obr. 17, Obr. 18) ukazuje snížené seismické rychlosti v úseku do cca 5 metrů, dvě lokální maxima (cca. 5900 m.s⁻¹) na metrážích 14 m a 23 m a výrazný nárůst rychlostí v úseku 46–55 m (6100–6300 m.s⁻¹). V úsecích 25–45 m a na metrážích 60 m byly naopak zjištěny nižší seismické rychlosti (5300–5450 m.s⁻¹).



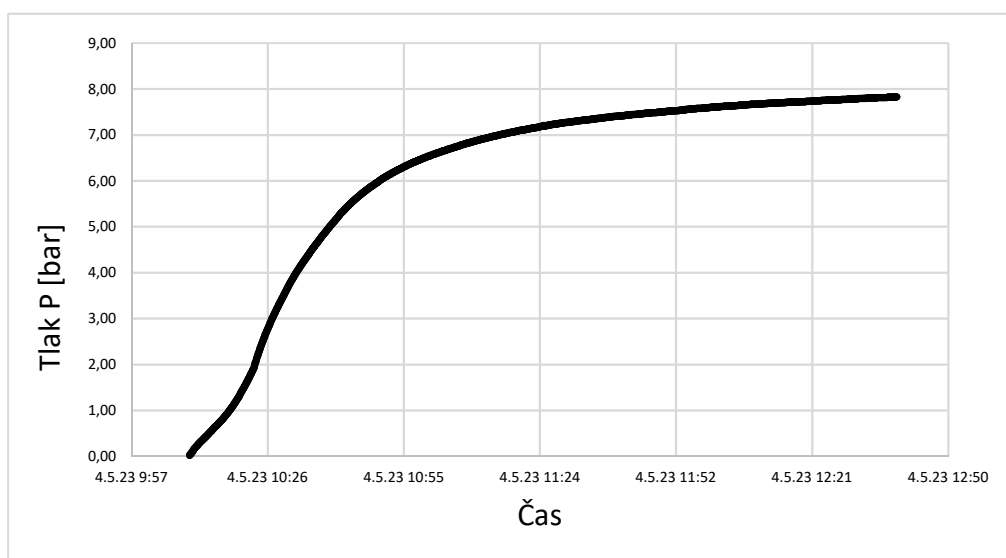
Obr. 18 Seismické rychlostní řezy podél stěn chodby L4b. Červená přerušovaná linie ukazuje hloubkovou úroveň, ve které byly odečteny hodnoty rychlostí vstupující jako hodnota parametru do hodnocení.

7.4 Výsledky vodních tlakových zkoušek

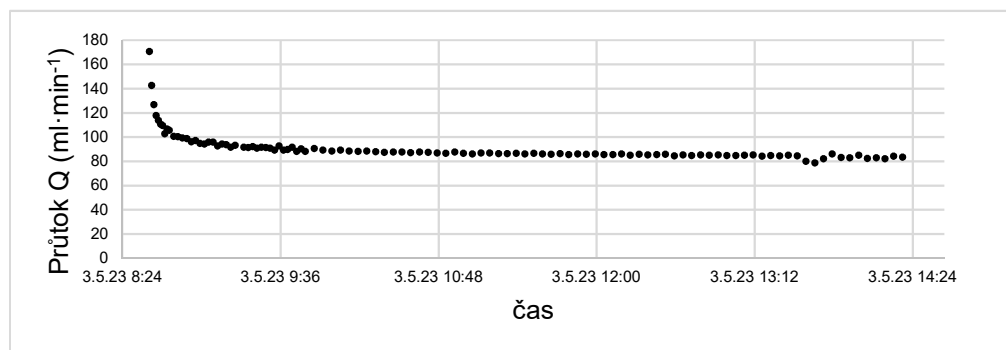
Vodní tlakové zkoušky byly ze dvou hodnocených vrtů provedeny pouze ve vrtu S-33, a to ve dvou intervalech (2–15 m a 15–75,5 m). Detailní popis výsledků vodních tlakových zkoušek vrtů je popsán ve zprávě Soejono et al. (2024). Pro měření byla využita metoda s konstantním tlakem (0 bar) při otevřeném vrtu. V intervalu 2–75,5 m byl zjištěn ustálený odtok 248,5 ml.min⁻¹ (Obr. 19). Přirozený hydrostatický tlak v měřeném úseku vrtu dosahoval 7,83 bar (Obr. 20; výtlačná výška 79,8 m).



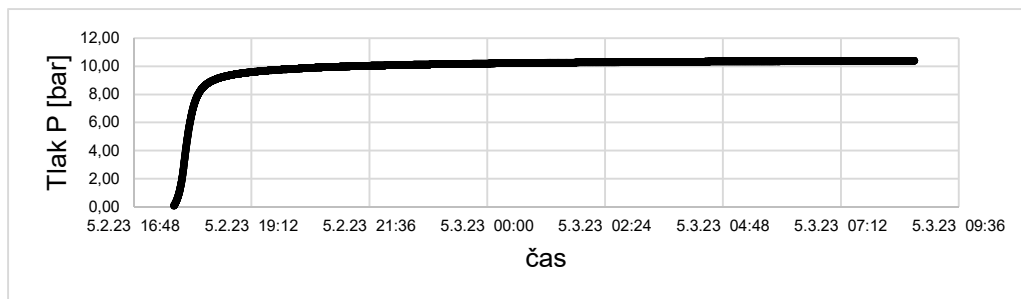
Obr. 19 Měření přirozeného odtoku z intervalu 2–75,5 m vrtu S-33



Obr. 20 Měření přirozeného hydrostatického tlaku v intervalu 2–75,5 m vrtu S-33



Obr. 21 Měření přirozeného odtoku z intervalu 15–75,5 m vrtu S-33



Obr. 22 Měření přirozeného hydrostatického tlaku v intervalu 15–75,5 m vrtu S-33

V intervalu 15–75,5 m byl naměřen ustálený odtok $83,3 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$ (Obr. 21). Přirozený hydrostatický tlak v horninovém prostředí v daném úseku vrtu byl okolo 10,42 bar (Obr. 22; výtlačná výška 106,2 m). Na základě měření VTZ byly stanoveny hodnoty transmisivity (T) a hydraulické vodivosti (K) pro intervaly 2–15 m a 15–75,5 m podle vzorce dle Moye (1967). Transmisivita intervalu 15–75,5 m je získána z rozdílu transmisivit intervalu 2–75,5 m a 2–15 m.

7.5 Výsledky Posiva Flow Log

Měření metodou Posiva Flow Log bylo provedeno v obou průzkumných vrtech S-24 a S-33. Detailní popis kompletních výsledků je uveden ve zprávě Komulainen et al. (2023). Výsledkem měření metodou Posiva Flow Log jsou hodnoty toku vody v jednotlivých měřených sekcích vrtu při režimu bez čerpání/vtláčení vody (FlowH) a při režimu zahrnujícím čerpání/vtláčení vody (FlowL) a hodnoty transmisivity puklin T_{PFL} . Ve vrtu S-24 bylo zjištěno celkově 11 přítoků (Tab. 6) a ve vrtu S-33 celkově 20 přítoků (Tab. 7). Všechny takto zjištěné přítoky jsou interpretované jako projevy přítomnosti vodivých (propustných) struktur.

Tab. 6 Lokalizace vodivých struktur pomocí měření Posiva Flow Log ve vrtu S-24 (chodba L4a). * – hodnoty průtoku pod detekčním limitem (30 ml/h v reálných podmínkách ve vrtu Komulainen et al. 2023)

Depth (m)	FlowH (ml/h)	FlowL (ml/h)	$T_{PFL} \text{ (m}^2\text{/s)}$
26	-104	140	3,16E-10
38,6	-9210	2810	1,56E-08
50,8	-1440	4680	7,94E-09
53,1	-523	495	1,32E-09
54,2	-7300	3430	1,39E-08
54,7	-8660	5410	1,83E-08
57,9	-81	49	1,69E-10
59,9	-687	239	1,20E-09
69,5	-76	*	9,90E-11
69,8	-104	*	1,35E-10
72,6	-229	*	2,97E-10

Tab. 7 Lokalizace vodivých struktur pomocí měření Posiva Flow Log ve vrtu S-33 (chodba L4b). * – hodnoty průtoku pod detekčním limitem (30 ml/h v reálných podmínkách ve vrtu Komulainen et al. 2023)

Depth (m)	FlowH (ml/h)	FlowL (ml/h)	T _{PFL} (m ² /s)
4,2	-2630	972	4,34E-09
6,6	-164	202	4,41E-10
7,1	-375	3310	4,44E-09
7,7	-1900	1940	4,62E-09
8,5	-11700	11800	2,83E-08
9,5	-241	898	1,37E-09
9,9	-131	315	5,39E-10
10,7	-76	174	3,01E-10
12	-44	180	2,70E-10
12,4	-45	165	2,53E-10
19,3	-53	233	3,45E-10
21,4	-2060	11100	1,59E-08
22,5	-44	32	9,14E-11
26,8	-79	158	2,85E-10
29,6	-38	105	1,72E-10
31,2	-77	528	7,27E-10
60,8	-60	*	7,23E-11
63,6	-58	*	6,98E-11
64,1	-232	*	2,78E-10
64,6	-170	*	2,05E-10

7.6 Strukturní záznam

7.6.1 Vrtná jádra S-24 a S-33

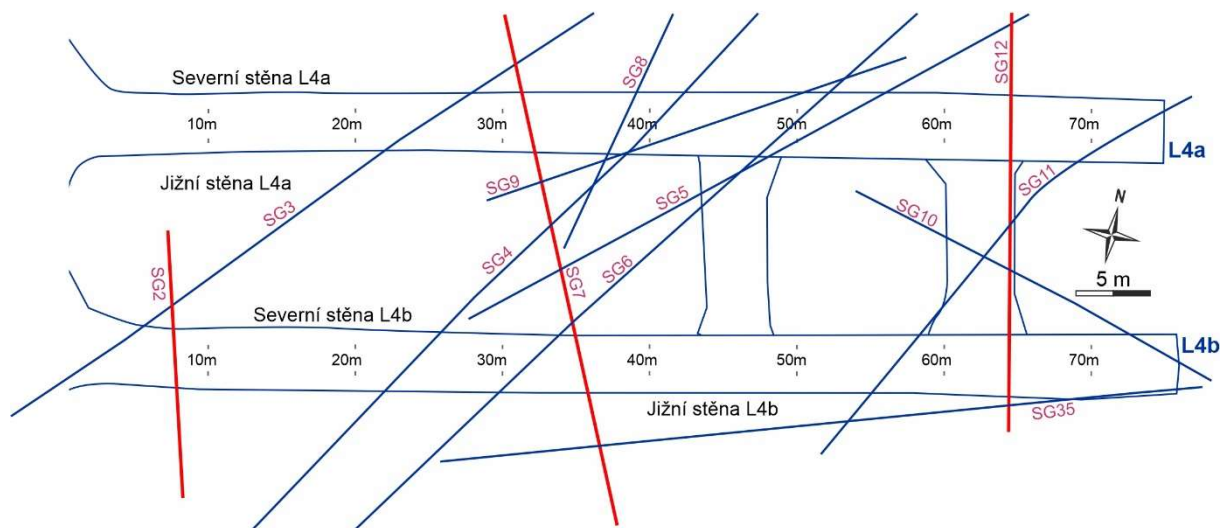
Detailní litologický a strukturní popis vrtných jader hodnocených vrtů je uveden ve zprávě Patočka et al. (2018). Lokalizace jednotlivých kritických struktur zjištěných na jádrech průzkumných vrtů S-24 a S-33 jsou uvedeny v celkové klasifikační tabulce (Elektronická příloha 1). Na jádře vrtu S-24 bylo identifikováno celkem 10 domén (Obr. 23) v intervalech cca 33–36 m, 50–57 m a okolo 79 m, interpretovaných na základě charakteru porušení a výplně jako kritické struktury (kapitola 6.6.1). Na jádře vrtu S-33 bylo detekováno celkem 9 kritických struktur v intervalech cca 0–0,5 m, 6,5–8,5 m, 23–24,5 m, 31–34 m a 64–65 m (Obr. 23).



Obr. 23 Ukázka kritických struktur identifikovaných na vrtných jádrech

7.6.2 Stěny ukládacích chodeb L4a a L4b

Všechna data získaná strukturněgeologickou dokumentací stěn chodeb L4a a L4b jsou detailně popsána ve zprávě Soejono et al. (2024). Zde jsou popsány pouze významné strukturní prvky splňující parametry kritických struktur (kapitola 5.3.1). Strukturní data, rozměry, mineralogie a lokalizace všech kritických struktur pozorovaných na stěnách laboratorních chodeb L4a a L4b jsou uvedeny v tabulce v Elektronická příloha 2. Celková zlomová síť a vztahy mezi jednotlivými kritickými strukturami jsou popsány v kapitole 9 a jejich prostorová distribuce je zobrazená v 3D strukturním modelu (Elektronická příloha 4). V rámci stěn chodeb L4a a L4b se vyskytují dva základní typy kritických struktur. Prvním jsou zóny křehce reaktivované a silně alterované metamorfní foliace o mocnosti cca 0,3–1 m zapadající pod středními úhly k JZ. Jedná se o 0,3–1 m mocné chloritem a biotitem bohaté polohy konkordantní s penetrativní duktilní stavbou, tvořené dominantně biotitem a obsahující místy také chlorit a jílové minerály (Obr. 26a). Dalším typem jsou střížné poruchy (střížné pukliny až malé zlomy) s mocností cca 10–600 mm. Tyto zóny jsou většinou vyplněné kataklastickým materiálem, jílovými minerály, chloritem, karbonáty nebo křemenem (Obr. 25, Obr. 26; Obr. 26). Mocnost a typ výplně je však v rámci jednotlivých struktur velice variabilní.



Obr. 24 Tektonické schéma ukazující kritické struktury (červené – zóny reaktivované foliace, modré – poruchové zóna/zlomy) identifikované v rámci chodeb L4a a L4b

Na severní stěně ukládací chodby L4a bylo identifikováno celkem 8 kritických struktur (Obr. 24; Elektronická příloha 2). Dvě kritické struktury jsou na metrážích cca 32,5 m a 64,5 m reprezentované polohami křehce reaktivovaných foliačních ploch. Zbylých šest struktur jsou střížné pukliny nebo malé zlomy. Větší zlomy s mocností 300–400 mm se nacházejí na metrážích cca 52 a 52,5 m. Zbylé poruchy mají mocnosti do 200 mm.

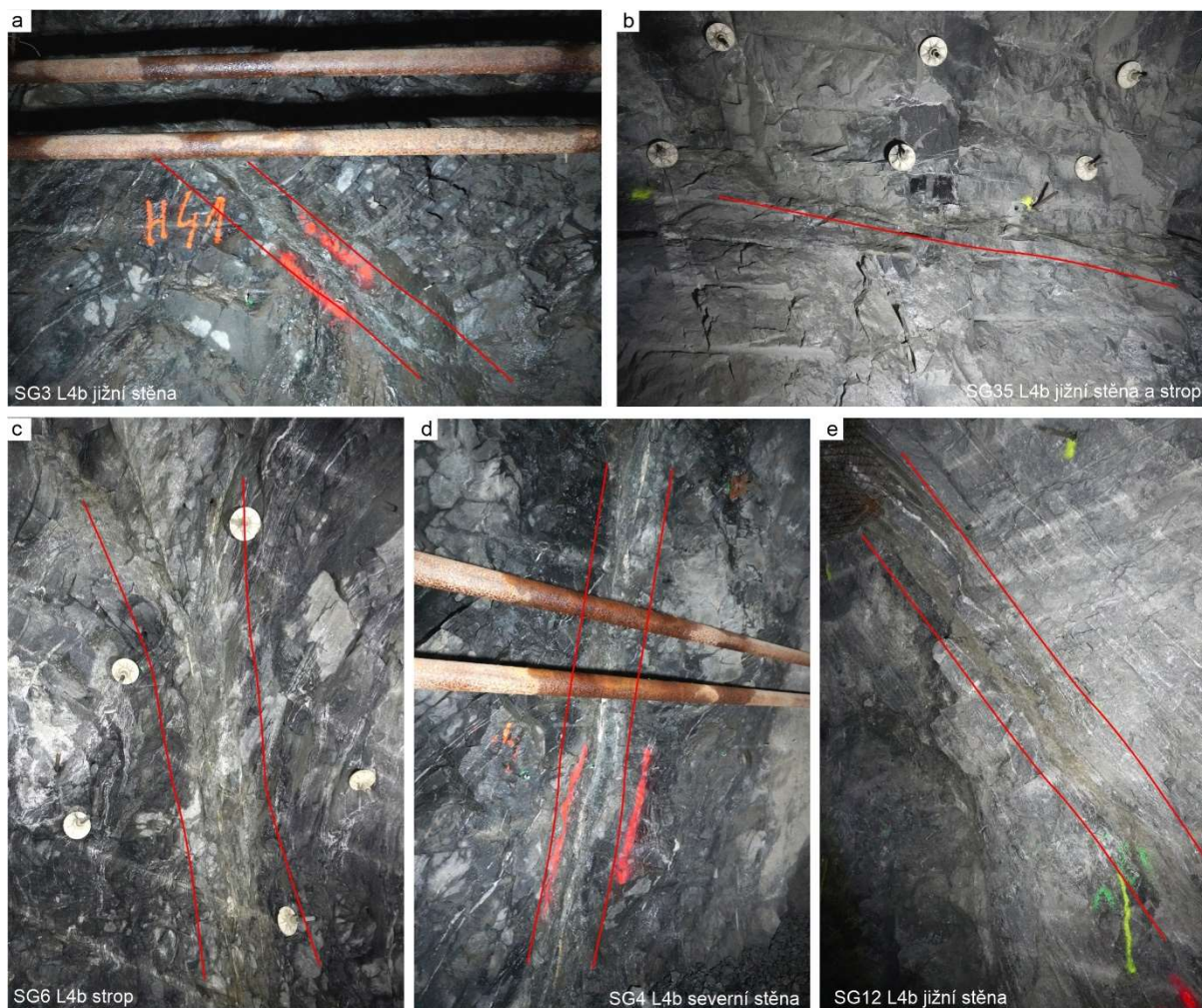
Na jižní stěně ukládací chodby L4a se nachází celkem 9 kritických struktur. Osm z nich jsou struktury průběžné ze severní stěny a jeden zlom pokračuje do čelby chodby L4a (Obr. 24). Z toho se ve dvou případech jedná o cca 1 m široké zóny reaktivované a silně alterované metamorfní foliace (na metráži cca 33 a 64,5 m). Zbylých osm kritických struktur jsou opět střížné poruchy různého měřítka. Dva zlomy dosahují mocností 500–600 mm (na metráži cca 37 a 40 m) zbylé zlomy mají mocnost 100–200 mm (Obr. 24; Elektronická příloha 2).



Obr. 25 Terénní fotografie ukazující příklady kritických struktur v chodbě L4a. (a, b) Zlomové zóny vyplněné chloritem, jílem a karbonáty, (c, d) Zóny křehce reaktivované metamorfní foliace s intenzivní chloritizací původně biotitem bohatých poloh.

Na severní stěně ukládací chodby L4b bylo identifikováno celkem 8 kritických struktur. Z toho se ve třech případech jedná o zóny alterované metamorfní foliace s mocností od cca 200 do 650 mm (na metrážích cca 8,5, 35 a 63,5 m) a ve zbylých případech jde o střížné poruchy s mocností do 300 mm (Obr. 24).

Na jižní stěně ukládací chodby L4b bylo pozorováno celkem 8 kritických struktur, z nichž většina je průběžná ze severní stěny. Z toho jsou tři polohy reaktivovaných foliačních ploch (200–650 mm) a pět střížných poruch s mocností do 300 mm (Obr. 24).

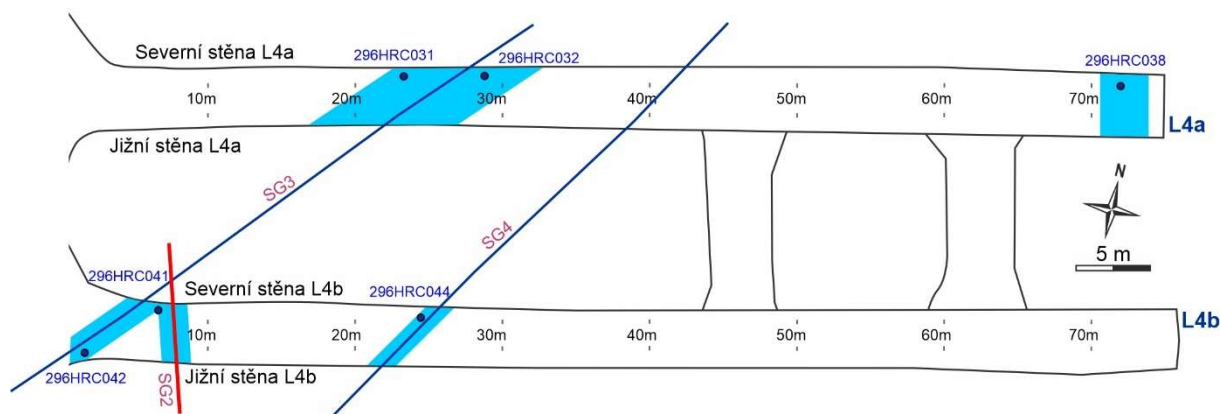


Obr. 26 Terénní fotografie ukazující příklady kritických struktur v chodbě L4b. (a–d) Zlomové zóny vyplněné chloritem, jílem a karbonáty, (e) Zóna křehce reaktivované metamorfní foliace s intenzivní chloritizací původně biotitem bohatých poloh.

7.7 Výsledky hydrogeologické dokumentace

V rámci projektu byly opakovaně sledovány hydrogeologické projevy ve všech vyražených chodbách i jejich vývoj v čase. Kromě parametrů uvedených v kapitole 6.7 byly také sledovány fyzikálně-chemické parametry (pH, měrná elektrická vodivost, obsah rozpuštěného kyslíku, Eh, teplota vody) a chemické složení podzemních vod. Všechna tato data jsou detailně popsána ve zprávách Bukovská et al. (2023, 2025a) a Soejono et al. (2024) a v Elektronická příloha 3. Intenzita a lokalizace jednotlivých průsaků se v čase částečně měnila. V této kapitole je jen stručně popsána lokalizace průsaků/přítoků podzemních vod vstupující do klasifikačního systému (stav ke konci roku 2024). V chodbách L4a a L4b bylo zdokumentováno celkem 12 průsaků/přítoků podzemních vod, z čehož 5 splňuje charakteristiky kritických hydrogeologických projevů (

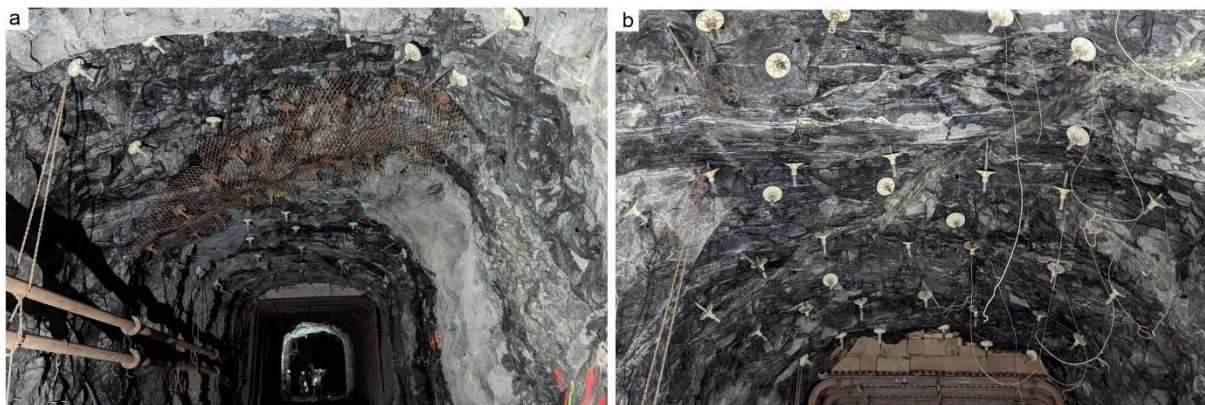
Obr. 27; kapitola 5.4; Elektronická příloha 3). Ve všech případech se tyto průsaky projevují na obou stěnách obou sledovaných chodeb. Kromě jednoho přítoku jsou všechny kritické projevy vázané na konkrétní kritickou strukturu.



Obr. 27 Kritické hydrogeologické projevy a jejich bezpečnostní obálky v chodbách L4a a L4b

V chodbě L4a byly identifikovány celkem dva úseky s kritickými hydrogeologickými projevy. Jedná se o přítoky vázané na zlom s izolační funkcí SG03 (

Obr. 27, průsaky d. b. 296HCR0031 a 296HCR0032) a o výtok z vrtu pro geotechnickou stanici (d. b. 296HCR0038). Na severní stěně a stropu bylo dokumentováno zvodnění v úseku přibližně 22,5 až 35 m v okolí zlomu (Obr. 28). Za kritickou je z hlediska hydrogeologie považována také koncová část chodby v okolí poměrně vydatného výtoku z vrtu v metrůžce od 71,5 do 74,5 m. V jižní stěně a stropu chodby se jedná o metrůžce od 21 do 32 m a od 71,5 do 74,5 m.



Obr. 28 Terénní fotografie ukazující příklady kritických hydrogeologických projevů. (a) Intenzivní zvodnění v okolí zlomu SG03 v chodbě L4a, cca 28 až 32 m, (b) průsaky v okolí zlomu SG04 v chodbě L4b cca 22 až 26 m

V chodbě L4b jsou celkem tři kritické hydrogeologické projevy, dva z nich v okolí zlomů SG03 a SG04 (

Obr. 27) a jeden je vázaný na zónu reaktivované foliace SG02. Na severní stěně a stropu bylo nejvýraznější zvodnění na úseku 2 8,5 až 11 m (zlom SG03, reaktivovaná foliace SG02) a 24 až 26 m (zlom SG04). Na jižní stěně a stropu jsou odpovídající přítoky na metrážích 2 až 4 m, 8 až 10 m a 21 až 24 m. Na uvedené struktury jsou vázány přítoky d. b. 296HCR0041, 296HCR0042 a 296HCR0044.

8 Použití klasifikačního systému URA na příkladu PVP Bukov II

V této kapitole jsou hodnoty klasifikačních parametrů odvozené z výsledků použitých průzkumných metod popsanych v kapitole 7 a charakteristiky identifikovaných kritických struktur a kritických hydrogeologických projevů využity pro zhodnocení horninového prostředí severní části PVP Bukov II (Obr. 11). Za účelem testování nového klasifikačního systému URA byly z hlediska vhodnosti pro ražbu ukládacích chodeb posouzeny I. stupněm průzkumné vrtvy S-24 a S-33. Dále byly za účelem posouzení vhodnosti umístění ukládacích vrtů posouzeny II. stupněm všechny hlavní chodby PVP Bukov II. Detailně jsou v této zprávě diskutovány a vizualizovány pouze výsledky hodnocení stěn chodeb L4a a L4b. Veškerá data vstupující do hodnocení ostatních chodeb jsou detailně popsána ve zprávách Bukovská et al. (2022, 2023, 2025a) a Soejono et al. (2024). Hodnocení chodeb L5, L6, L7 a L8 pomocí II. stupně URA je shrnuté v kapitole 8.3.2. Výsledky hodnocení metrových úseků obou vrtů i stěn všech chodeb jsou uvedeny v celkové klasifikační tabulce v Elektronická příloha 1.

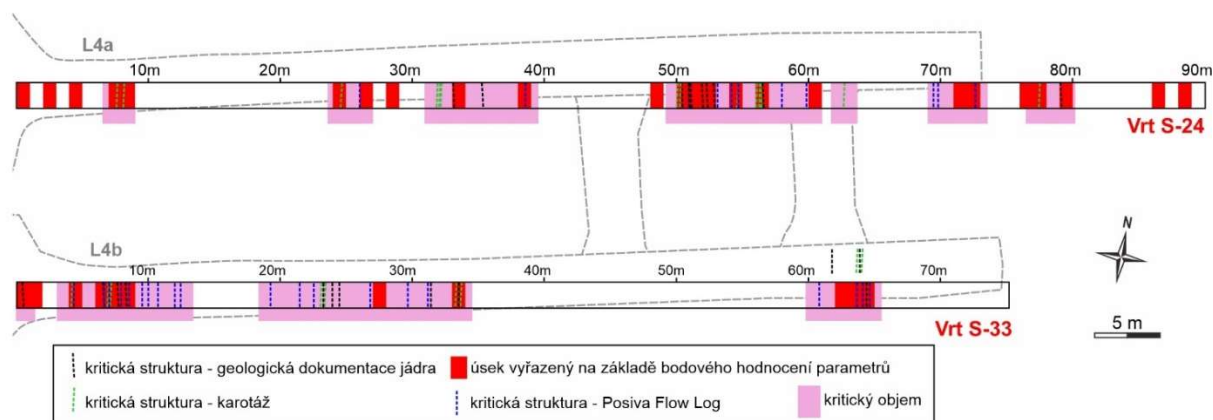
8.1 I. stupeň URA: zhodnocení vrtů S-24 a S-33

8.1.1 Průzkumný vrt S-24

Pro vrt S-24 nebyly provedeny zkoušky VTZ, a proto je hodnocen na základě parametrů A a B. Hodnoty RQD indexu byly stanoveny dokumentací vrtného jádra (kapitola 7.1) a z výsledků seismické tomografie byly odečteny rychlosti šíření seismických vln (kapitola 7.3.1).

Vrt S-24 je dlouhý celkově 124 m (Obr. 11), nicméně vzhledem k délce chodby L4a (75 m) bylo hodnoceno pouze prvních 89 m (Obr. 29). Na základě nízké hodnoty jednoho nebo obou použitých klasifikačních parametrů (vztah [2b] v kapitole 5.5.1) je 25 metrových úseků vrtu S-24 klasifikováno jako nevhodné (Obr. 29, Elektronická příloha 1).

V dalším kroku byly na základě lokalizace kritických struktur (kapitoly 7.2, 7.5, 7.6.1) stanoveny kritické objemy (kapitola 6.8.1). V rámci vrtu S-24 byly kumulativně definovány kritické objemy v sedmi úsecích v celkové délce 32,08 m (Obr. 29, Elektronická příloha 1). Kritické objemy mírně rozšiřují nevhodné úseky stanovené pomocí klasifikačních parametrů A, B, C (Obr. 29, Elektronická příloha 1).



Obr. 29 Výsledky hodnocení vrtů S-24 a S-33 I. stupněm klasifikačního systému URA na půdorysu vyražených chodeb L4a a L4b

8.1.2 Průzkumný vrt S-33

Vrt S-33 byl hodnocen na základě všech tří parametrů v délce 75,4 m (Obr. 11). Na rozdíl od vrtu S-24 byly na vrtu S-33 provedeny i zkoušky VTZ (kapitola 6.4), takže kromě hodnot RQD indexu a rychlosti šíření seismických vln byl do bodového hodnocení zahrnut i parametr C hydraulické konduktivity (kapitola 7.4). Vrt S-33 je dlouhý celkově 75 m (Obr. 11) a byl hodnocen v celé délce (Obr. 29). Na základě hodnot tří použitých klasifikačních parametrů a jejich bodového hodnocení je celkem 11 metrů vrtu S-33 klasifikováno jako nevhodné (Obr. 29, Elektronická příloha 1). Ve vztahu k identifikovaným kritickým strukturám byly v rámci vrtu S-33 kumulativně vymezeny kritické objemy ve čtyřech úsecích v celkové délce 33,82 m (Obr. 29, Elektronická příloha 1). Na rozdíl od vrtu S-24 kritické objemy na vrtu S-33 významně rozšiřují nevhodné úseky stanovené pomocí klasifikačních parametrů (Obr. 29, Elektronická příloha 1).

8.2 II. stupeň URA: zhodnocení chodeb L4a, L4b

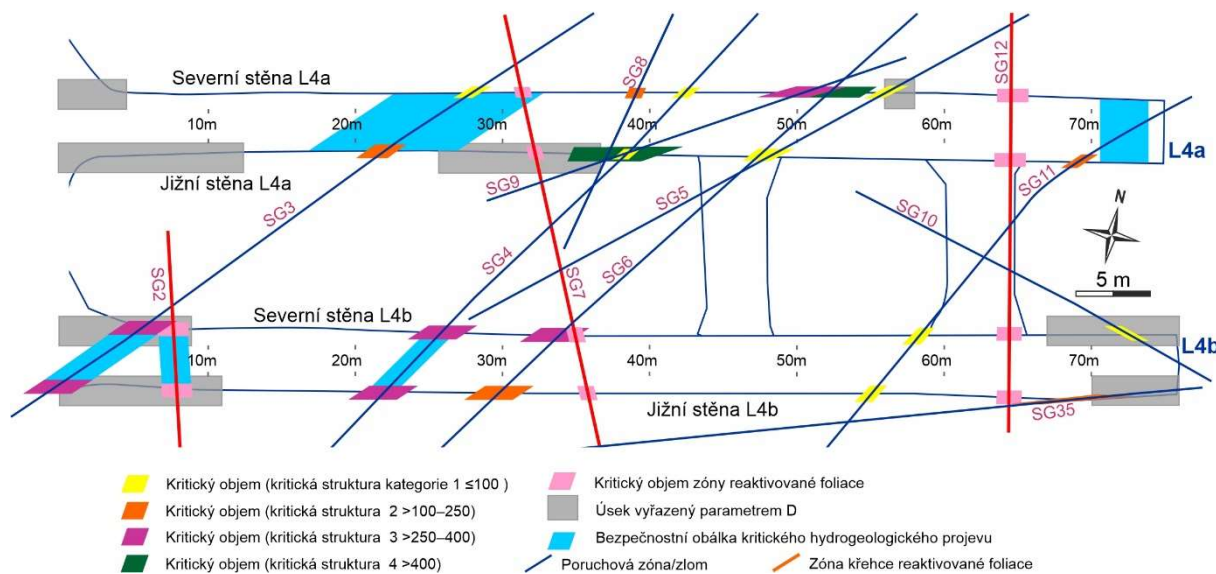
8.2.1 Chodba L4a

Na severní stěně chodby L4a bylo na základě nízké hodnoty klasifikačního parametru D (vztah [3] v kapitole 5.6.1) 7 úseků (0–5 m a 56–58 m) klasifikováno jako nevhodných (Obr. 30, Elektronická příloha 1). Na jižní stěně chodby L4a bylo hodnoceno 24 úseků (0–13 m a 26–37 m) jako nevhodných (Obr. 30, Elektronická příloha 1).

V druhé fázi II. stupně hodnocení byly na základě lokalizace kritických struktur (kapitola 5.3.1) stanoveny kritické objemy (kapitola 5.3.2). Na severní stěně chodby L4a byly kumulativně definovány kritické objemy v sedmi úsecích v celkové délce 12,45 m (Obr. 30, Elektronická příloha 1). Pro jižní stěnu chodby L4a byly pro kritické struktury definovány kritické objemy v celkovém rozsahu 16,45 m (Obr. 29, Elektronická příloha 1). Kritické objemy podstatně

rozšiřují nevhodné úseky stanovené pomocí klasifikačního parametru v první fázi II. stupně (Obr. 30, Elektronická příloha 1).

Na základě identifikace dvou kritických hydrogeologických projevů (kapitola 5.4) byly na severní i jižní stěně chodby L4a stanoveny bezpečnostní obálky v celkovém rozsahu 15 m (Obr. 30, Elektronická příloha 1).



Obr. 30 Schéma ukazující výsledky II. stupně hodnocení stěn laboratorních chodeb

8.2.2 Chodba L4b

Na severní stěně chodby L4b bylo jako nevyhovujících vyhodnoceno celkem 17 úseků ve dvou intervalech 0–9 m a 67–74,4 m (Obr. 30, Elektronická příloha 1). Na jižní stěně chodby L4b bylo hodnoceno 18 úseků (0–11 m, 59–60 m a 70–74,4 m) jako nevhodné (Obr. 30, Elektronická příloha 1).

V druhé fázi II. stupně hodnocení byly pro kritické struktury zjištěné na severní stěně chodby L4b stanoveny kritické objemy v sedmi úsecích o celkové délce 14,75 m (Obr. 30, Elektronická příloha 1). Pro jižní stěnu chodby L4b byly pro kritické struktury definovány kritické objemy v celkovém rozsahu 14,92 m (Obr. 29, Elektronická příloha 1).

Pro tři kritické hydrogeologické projevy dokumentované na severní i jižní stěně chodby L4b byly stanoveny jejich bezpečnostní obálky v celkovém rozsahu 9 m (Obr. 30, Elektronická příloha 1).

8.3 Shrnutí výsledků hodnocení

8.3.1 Chodby L4a a L4b

Celkové výsledky I. stupně hodnocení dvou průzkumných vrtů jsou kombinací bodového hodnocení klasifikačních parametrů a kritických objemů (kapitola 8.1). Pro vrt S-24 (89 m) bylo v I. stupni hodnocení dohromady klasifikováno jako vhodných 43,98 m, což činí 49,49 % celkové délky vrtu (Elektronická příloha 1). Průzkumný vrt S-33 byl hodnocen v jeho celé délce (75,4 m). Celkově bylo na vrtu S-33 definováno jako vhodných 44,55 m tvořící 59,08 % celkové délky vrtu (Elektronická příloha 1).

Tab. 8 Celkové délky a procenta vhodných částí hodnocených vrtů (I. stupeň) a stěn laboratorních chodeb L4a a L4b (II. stupeň)

I. stupeň							
Vrt S-24				Vrt S-33			
43,98 m		49,49 %		44,55 m		59,08 %	
II. stupeň							
L4a severní stěna		L4a jižní stěna		L4b severní stěna		L4b jižní stěna	
43.4 m	57.9 %	26.3 m	35.1 %	44.9 m	56.36 %	47.95 m	63.59 %

Výsledky II. stupně hodnocení čtyř stěn dvou ukládacích chodeb jsou superpozicí bodového hodnocení jednoho klasifikačního parametru, stanovených kritických objemů pro kritické struktury a bezpečnostních obálek pro kritické hydrogeologické projevy.

Na severní stěně chodby L4a bylo v sedmi úsecích celkově klasifikováno 43,42 m jako vhodných (Obr. 30; Elektronická příloha 1). To představuje 57,9 % délky stěny. Pro jižní stěnu chodby L4a dopadlo celkové hodnocení výrazně hůře. Na této stěně bylo vyhodnoceno pět vhodných intervalů o celkové délce 26,3 m, což reprezentuje pouze 35,1 % délky stěny (Obr. 30; Elektronická příloha 1).

V rámci severní stěny chodby L4b bylo v pěti intervalech celkově stanoveno 44,9 vhodných metrů, představujících 56,36 % délky stěny (Obr. 30; Elektronická příloha 1). Výsledné hodnocení jižní stěny chodby L4b dopadlo ze všech hodnocených stěn nejlépe. Na této stěně bylo na sedmi úsecích dohromady 47,95 m klasifikováno jako vhodných. To reprezentuje 63,59 % délky stěny (Obr. 30; Elektronická příloha 1).

8.3.2 Chodby L5, L6, L7 a L8

Výsledky II. stupně hodnocení stěn ostatních hlavních chodeb PVP Bukov II jsou velice podobné jako pro chodby L4a a L4b. Součty vhodných úseků na stěnách těchto chodeb se

pohybují v rozsahu cca 36–68 % délky stěny (Elektronická příloha 1; Tab. 9). Nejhůře byla vyhodnocena severní stěna chodby L6 (36,2 %) a nejlépe severní stěna chodby L5 (59,8 %).

Prostorová distribuce kritických struktur identifikovaných v celém prostoru PVP Bukov II je zobrazená v strukturněgeologické mapě (Obr. 3) a v 3D strukturněgeologickém modelu (Elektronická příloha 5). Vlastnosti kritických struktur pozorovaných na jednotlivých stěnách jsou popsány v Elektronická příloha 2. Všechny kritické hydrogeologické projevy a jejich bezpečnostní obálky jsou uvedeny v Elektronická příloha 3.

Na severní stěně chodby L5 bylo identifikováno pět kritických struktur a dva hydrogeologické kritické projevy. V kombinaci s úseky vyřazenými na základě hodnot klasifikačního parametru D, bylo na této stěně celkově klasifikováno 55,0 m jako vhodných (Tab. 9; Elektronická příloha 1). To představuje 59,8 % délky stěny. Na jižní stěně chodby L5 byly zjištěny čtyři kritické struktury a dva hydrogeologické kritické projevy, nicméně podstatně větší intervaly byly vyloučeny díky nízkým sesmíckým rychlostem. Na této stěně bylo vyhodnoceno pět vhodných intervalů o celkové délce 39,0 m, což reprezentuje pouze 42,4 % délky stěny (Tab. 9; Elektronická příloha 1).

V rámci severní stěny chodby L6 se nacházejí tři kritické struktury a jeden hydrogeologický kritický projev a celkově bylo na pěti úsecích stanoveno 33,3 vhodných metrů, představujících 36,2 % délky stěny (Tab. 9; Elektronická příloha 1). Výsledné hodnocení jižní stěny chodby L6 dopadlo výrazně lépe. Na této stěně jsou také tři kritické struktury a jeden hydrogeologický kritický projev, díky příznivějším hodnotám parametru D bylo celkově na sedmi úsecích klasifikováno 45,0 m jako vhodných. To reprezentuje 48,9 % délky stěny (Obr. 30; Elektronická příloha 1).

Tab. 9 Celkové délky a procenta vhodných částí hodnocených stěn laboratorních chodeb L4, L6, L7 a L8 (II. stupeň)

Chodba	Severní stěna		Jižní stěna	
L5	55,0 m	59,8 %	39,0 m	42,4 %
L6	33,3 m	36,2 %	45,0 m	48,9 %
L7	44,8 m	45,7 %	44,0 m	44,9 %
L8	43,0 m	46,2 %	54,5 m	58,6 %

Na severní stěně chodby L7 byly identifikovány čtyři kritické struktury a jeden hydrogeologický kritický projev. V kombinaci s úseky vyřazenými na základě hodnot klasifikačního parametru D, bylo na této stěně celkově klasifikováno 44,8 m jako vhodných (Tab. 9; Elektronická příloha 1). To představuje 45,7 % délky stěny. Na jižní stěně chodby L7 bylo zjištěno sedm kritických struktur a jeden kritický hydrogeologický projev, což definovalo pět vhodných intervalů o celkové délce 44,0 m. To reprezentuje 44,9 % délky stěny (Tab. 9; Elektronická příloha 1).

V rámci severní stěny chodby L8 se nachází pět kritických struktur a jeden hydrogeologický kritický projev a celkově bylo na osmi úsecích stanoveno 43,0 vhodných metrů, představujících 46,2 % délky stěny (Tab. 9; Elektronická příloha 1). Na jižní stěně chodby L8 bylo pozorováno celkem sedm kritických struktur a jeden hydrogeologický kritický projev. Obecně vyšší hodnoty parametru D vedly k tomu, že celkově na sedmi úsecích bylo klasifikováno 54,5 m jako vhodných. To reprezentuje 58,6 % délky stěny (Obr. 30; Elektronická příloha 1).

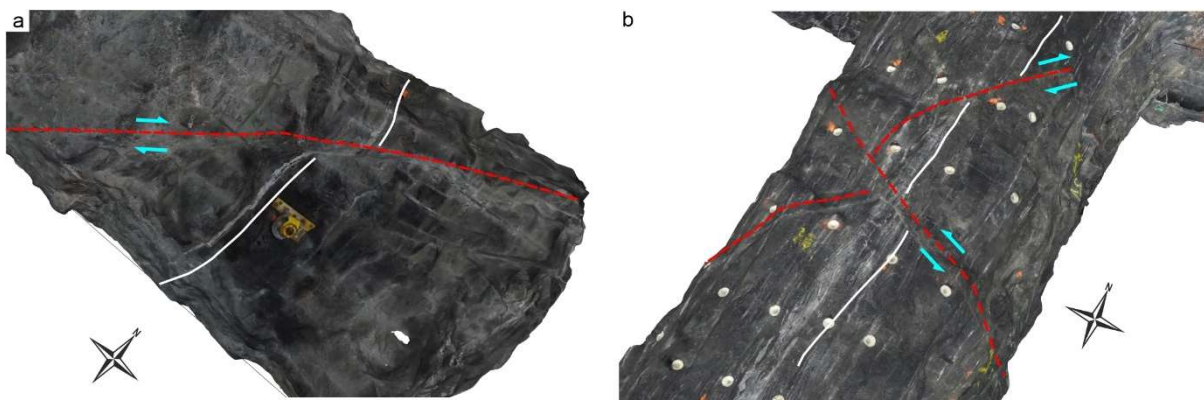
9 3D vizualizace

Pro lepší představu o celkové geometrii sítě kritických struktur, kritických hydrogeologických projevů a výsledků hodnocení byla provedena 3D vizualizace PVP Bukov II (Elektronická příloha 4, Elektronická příloha 5). Severní část PVP Bukov II, zahrnující chodby L4a a L4b, byla v detailu zpracována do komplexního 3D strukturního modelu. Ten obsahuje fotogrammetrické zpracování kompletních chodeb, systém kritických struktur a jejich kritických objemů, kritické hydrogeologické projevy a jejich bezpečnostní obálky a výsledky hodnocení klasifikačního systému URA (Obr. 31; Obr. 32; Obr. 33; Obr. 34; Obr. 35; Elektronická příloha 4).

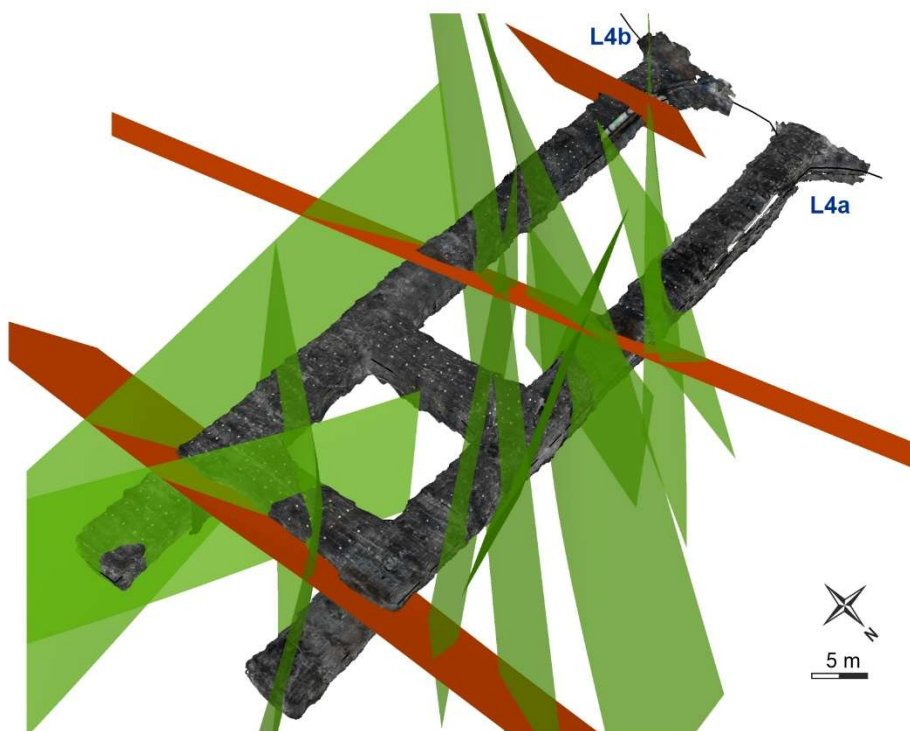


Obr. 31 Půdorys 3D strukturního modelu zlomové sítě severní části PVP Bukov II. Zelené plochy představují poruchové zóny a oranžové plochy představují zóny křehce reaktivované metamorfní foliace.

Tyto 3D vizualizace klíčových prvků vstupujících do klasifikace horninového masivu a výsledků hodnocení umožňují jejich lepší prezentaci a využití. Je možné si tak lépe představit, jaká je reálná prostorová konfigurace vyřazujících prvků a vhodných, resp. nevhodných částí hodnoceného horninového bloku.



Obr. 32 Detaily fotogrammetrického modelu ukazující kinematiku a vzájemné vztahy některých kritických struktur (červeně) na stropěch laboratorních chodeb. (a) Pravostranný zlom SG11 na konci chodby L4a, (b) křížení dextrálního zlomu SG11 posouvavého mladší levostranný poruchovou zónou SG10 v chodbě L4d.

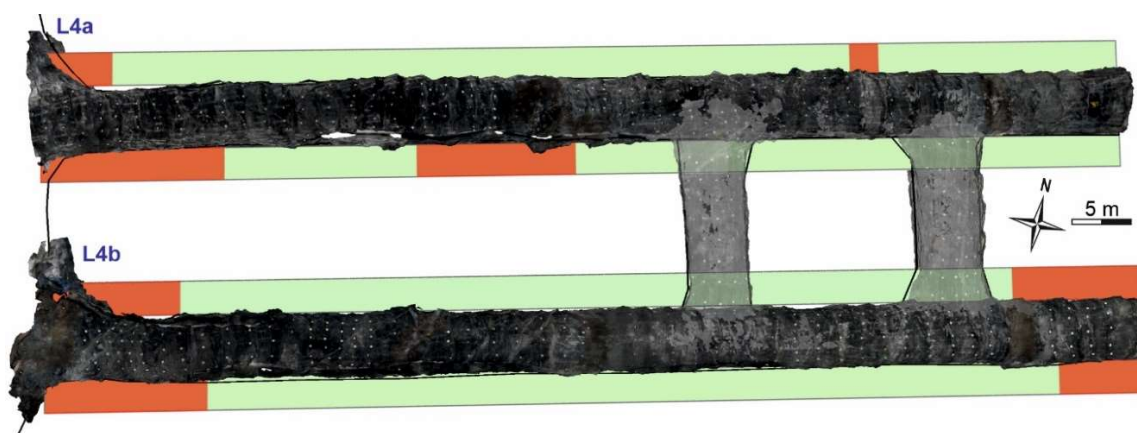


Obr. 33 Šikmý náhled na 3D strukturní model zlomové sítě severní části PVP Bukov II. Zelené plochy představují poruchové zóny a oranžové plochy představují zóny křehce reaktivované metamorfní foliace.

Samotný 3D model ukazuje především komplikovanou strukturní stavbu PVP Bukov II (Obr. 31; Obr. 32; Obr. 33; Elektronická příloha 4). Ta je tvořená poměrně velkým množstvím různých typů poruchových zón (kapitola 7.6.2). Poruchová síť je tvořená třemi zónami reaktivované foliace zapadající souhlasně s penetrativní metamorfní stavbou pod středními úhly k JZ a sedmi subvertikálními zlomy se ssv.–jjz. až sv.–jz. průběhem (Obr. 31; Obr. 33).

Chodbu L4b navíc postihuje jeden subvertikální zlom sz.– jv. průběhu a jeden zlom s průběhem VSV–ZJZ, mírně šikmý k ose chodby (Obr. 24; Obr. 31; Obr. 33).

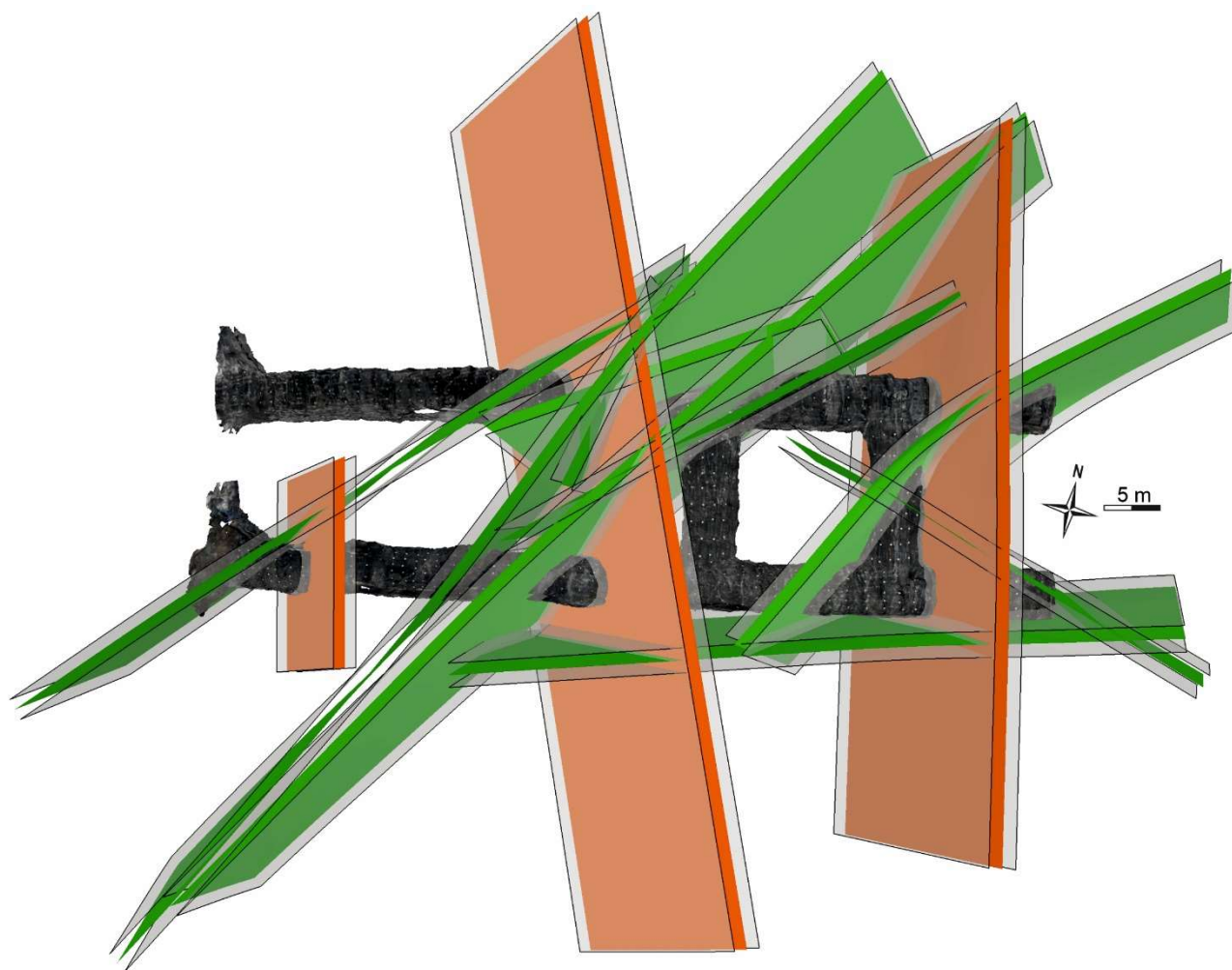
Tyto kritické struktury postihující hodnocený a zobrazovaný horninový blok tvoří sukcesi několika generací deformačních zón vzniklých během dlouhodobé a polyfázové křehké tektonické historie celé oblasti. Na modelu je také vidět, že maximální posuny na identifikovaných kritických strukturách jsou maximálně v řádu desítek cm (Obr. 32). Dále je dobře patrné, že důležité zóny křehce reaktivované foliace (oranžové plochy v Obr. 31; Obr. 33) nejsou výrazněji posouvány protínajícími zlomovými zónami (zelené plochy v Obr. 31; Obr. 33), což naznačuje jejich simultánní reaktivaci.



Obr. 34 3D vizualizace výsledků první fáze II. stupně bodového hodnocení stěn laboratorních chodeb. Zelená barva reprezentuje úseky klasifikované jako vhodné a červená jako nevhodné.



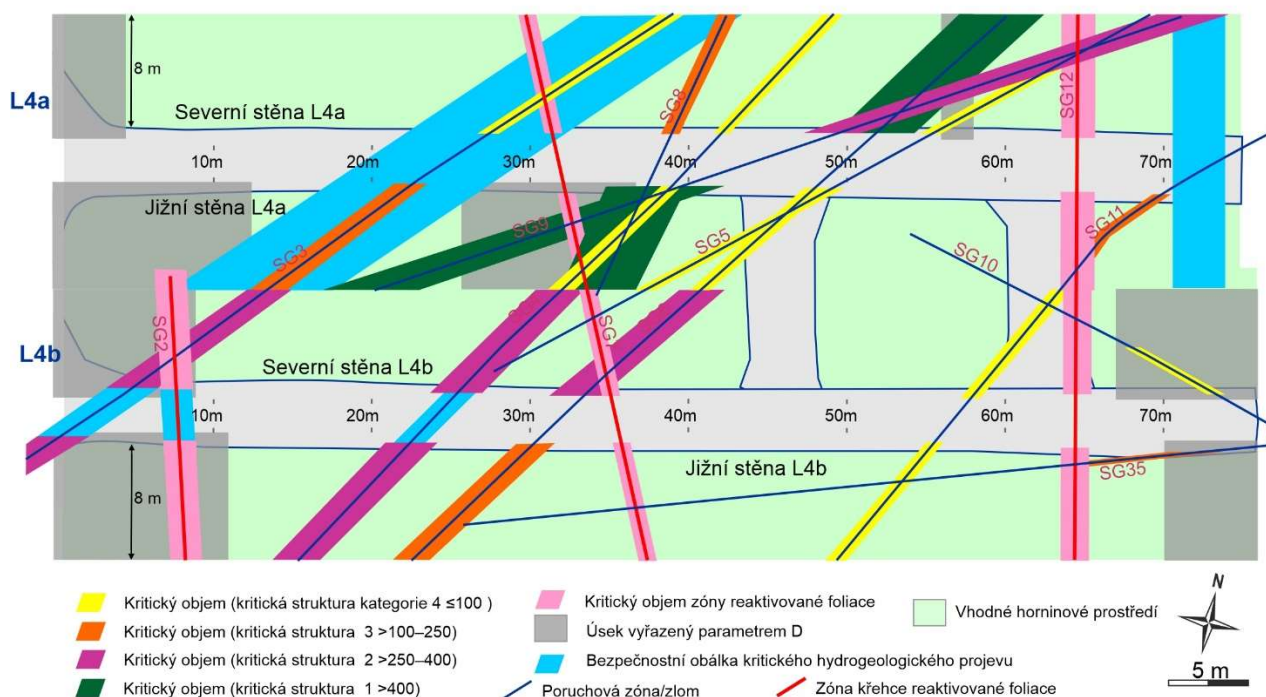
Obr. 35 3D vizualizace celkových výsledků druhé fáze II. stupně hodnocení stěn laboratorních chodeb. Zelená barva reprezentuje úseky klasifikované jako vhodné a červená jako nevhodné.



Obr. 36 3D vizualizace kritických struktury a jejich kritických objemů (pro zjednodušení je v tomto 3D modelu použita pro všechny struktury jednotná mocnost kritických objemů 1 m)

10 Implikace pro technické řešení HÚ

Výsledky hodnocení horninového bloku mají sloužit jako výchozí podklad pro plánování konstrukčních technických parametrů HÚ, jako je umístění uzavíracích a těsnících zátek nebo rozmístění ukládacích vrtů (Hausmannová et al. 2023). Pro tyto úvahy je nutné definovat celkový rozsah vhodných, resp. nevhodných částí hodnoceného horninového bloku. Do úvah o vhodných částech horninového masivu v prostoru za hodnocenou stěnou je, kromě vyřazených úseků samotných stěn, nezbytné zahrnout i pokračování identifikovaných kritických struktur a kritických hydrogeologických projevů.



Obr. 37 Rozmístění vhodných/nevhodných částí horninového masivu severní části PVP Bukov II ve vzdálenosti 8 m od stěn chodeb L4a a L4b

Reálná distribuce vhodných částí horninového prostředí je zobrazena světle zelenou plochou na Obr. 37. Ta je zde zobrazena do vzdálenosti 8 m od stěny, což odpovídá maximální předpokládané hloubce plánovaných ukládacích vrtů (Hausmannová et al. 2023). Na tomto obrázku je patrné, že rozsah vhodných částí horninového prostředí je výrazně redukován průběhem jak kritických struktur a jejich kritických objemů, tak i kritických hydrogeologických projevů a jejich bezpečnostních obálek. Pokračování kritických struktur za stěnu chodby je samozřejmě v 3D modelu předpokládané a založené na aproximaci reálných projevů jednotlivých struktur na stěnách. Nicméně pro oblast několika prvních metrů za stěnou je věrohodnost 3D strukturního modelu velmi vysoká a pokračování většiny kritických struktur velice pravděpodobné až jisté. V některých případech je, vzhledem k nízkému úhlu kritické struktury k průběhu chodby a větší vzdálenosti od dokumentovaného projevu na stěně, jejich

pokračování nejisté. Otázkou je například, jak daleko pokračuje zlom SG10 od západní stěny chodby L4d směrem k L4a (Obr. 37). Dalším příkladem je pokračování zlomu SG35 zjz. směrem jižně od jižní stěny L4b (Obr. 37).

Prostorová distribuce a velikost oblastí vhodného horninového prostředí (Obr. 37) ukazuje, že v rámci čtyř hodnocených stěn je možné vyhradit pouze několik relativně malých oblastí, do kterých je možné lokalizovat ukládací vrtý. Vhodné části jsou v úvodu severní stěny chodby L4a (cca 5–21 m), na dvou úsecích severní stěny chodby L4b (cca 14–22 m a 40–58 m) a v úvodu jižní stěny chodby L4b (cca 9–21 m). Další dvě potenciálně vhodné části na jižní stěně chodby L4a (50–65 m) a jižní stěně chodby L4b (35–55 m) jsou komplikovány předpokládaným pokračování poruchových zón SG10, resp. SG11. Jak je popsáno výše, existence těchto dvou struktur je v těchto místech relativně nejistá. Celkově lze konstatovat, že horninové prostředí hodnocené části PVP Bukov II není pro budování HÚ a ukládacích prostor příliš příznivé. To je způsobeno především velkým stupněm křehkého porušení této oblasti. Vzhledem k regionální geologické a tektonické stavbě oblasti, reologickému a mechanickému charakteru vysoce anizotropních metasedimentárních komplexů to není překvapivý výsledek a odpovídá předpokladům členů výzkumného týmu.

Pro praktické využití výsledků klasifikace horninového masivu, a hlavně pro možnosti umístění ukládacích vrtů mají kritické struktury a jejich celková 3D geometrie klíčovou roli. Technické řešení HÚ a orientace plánovaných průzkumných vrtů a ukládacích chodeb musí být navrženy s ohledem na orientaci hlavních geologických struktur. Předběžná představa o tektonické síti, musí být založena na informacích získaných během předchozích povrchových průzkumných prací, z přístupových chodeb apod. Na základě výsledků hodnocení vyražených chodeb je vhodné operativně zvolit vhodnou orientaci dalších průzkumných vrtů a ukládacích chodeb, které by měly respektovat reálnou strukturněgeologickou situaci a zvýšit tak úložný potenciál hodnoceného masivu. V případě PVP Bukov II by se při otočení chodeb o cca 45° ve směru hodinových ručiček zvýšila celková plocha vhodná pro umístění ukládacích vrtů. Na druhou stranu by to znamenalo o něco horší situaci z hlediska stability výrubu. Pro efektivní plánování konfigurace hlubinného úložiště je zásadní věrohodný 3D model kritických struktur a kritických hydrogeologických prvků. Pro reálné umístění ukládacích vrtů je nutné vzít v úvahu nutnost umístění těsnících zátek v úvodních částech chodeb a vzdálenost mezi jednotlivými ukládacími vrtý, danou typem ukládaného materiálu a tepelnými parametry hornin.

11 Diskuze

Nový klasifikační systém horninového prostředí URA prezentovaný v této zprávě byl navržen jako nástroj pro stanovení vhodnosti horninového masivu pro ražbu ukládací chodby a pro posouzení ukládacích chodeb HÚ z hlediska umístění konstrukčních prvků a ukládacích vrtů. Základním cílem tak bylo vytvořit jednoduchý, efektivní a prakticky použitelný nástroj pro kategorizaci horninového masivu pro reálné použití v podmínkách budování HÚ. Hlavním požadavkem na klasifikační systém je, aby hodnocení bralo ohled na dlouhodobou bezpečnost úložiště. Systém byl navržen pro prostředí vysoce metamorfovaných metasedimentárních a metavulkanických hornin. Po zohlednění lokálních geologických poměrů je možné ho upravit pro použití v jiných typech hornin.

Hodnotící systém URA má dvoustupňovou strukturu, ve které každý stupeň zahrnuje dvě na sebe navazující fáze. První fáze je pro oba stupně numerická, využívající bodového ohodnocení hodnot klasifikačních parametrů. Ve druhé fázi jsou následně vyřazeny úseky hodnocené chodby na základě identifikovaných kritických struktur a přiřazených kritických objemů a kritických hydrogeologických projevů a jejich bezpečnostních obálek.

V následujících kapitolách jsou shrnuty výsledky testování klasifikačního systému URA v reálných podmínkách nově budovaných podzemních chodeb a diskutovány zkušenosti získané při pracích na tomto projektu a potenciální nedostatky jednotlivých metod a klasifikace jako celku.

11.1 Závěry testování klasifikačního systému URA na PVP Bukov II

Klasifikační systém URA byl aplikován na nově vybudované podzemní chodby Podzemního výzkumného pracoviště (PVP) Bukov II v hloubce cca 500 m pod povrchem (Obr. 11; kapitola 8). Použitím hodnotícího postupu se povedlo úspěšně definovat vhodné a nevhodné části horninového masivu (kapitola 8.3) a také zobrazit 3D konfiguraci výsledků hodnocení (kapitola 8.34).

V průměru 54,3 % délky dvou hodnocených průzkumných vrtů bylo v rámci I. stupně klasifikováno jako vhodné. V rámci II. stupně hodnocení bylo jako vhodných pro umístění ukládacích vrtů vyhodnoceno průměrně 49,6 % (rozmezí 35,1–63,59 %) délky stěn všech chodeb. Kritické objemy ve většině případů významně rozšířily nevhodné části hodnocených vrtů nebo stěn ukládacích chodeb, což platí pro oba stupně hodnotícího procesu. Toto souvisí se vzájemnou orientací definovaných kritických struktur a orientací jednotlivých chodeb.

Tyto výsledky rámcově odpovídají předpokladům pro horninové prostředí PVP Bukov II. Výsledky hodnocení stěn byly porovnány s celkovou geometrií systému kritických struktur, které dále rozšiřují nevhodné oblasti horninového masivu vymezené v první fázi II. stupně. Toto srovnání ukázalo, že průběh kritických struktur a jejich kritických objemů často

znemožňuje umístění ukládacích vrtů i v částech stěn hodnocených jako vhodné. To jasně ukazuje, že pro hodnocení vhodnosti stěn ukládacích chodeb pro umístění vrtů jsou klíčové zejména kritické geologické struktury a jejich prostorové uspořádání. Detailní 3D strukturní model je nezbytným předpokladem pro efektivní využití výsledků klasifikace a pro praktickou aplikaci výsledků klasifikačního procesu v oblasti výběru vhodných míst pro ukládání.

Na základě zkušeností získaných při vývoji a testování hodnotících mechanismů a výsledků hodnocení dvou vrtů a čtyř stěn dvou laboratorních chodeb PVP Bukov II lze konstatovat, že navržený klasifikační systém URA je funkční a může být v budoucnu použitelným nástrojem při pracích na podzemních částech hlubinného úložiště radioaktivního odpadu.

11.2 Specifika horninového prostředí PVP Bukov II

Na základě výsledků hodnocení popsanych v předchozí kapitole a zkušeností z prací v dole Rožná, PVP Bukov I a PVP Bukov II je zjevné, že lokální geologické a strukturněgeologické charakteristiky mají zásadní vliv jak na konstrukční parametry horninového prostředí, dlouhodobou bezpečnost, tak i na možnosti klasifikačního systému jako takového. Nejdůležitější charakteristikou horninového masivu PVP Bukov II je intenzivní metamorfní foliace se složitou vrásovou geometrií, která je typická pro všechny zastoupené horninové typy. Planární metamorfní stavba ve vysoce metamorfovaných horninách představuje silnou mechanickou anizotropii a výrazně ovlivňuje litologickou a strukturněgeologickou homogenitu a systematičnost. Důležitým aspektem je křehká reaktivace predisponovaných heterogenit a struktur (metamorfní foliace), která produkuje významné zóny s podstatně horšími mechanickými a transportními vlastnostmi. Zóny reaktivované foliace představují současně preferenční cesty proudění podzemní vody a mohou zprostředkovat propojení mezi většími strukturami (zlomy). V průběhu výstavby dochází k otevírání foliačních ploch a rozšíření zvodnění na větší vzdálenosti. Podobné vlastnosti horninového prostředí je možné očekávat i v jiných oblastech Českého masivu tvořených dominantně vysoce metamorfovanými metasedimentárními horninami.

11.3 Limity a nejistoty použitých metod

Při klasifikaci horninového masivu je nezbytné zohlednit omezení použitých výzkumných metod a nejistoty spojené s vyhodnocením a interpretací získaných dat. Heterogenita geologických a strukturních vlastností, nepřesnost měření a vlivy spojené s ražbou či provozem podzemního díla mohou některé výsledky ovlivnit, a proto je potřeba k nim přistupovat kriticky. Testováním klasifikačního systému URA v podmínkách PVP Bukov II byly identifikovány některé metodologické problémy, které se projevují v podobě specifických nejistot. Pro minimalizaci vlivu těchto omezení, je nutné vzájemně kombinovat výsledky více metod. Interpretace dat různého typu je často do určité míry subjektivní a závisí na zkušenostech a znalostech konkrétního pracovníka. Každá metoda má své specifické výhody a nevýhody. Je důležité brát v potaz tato omezení a volit pro daný účel vhodné metody a jejich

parametry. Důležité je také pečlivě vyhodnotit kvalitu získaných dat a zohlednit všechny možné zdroje nejistoty při jejich interpretaci.

Mezi potencionální problémy patří nedostatky v ukládání a značení vrtných jader vedoucí k jejich posunu vůči reálné metráži vrtu. To může vést k nesprávnému přiřazení RQD indexu metrovým úsekům hodnoceného vrtu a ke zkreslení klasifikačního parametru A. Manipulace s vrtnými jádry musí být pozorně prováděna proškoleným personálem/vrtnou osádkou. Problematika a pokyny pro manipulaci s vrtným jádrem jsou detailně popsány ve zprávě Soejono et al. (2024). Další možnou nejistotou je subjektivita vyhodnocení karotážích dat. Kvalita interpretace a zpracování výsledků akustické i optické karotáže je silně závislá na zkušenosti pracovníka. Detailní metodické pokyny k zpracování dat z akustické a optické karotáže jsou uvedeny ve zprávě Soejono et al. (2024).

Chyby a nejistoty ve výsledcích seismických měření zpracovaných ve variantě tomografie mezi vrty a refrakční tomografie měřené na stěnách laboratorních chodeb, které jsou využity pro klasifikaci prostředí dle rychlostí šíření seismických vln, mohou mít několik příčin. Obvykle je jako nejvýznamnější zdroj chyb uváděno nepřesné určení tzv. času prvního nasazení, tedy čas příchodu vlnění k přijímači. V konkrétním případě měření v prostoru PVP Bukov II byly zpracovávány seismické záznamy většinou poměrně kvalitní, přesto není snadné vždy zaručit bezchybné odečtení časů prvního nasazení. K větším nejistotám dochází zejména v místech, kdy je snímač (geofon) umístěn do silně porušené horniny a je obtížné zajistit dobrý kontakt mezi snímačem a prostředím. Chybu do výsledků také může zanést nesprávné určení pozice snímačů (geodetické nebo fotogrammetrické zaměření). V konkrétním případě výsledků seismických měření na stěnách laboratorních chodeb v prostoru PVP Bukov II lze nejistotu v určení seismických rychlostí stanovit na 150 m.s^{-1} .

Vodní tlakové zkoušky poskytují cenné informace o hydraulických vlastnostech prostředí, ale mají omezení dané nízkou prostorovou rozlišovací schopností. Změřené hodnoty se vztahují k relativně dlouhým úsekům, což neumožňuje přesné určení místa, kde dochází ke změnám propustnosti hornin. Další nevýhodou je časová náročnost těchto zkoušek. Metoda Posiva Flow Log umožňuje detekovat přítoky vody, ale existuje riziko falešně pozitivních výsledků. Měření jsou prováděna v částečně nasyceném prostředí. Před měřením je nutné naplnit vrt a okolní puklinový systém vodou. Detekovaný přítok může indikovat pouze přítomnost otevřené pukliny naplněné vodou před začátkem testu, která nemá významnější vliv na celkovou propustnost horninového prostředí a není propojena s významnější strukturou. To znamená, že metoda nemusí vždy spolehlivě indikovat skutečnou významnější poruchu.

Terénní geologická a strukturní dokumentace v podzemních chodbách čelí několika významným omezením, která ovlivňují přesnost a spolehlivost získaných dat. Omezené měřítko dokumentace způsobuje, že je obtížné přesně určit délku a charakter poruch, zejména těch větších reprezentujících kritické struktury. Šířka chodeb neumožňuje získat úplný obraz o geometrii a vzájemných vztazích jednotlivých struktur. Tato nejistota komplikuje určení možného posunu na dané struktuře. Mocnost a typ výplně poruchové zóny jsou hlavními kritérii pro zařazení struktury mezi kritické struktury (kapitola 5.3.1). Variabilita vlastností poruch

představuje další problém. Mocnost a typ výplně poruch se mohou značně měnit podél jejich průběhu, což ztěžuje stanovení jejich významnosti pro stabilitu a dlouhodobou bezpečnost. Složitost puklinových systémů je ovlivněna přítomností metamorfní foliace, její časté reaktivace a indukovaného porušení způsobeného ražbou chodeb. Tato kombinace faktorů vede k nesystematickému uspořádání puklinových setů a ztěžuje jejich statistické vyhodnocení, stanovení FDZ pro jednotlivé kritické struktury a jejich kritických objemů.

Identický přístup hodnocení stěn chodby, použitý na PVP Bukov II, lze teoreticky aplikovat na dno ukládací chodby a v případě vertikálního umístění ukládacích vrtů tak hodnotit podloží ukládacích chodeb. Nicméně je nutné zmínit, že strukturněgeologická dokumentace počvy (dna ukládací chodby) je výrazně složitější a může být významně ztížena nebo znemožněna nerovnostmi, vodou a nečistotami. Problematika strukturněgeologické, fotogrammetrické a hydrogeologické dokumentace dna chodby je diskutována ve zprávách Bukovská et al. (2025a, 2025b). Kvalita dat získaných z dokumentace dna chodeb je obecně nižší než kvalita dat ze stěn. Přístupnost a viditelnost struktur na počvě je často omezená, což může vést k chybějícím nebo nepřesným údajům. Úprava počvy pro dokumentaci musí zahrnovat její odvodnění, zarovnání a důkladné očištění. Hydrogeologická dokumentace počvy je při použití stávající razící technologie a úpravy dna chodeb nerealizovatelná. Z těchto důvodů je pro hodnocení dna chodby vhodnější aproximace dat získaných strukturněgeologickou a hydrogeologickou dokumentací stěn.

Při dokumentaci hydrogeologických poměrů v podzemních prostorách těsně po dokončení ražeb mohou být nejistoty spojeny s přítomností technologické vody používané při ražbě a změnou napěťových poměrů v okolí díla. Technologická voda natlačená do puklinové sítě a voda vytékající z izolovaných puklinových systémů otevřených ražbou může navyšovat primárně dokumentované zvodnění prostředí a jeho význam. S větším časovým odstupem od vyražení díla průsaky tohoto charakteru postupně vysychají. Během relaxace horninového masivu dochází ke změně hydraulických poměrů (otevírání menších struktur), což způsobuje změny pozice a rozsahů jednotlivých přítoků. V této fázi je často obtížná identifikace primární vodivé struktury (zlomu). K časovým změnám intenzity průsaků dochází také vlivem provozu podzemního díla (např. rozdíly ve větrání, vrtání apod.). Dalším omezením je často problematické přiřazení průsaků podzemní vody ke konkrétním strukturám. Samotný hydrogeologický projev pozorovaný na stěnách a stropech hodnocených chodeb může být prostorově spojený s hydraulicky aktivní poruchou prostřednictvím drobných puklin nebo foliačních ploch otevřených ražbou. Vlastní vodivá porucha nemusí být chodbou zastižena. Vodivost větších struktur je v jejich ploše (objemu) velmi proměnlivá, proto se projevy jedné struktury procházející více chodbami mohou významným způsobem lišit.

Při fotogrammetrickém snímání chodeb se mohou objevit nepřesnosti (mezery v bodovém mračnu a výsledném síťovaném modelu), a ztráta detailů způsobená vlivem podmínek v podzemí, vlhkostí, odlesky, přítomností technologických a konstrukčních prvků apod. Při následné tvorbě 3D fotogrammetrického modelu může dojít ke zjednodušení geometrie a deformacím modelu díky škálování a samotnému numerickému zpracování textury a 3D modelu (softwarové omezení). Nejistoty v rozměrech a 3D geometrii poruchových zón a

dalších prvků vyplývají z generalizace a aproximace jejich mocností a orientace. To může vést k nesprávné interpretaci vzájemného propojení struktur dokumentovaných fyzicky i v 3D modelu na jednotlivých chodbách a stěnách.

Důsledky těchto omezení se projevují při stanovení hodnot jednotlivých klasifikačních parametrů, ale i při identifikaci kritických struktur (kapitola 5.3.1) a správném přiřazení odpovídajících kritických objemů (kapitola 5.3.2). Nepřesné údaje o geometrii a vlastnostech poruch mohou vést k podcenění nebo naopak nadhodnocení jejich významu. Je důležité realisticky zhodnotit, jaká jsou rizika spojená s uvedenými nejistotami a jak mohou ovlivnit výsledky klasifikace horninového prostředí.

11.4 Výhody a nevýhody klasifikačního systému URA

Hlavní přínosy nového hodnotícího systému vyplývají ze splnění základních požadavků klíčových pro efektivní a bezpečné vybudování HÚ a ukládání RAO, definovaných v kapitole 1.3. Na rozdíl od stávajících čistě geotechnických klasifikací (kapitola 4.1) jsou do hodnotícího postupu zahrnuty parametry a vylučovací kritéria, která více zohledňují dlouhodobou mechanickou stabilitu (pravděpodobnost reaktivace struktur a možné seismicity; kapitola 5.3.1) a izolační funkci horninového prostředí.

Jednoduchost a efektivita klasifikačního systému je dosažena využitím relativně malého počtu klasifikačních parametrů, které dostatečně charakterizují všechny vlastnosti horninového prostředí důležité pro konstrukční a bezpečnostní požadavky (kapitola 1.2). Díky tomu je klasifikace URA jednodušší a praktičtější v porovnání s klasifikačními systémy vyvinutými a používanými v souvislosti s HÚ (kapitola 4.2).

Významnou inovací a důležitým benefitem systému URA oproti existujícím přístupům k hodnocení horninového prostředí je jeho zaměření na reálnou 3D geometrii kritických struktur a důraz na 3D vizualizaci jak vstupních dat, tak i výsledků jednotlivých etap hodnocení. Reálná prostorová distribuce a lokalizace důležitých geologických a strukturních prvků a výsledků klasifikace významně zjednoduší jejich využití pro plánování výstavby HÚ (lokalizace ukládacích chodeb a vrtů).

Důležitými vlastnostmi prezentovaného klasifikačního systému jsou jeho flexibilita a možnost snadné úpravy a rozšíření. Vzhledem k jednoduchosti hodnotícího procesu je možné na základě specifických geologických vlastností konkrétní lokality relativně jednoduše modifikovat limitní hodnoty a bodové hodnocení použitých parametrů a kritéria pro kategorizaci kritických struktur a přiřazení kritických objemů. V případě potřeby lze také snadno změnit nebo přidat klasifikační parametry a vylučující kritéria.

Jednou z nevýhod klasifikačního systému URA je jeho úzká specializace na specifické geologické podmínky lokality PVP Bukov II. Tato nevýhoda je však kompenzována vysokou flexibilitou systému, která umožňuje jeho modifikaci pro využití v různých geologických

prostředích. Díky své modulární struktuře a možnosti úprav však tento systém umožňuje relativně snadné přizpůsobení pro jiné lokality.

Podstatným nedostatkem je, že v hodnotícím procesu nejsou zohledněny chemické charakteristiky horninového prostředí a podzemních vod. V současné verzi klasifikačního systému nebylo testováno, jakým způsobem přistoupit k hodnocení horninového prostředí z hlediska nežádoucích geochemických a hydrochemických charakteristik. Je to způsobeno tím, že v době trvání projektu nebyly k dispozici limitní hodnoty chemických parametrů pro plánované inženýrské bariéry. Je nutné testovat, jestli jsou potencionální geochemické a hydrochemické charakteristiky horninového prostředí natolik variabilní, aby bylo účelné a nezbytné je do klasifikačního systému zahrnout. Dále je nutné zvážit, jestli je realistické provádět chemické analýzy v dostatečném kroku napříč hodnoceným vrtem nebo chodbou. Tyto charakteristiky by měly být primárně hodnoceny o krok dříve na úrovni charakterizace lokality pro HÚ.

Další možnou nevýhodou je potřeba dostatečně detailní znalosti regionální geologické a tektonické stavby lokality. Klíčový význam moderních geofyzikálních a karotážních metod a kritických struktur a asociovaných kritických objemů a kritických hydrogeologických projevů v hodnotícím procesu klade vysoké nároky na kvalifikaci pracovníků. Správné použití výzkumných metod a interpretace získaných dat vyžaduje dostatečnou zkušenost se studiem křehkého porušení, geofyzikálním a hydrogeologickým výzkumem v daných geologických podmínkách a také specifických podmínkách podzemí a 3D modelováním.

11.5 Perspektivy a doporučení

Klasifikační systém URA je navržen jako nástroj, který je možné a žádoucí průběžně vyvíjet. Vzhledem k postupujícímu procesu výběru lokality pro HÚ, pokroku ve výzkumu ukládacích obalových souborů a bentonitových těsnění, možných změnách v plánování technického řešení HÚ a finálně k testování nebo přímo používání klasifikačního systému URA je nutné počítat s nutností aktualizace a úprav hodnotícího postupu. To může zahrnovat použití nových výzkumných metod, parametrů, a především jejich limitních hodnot, které jsou místně specifické. Při úpravách je vhodné zaměřit se na snížení vlivu nejistot v jednotlivých typech dat a zlepšení přesnosti klasifikace.

Na základě výše popsanych omezení použitých výzkumných metod, nejistot používaných dat a z toho plynoucích nedostatků celkového hodnotícího postupu je možné shrnout několik hlavních doporučení pro efektivní použití klasifikačního systému URA a jeho další vývoj.

Doporučení týkající se použitých výzkumných metod:

- 1) Manipulace s vrtnými jádry musí být prováděna proškoleným personálem v souladu s metodickými pokyny.
- 2) V rámci prací v podzemí je nezbytně nutné mít dostatečně přesné a jasné zaměření a značení metráže chodeb, které bude trvale dostupné a přehledné.

- 3) Ve všech průzkumných vrtech musí být proveden komplexní set karotážních měření zaměřených na identifikaci vodivých struktur.
- 4) Strukturní dokumentace stěn ukládacích chodeb musí proběhnout ve více etapách.
- 5) Kritické struktury je nezbytné identifikovat korelací strukturních dat s texturou celých chodeb v 3D modelu.
- 6) Při hodnocení dna ukládací chodby je nutná aproximace strukturního záznamu pozorovaného na stěnách.
- 7) Pro stanovení hydrogeologických kritických projevů je vhodné zahrnout průsaky pozorované v co nejdelším časovém odstupu od ražby.

Doporučení týkající se samotného hodnotícího postupu:

- 1) Na základě konstrukčních omezení inženýrských bariér je do klasifikačních parametrů nutné zahrnout chemické charakteristiky podzemní vody a jejich limity.
- 2) Pro odlišné geologické podmínky je nutné zvážit použití jiných klasifikačních parametrů a také je nezbytné nově definovat limitní hodnoty klasifikačních parametrů.
- 3) Podle lokálních podmínek hodnocené lokality může být pro stanovení hodnot klasifikačních parametrů výhodné použít jiné nebo další výzkumné metody.
- 4) Změny metod, parametrů nebo jejich hodnot je nutné testovat v reálném podzemním prostředí konkrétní lokality.

12 Závěry

Tato zpráva představuje nový klasifikační systém URA zaměřený na hodnocení podzemního horninového prostředí pro účely budování ukládacích chodeb a ukládacích vrtů v hlubinném úložišti radioaktivního odpadu. Zpráva také obsahuje výsledky testování nového klasifikačního systému na příkladu prostředí PVP Bukov II. Výsledky popsané v této zprávě je možné stručně shrnout do následujících závěrů:

- Klasifikační systém URA představuje nový komplexní přístup k hodnocení vhodnosti podzemního horninového prostředí pro ukládání radioaktivního odpadu na úrovni ukládací chodby.
- Horninový masiv je posuzován z hlediska dlouhodobé bezpečnosti hlubinného úložiště.
- Klasifikační systém je založený na integraci výsledků multidisciplinárního výzkumu studujícího především mechanické a transportní vlastnosti horninového masivu.
- Modulární dvoustupňová hodnotící struktura umožňuje spolehlivé a transparentní hodnocení a dovoluje flexibilní adaptaci na různé geologické podmínky.
- I. stupeň hodnotí průzkumný vrt a výsledky slouží k rozhodnutí o ražbě ukládací chodby. První fáze I. stupně zahrnuje hodnocení pomocí klasifikačních parametrů a druhá fáze je založena na identifikaci kritických struktur.
- II. stupeň hodnotí zvlášť obě stěny ukládací chodby a definuje části vhodné k lokalizaci ukládacího vrtu. První fáze II. stupně zahrnuje hodnocení pomocí klasifikačních parametrů a druhá fáze stanovuje kritické objemy pro kritické struktury a bezpečnostní obálky pro kritické přítoky.
- Hodnotící mechanismy byly úspěšně testovány na laboratorních chodbách Podzemního výzkumného pracoviště Bukov II v dole Rožná. V rámci I. stupně klasifikace bylo jako vhodných vyhodnoceno průměrně 54,3 % délky hodnocených. V rámci II. stupně bylo jako vhodných pro umístění ukládacích vrtů klasifikováno průměrně 49,6 % délky hodnocených stěn.
- Při testování klasifikačního systému bylo ověřeno, že je v daných podmínkách použitelný. Závěry obou stupňů hodnocení nejsou v rozporu s předpokládanými výsledky.
- Pro efektivní plánování technické konfigurace hlubinného úložiště a umístění ukládacích vrtů je zásadní věrohodný 3D model kritických struktur a kritických hydrogeologických prvků.

- Pro finální lokalizaci ukládacích vrtů je nutné vzít v úvahu zjištěnou 3D geometrii kritických struktur, umístění těsnících zátek v úvodních částech chodeb a vzdálenost mezi jednotlivými ukládacími vrty, danou typem RAO a tepelnými parametry hornin.
- Klasifikační systém URA splňuje hlavní cíle a požadavky a je možné ho využít k hodnocení podzemního horninového prostředí pro potřeby budování hlubinného úložiště.
- Pro použití tohoto systému v jiných geologických podmínkách je nutné nastavit limity hodnot klasifikačních parametrů, případně velikosti kritických objemů a testovat celý hodnotící proces v lokálních podmínkách.

13 Reference

- ANDERSSON J., STRÖM A., SVEMAR C., ALMÉN K.-E., 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.
- ÄIKÄS K. (ED.), HAGROS A., JOHANSSON E., MALMLUND H., SACKLÉN N., SIEVÄNEN U., TOLPPANEN P., AHOKAS H., HEIKKINEN E., JÄÄSKELÄINEN P., RUOTSALAINEN P., SAKSA P. (1999a): Engineering rock mass classification of the Romuvaara investigation site [in Finnish with an English abstract]. Posiva Oy, Helsinki, Working Report 99–59, 151 p.
- ÄIKÄS K. (ED.), HAGROS A., JOHANSSON E., MALMLUND H., SIEVÄNEN U., AHOKAS H., HEIKKINEN E., JÄÄSKELÄINEN P., RUOTSALAINEN P., SAKSA, P. (1999b): Engineering rock mass classification of the Kivetty investigation site [in Finnish with an English abstract]. Posiva Oy, Helsinki, Working Report 99–65, 151 p.
- ÄIKÄS K. (ED.), HAGROS A., JOHANSSON E., MALMLUND H., SIEVÄNEN U., AHOKAS H., HEIKKINEN E., JÄÄSKELÄINEN P., RUOTSALAINEN P., SAKSA, P. (1999c): Engineering rock mass classification of the Hästholmen investigation site [in Finnish with an English abstract]. Posiva Oy, Helsinki, Working Report 99–73, 127 p.
- ÄIKÄS K. (ED.), HAGROS A., JOHANSSON E., MALMLUND H., SIEVÄNEN U., TOLPPANEN P., AHOKAS H., HEIKKINEN E., JÄÄSKELÄINEN P., RUOTSALAINEN P., SAKSA, P. (2000): Engineering rock mass classification of the Olkiluoto investigation site. Posiva Oy, Helsinki, POSIVA 2000-08, 145 p.
- AZWIN I.N. ROSLI SAAD, NORDIANA M. (2013): Applying the Seismic Refraction Tomography for Site Characterization, APCBEE Procedia 5 (2013) 227–231, Elsevier B.V.
- BALSAMO F., CLEMENZI L., STORTI F., SOLUM J., TABERNER C. (2019): Tectonic control on vein attributes and deformation intensity in fault damage zones affecting Natih platform carbonates, Jabal Qusaybah, North Oman. J. Struct. Geol. 122, 38–57.
- 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, 59–84.
- BERG S.S., SKAR T. (2005): Controls on damage zone asymmetry of a normal fault zone: outcrop analyses of a segment of the Moab fault, SE Utah. J. Struct. Geol. 27, 1803–1822.
- BIENIAWSKI Z. T. (1989): Engineering rock mass classifications: A complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering. John Wiley & Sons, New York, 251 p.

- BÖRGESSON L., JOHANNESSON L.-E., HERNELIND J., (2003): Earthquake induced rock shear through a deposition hole. Effect on the canister and the buffer. SKB TR-04-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- BREKKE T. L., HOWARD T. (1972): Stability problems caused by seams and faults. In: Lane, K. S. and Garfield, L. A. (eds.), (1972): Proceedings of the North American Rapid Excavation and Tunneling Conference. The American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, Inc., New York, 25–41.
- BUKOVSKÁ Z., VERNER K., BURIÁNEK D., DOBEŠ P., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ B., ERBAN V., FRANĚK J., HALODOVÁ P., HOLEČEK J., JAČKOVÁ I., JELÉNEK J., KOPAČKOVÁ V., KOUCKÁ L., LAUFEK F., LNĚNIČKOVÁ Z., KOČERGINA J., MYŠKA O., NAHODILOVÁ R., PERTOLDOVÁ J., RUKAVIČKOVÁ L., SOEJONO I., ŠVAGERA O., VESELOVSKÝ F. (2017): Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov – závěrečná zpráva. – TZ 191/2017, Archiv SÚRAO.
- 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., KNĚSL I., KOUCKÁ L., KRYL J., KŘÍBEK B., KUBEŠ M., KUBINA L., KUČERA R., KUKUTSCH, R., LAUFEK, F., MIXA, P., MOZOLA, J., NÁSIR, M. M., PALÁT, J., PATOČKA, M., POŘÁDEK, P., ROSENDORF, T., SOEJONO, I., STAŠ, L., VAVRO, L., VESELOVSKÝ, F., VOREL, J., WACLAWIK, P., WERTICH, V., ZAJÍCOVÁ, V., ZELINKOVÁ, T. (2020): Získání dat z hlubokých horizontů dolu Rožná – závěrečná zpráva. – TZ 464/2020, Archiv SÚRAO.
- BUKOVSKÁ Z., SOEJONO I., VONDROVIC L., VAVO M., SOUEK K., BURIÁNEK D., DOBEŠ P., ŠVAGERA O., WACLAWIK P., ŘIHOŠEK J., VERNER K., SLÁME J., VAVRO L., KONÍČEK P., STAŠ L., PÉCKAY Z., VESELOVSKÝ F. (2019): Characterization and 3D visualization of underground research facility for deep geological repository experiments: A case study of underground research facility Bukov, Czech Republic. Engineering Geology, 259, 105186.
- BUKOVSKÁ Z., RUKAVIČKOVÁ L., CHABR T., LEVÝ O., SOSNA K., SOUČEK K., VAVRO M., SOEJONO I., ŘÍHA V., ŠVAGERA O., KRYL J., DOBEŠ P., ZELINKOVÁ T., ŘIHOŠEK J., HOLEČEK J., MORÁVEK R., ŠVANDA J., ČERMÁK F., MAREČEK L., ŘÍHA V., STAŠ L., WACLAWIK P., HAVLOVÁ V., ZUNA M. (2021): Geologická a geotechnická charakterizace horninového prostředí – PVP Bukov II – realizační projekt. – TZ 542/2021, Archiv SÚRAO
- BUKOVSKÁ Z., RUKAVIČKOVÁ L., CHABR T., MORÁVEK R., LEVÝ O., SOSNA K., SOUČEK K., VAVRO M., ZELINKOVÁ T., DOBEŠ P., ŠVAGERA O., KRYL J., SOEJONO I., ŘIHOŠEK J., HANÁK J., ČERMÁK F., KAŠPAR R., MAREČEK L., NEDVĚD J., VAVRO L., MYŠKA O., JANEČEK I. (2022): Geologická a geotechnická charakterizace horninového prostředí – PVP Bukov II – první průběžná zpráva – TZ 596/2022, SÚRAO, Praha.
- BUKOVSKÁ Z., RUKAVIČKOVÁ L., CHABR T., MORÁVEK R., LEVÝ O., SOSNA K., SOUČEK K., VAVRO M., ZELINKOVÁ T., DOBEŠ P., ŠVAGERA O., KRYL J., SOEJONO I., ŘIHOŠEK J., HOLEČEK J., HANÁK J.,

ČERMÁK F., KAŠPAR R., MAREČEK L., NEDVĚD J., VAVRO L., WACLAWIK P., STAŠ L., MYŠKA O. (2023): Geologická a geotechnická charakterizace horninového prostředí – PVP Bukov II – druhá průběžná zpráva. – TZ 664/2023, SÚRAO, Praha.

BUKOVSKÁ Z., SOEJONO I., RUKAVIČKOVÁ L., CHABR T., MORÁVEK R., LEVÝ O., SOSNA K., SOUČEK K., VAVRO M., ZELINKOVÁ T., POŘÁDEK P., ŠVAGERA O., KRYL J., ŘIHOŠEK J., HANÁK J., ZEMAN J., ZUNA M., ČERMÁK F., KAŠPAR R., MAREČEK L., NEDVĚD J., VAVRO L., STAŠ L., GEORGIU L., JANEČEK I., KOČAN K., ZUNA M., HOFMAN D., JÁKL M., BRTNA M., PEŘESTÝ V., HÁJEK T., HOLEČEK J., MYŠKA O., TRÍSKALOVÁ I., VELÍMKOVÁ A. (2025a): Geologická a geotechnická charakterizace horninového prostředí – PVP Bukov II – čtvrtá průběžná zpráva – TZ811/2025, SÚRAO, Praha.

BUKOVSKÁ Z., SOEJONO I., RUKAVIČKOVÁ L., CHABR T., MORÁVEK R., LEVÝ O., SOSNA K., SOUČEK K., VAVRO M., ŘIHOŠEK J., ZELINKOVÁ T., POŘÁDEK P., ŠVAGERA O., KRYL J., HANÁK J., ZEMAN J., ZUNA M., ČERMÁK F., KAŠPAR R., MAREČEK L., NEDVĚD J., VAVRO L., STAŠ L., GEORGIU L., JANEČEK I., KOČAN K., HOFMAN D., JÁKL M., BRTNA M., PEŘESTÝ V., HÁJEK T., HOLEČEK J., MYŠKA O., TRÍSKALOVÁ I., VELÍMKOVÁ A., DOBEŠ P. (2025b): Geologická a geotechnická charakterizace horninového prostředí – PVP Bukov II – závěrečná zpráva – TZ812/2025, SÚRAO, Praha.

BYERLEE, J. (1990): Friction, overpressure and fault normal compression. *Geophysical Research Letters* 17 (12), 2109–2112.

CHOI J.H., EDWARDS P., KO K., KIM Y.S. (2016): Definition and classification of fault damage zones: a review and a new methodological approach. *Earth Sci. Rev.*, 152, 70–87.

CHABR T., FILIPSKÝ D. (2021): Zjištění prostorové homogenity horninového prostředí před provedením trhacích prací pomocí seismické tomografie. – TZ 548/2021, Archiv SÚRAO.

COSGROVE J, STANFORS R, RÖSHOFF K (2006): Geological characteristics of deformation zones and a strategy for their detection in a repository. SKB R-06-39, Svensk ärnbränslehantering AB.

DALLMEYER R.D., FRANKE W., WEBER, K. (1995): Pre-Permian Geology of Central and Eastern Europe. Springer, Berlin, 1–593 p.

DEERE D. U., HENDRON A. J. JR., PATTON F. D., CORDING E. J. (1967): Design of surface and near surface construction in rock. In: Fairhurst, C. (ed.), (1967): Failure and breakage of rock, proceedings of the Eighth Symposium on Rock Mechanics held at the University of Minnesota, September 15–17th, 1966. American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, New York, 237–302.

- FAULKNER D. R., JACKSON C. A. L., LUNN R. J., SCHLISCHE R. W., SHIPTON Z. K., WIBBERLEY C. A. J., WITHJACK M. O. (2010): A review of recent developments concerning the structure, mechanics and fluid flow properties of fault zones. *J. Struct. Geol.* 32, 1557–1575.
- FAULKNER D. R., MITCHELL T. M., JENSEN E., CEMBRANO J. (2011): Scaling of fault damage zones with displacement and the implications for fault growth processes. *J. Geophys. Res.* 116, B05403.
- FLODIN E., AYDIN A. (2004): Faults with asymmetric damage zones in sandstone, Valley of Fire State Park, southern Nevada. *J. Struct. Geol.* 26, 983–988.
- FOSSEN H. (2010): *Structural Geology*. Cambridge University Press, Cambridge.
- GARDEMEISTER R., JOHANSSON S., KORHONEN P., PATRIKAINEN P., TUISKU T., VÄHÄSARJA P. (1976): Application of the engineering geological classification system [in Finnish]. VTT Technical Research Centre of Finland, Laboratory of Geotechnics, Espoo, Bulletin 25, 41 p.
- GILBERT P. (1972): Iterative methods for the three-dimensional reconstruction of an object from projections. *Journal of Theoretical Biology* 36, 105–117.
- GRIMSTAD E., BARTON N. (1993): Updating Q-system for NMT. In: Kompen R., Opsahl O.A., Berg K. R. (eds.), (1993): *Proceedings of the International Symposium on Sprayed Concrete*, Fagernes. Norwegian Concrete Association, Oslo, 46–66.
- GRÜNWALD L., BUREŠ P., ŠPINKA O., POŘÍZEK J., NOHEJL J., FIEDLER F., KOBYLKA D., BITTNAR Z., ZAHRADNÍK O. (2017): Optimalizace podzemních částí HÚ referenčního projektu, PRAHA: SPOLEČNOST "ČVUT-SATRA-MOTT MACDONALD CZ". – TZ 134/2017, SÚRAO.
- HAGROS A., MCEWEN T., ANTILLA P., ÄIKÄS K. (2005): Host Rock Classification. Phase 3: Proposed Classification System (HRC-System). Posiva Workreport 2005–7. POSIVA OY Oikiluoto.
- HAGROS A. (2006): HRC (Host Rock Classification) system for Nuclear Waste Disposal in Crystalline Bedrock. Academic Dissertation. Helsinki.
- HAGROS A., JOUSEN A., JUNNILA J., KOSUNEN, P., KUUSISTO M. (2022): Rock Suitability Classification (RSC), Utilization of foreign experience in the siting process for a deep geological repository for radioactive waste in the Czech Republic. – TZ 608/2022, SÚRAO.
- HAKAPÄÄ A. (1968): On blastability classifications [in Finnish with an English summary]. *Papers of the Engineering-Geological Society of Finland (RGY)* 4:31, 129–134.
- HANDY M. R., STÜNITZ H. (2002): Strain localization by fracturing and reaction weakening – a mechanism for initiating exhumation of subcontinental mantle beneath rifted margins. In: De Meer S., Drury M. R., De Bresse J. H. P., Pennock G. M. (eds.), (2002): *Deformation*

Mechanisms, Rheology and Tectonics: Current Status and Future Perspectives. Geological Society, London, Special Publications, 200, 387–407.

HAUSMANNOVÁ L., DOHNÁLKOVÁ M., MATUŠKOVÁ E., LAHODOVÁ Z., AUGUSTA J. (2023): Technické řešení hlubinného úložiště 2023. – TZ 711/2023, SÚRAO, Praha.

HAUSMANNOVÁ L., DOHNÁLKOVÁ M., MATULOVÁ M., ŠEDIVÝ T., VENCL M., POPELOVÁ E., AUGUSTA J., SMUTEK J., TOUŠ M., GOLUBKO A., LAHODOVÁ Z., KONOPÁČOVÁ K., LUKIN D., MATUŠKOVÁ E., MECOVÁ M., MIKLÁŠ O., POSPÍŠIL M., ŠTEFANOVÁ E., VRBA T. (2024): Plán výzkumu a vývoje SÚRAO 2024-2028, TZ 746/2024, Praha

HOEK, E., BROWN, E. T. (1982): Underground excavations in rock. The Institution of Mining and Metallurgy, London, 527 p.

HUDSON J. A. (1992): Rock engineering systems: Theory and practice. Ellis Horwood, New York, 185 p.

HUDSON J. A., JOHANSSON E. (2006): Summary of Rock Mechanics Work Completed for Posiva before 2005. Posiva report 2006–04. Posiva Oy Oulu.

HULL J. (1988): Thickness–displacement relationships for deformation zones. J. Struct. Geol. 10, 431–435.

JANECKE S.U., EVANS J. P. (1988): Feldspar-influenced rock rheologies. Geology, 16, 1064–1067.

JAROŠ M., NAVRÁTIL P., PATOČKA M., HLISNIKOVSKÝ K., LEICHMANN J., ZEMAN J. (2021): Vyhodnocení průzkumných pilotních vrtů (S-28, S-29, S-30, S-32 a S-33) a geologická interpretace zájmového území PVP Bukov II. etapa. – TZ 541/2021 Dolní Rožínka. Archiv SÚRAO.

KENDORSKI F., CUMMINGS R., BIENIAWSKI Z.T., SKINNER E. (1983): Rock mass classification for block caving mine drift support. In: Proceedings of the 5th International Society for Rock Mechanics. Melbourne, Australia, 10–15 April 1983; B51–B63 p.

KIM Y.-S., PEACOCK D. C. P., SANDERSON D. J. (2004): Fault damage zones. J. Struct. Geol. 26, 503–517.

KNOTT S. D. (1994): Fault zone thickness versus displacement in the Permo-Triassic sandstones of NW England. J. Geol. Soc. 151, 17–25.

KOMULAINEN J., HEIKKINEN P., JÄNKÄVAARA H., VENCL M. (2023): Posiva Flow Log measurements in four boreholes at the Bukov underground research facility in the Czech Republic. – TZ 646/2022, Archiv SÚRAO.

- KOŘALKA S., SÁNCHEZ L. (2023): Karotážní měření ve vrtech S-24 a S-33. – Závěrečná zpráva. MS SÚRAO.
- KORHONEN K.-H., GARDEMEISTER R., JÄÄSKELÄINEN H., NIINI H., VÄHÄSARJA, P. (1974): Engineering geological bedrock classification [in Finnish]. VTT Technical Research Centre of Finland, Geotechnical laboratory, Espoo, Research note 12, 78 p.
- KŘÍBEK B., HÁJEK A. (2005): Rožná uranium deposit: model of late Variscan and post Variscan Mineralizations. vol. 98 Czech Geological Survey, Prague (in Czech).
- KŘÍBEK B., ŽÁK K., DOBEŠ P., LEICHMANN J., PUDILOVÁ M., RENÉ M., SCHARM B., SCHARMOVÁ M., HÁJEK A., HOLÉČZY D., HEIN U., LEHMANN B. (2009): The Rožná uranium deposit (Bohemian Massif, Czech Republic): shear zone-hosted, late Variscan and post-Variscan hydrothermal mineralization. Mineral, Deposita 44 (1), 99–128.
- LA POINTE P., CALDOUHOS T. (1999): An overview of a possible approach to calculate rock movements due to earthquakes at Finnish nuclear waste repository sites. POSIVA 99-02, Posiva Oy Helsinki Finland.
- LA POINTE P., CLADOUHOS R. T., FOLLIN S. (2002): Development, application, and evaluation of a methodology to estimate distributed slip on fractures due to future earthquakes for nuclear waste repository performance assessment. Bulletin of the Seismological Society of America 92: 923–944.
- LAUBSCHER D. H. (1984): Design aspects and effectiveness of support systems in different mining conditions. Trans.-Inst. Min. Metall. Sect. A 1984, 93, A70–A82.
- LAUFFER H. (1958): Classification for tunnel construction [in German]. Geologie und Bauwesen 24(1), 46–51.
- LIMA CELESTINO M. A., DE MIRANDA T. S., MARIANO G., DE LIMA ALENCAR M., BARBOSA MELO DE CARVALHO B. R., DA CRUZ FALCÃO T., TOPAN J. G., BARBOSA J. A., GOMES I. F. (2020): Fault damage zones width: Implications for the tectonic evolution of the northern border of the Araripe Basin, Brazil. NE Brazil, Journal of Structural Geology, 138, 104116,
- MAIJALA P., KAURANNE L. K., LINDHOLM O., MATIKAINEN R., MUSTALA J., NIINI H., PELTOLA E. (1973): The effect of the structural and mechanical properties of rock masses on the kind of excavation. The Mining and Metallurgical Society of Finland (VMY), Work Committee Nr. 27, 134 p.
- MANDL G. (2000): Faulting in Brittle Rocks. An Introduction to the Mechanics of Tectonic Faults. Springer, Berlin.
- MARRETT R., GALE J. F. W., GOMEZ L., LAUBACH S. E. (2018): Correlation analysis of fracture arrangement in space. J. Struct. Geol. 108, 16–33.

- MATTE P., MALUSKI H., RAJLICH P., FRANKE W. (1990): Terrane boundaries in the Bohemian Massif: result of large-scale Variscan shearing. *Tectonophysics*, 177, 151–170.
- MCEWEN T. (ED.), ARO S., HELLÄ P., KOSUNEN P., KÄPYÄHO A., MATTILA J., PERE T. & RSC WORKING GROUP (2012): *Rock Suitability Classification, RSC-2012*. – Posiva Oy, Eurajoki, Finland, POSIVA 2012-24, 220 p.
- MOYE D. G. (1967): Diamond drilling for foundation exploration. – *Civil Engineering Transactions*, 95–100.
- MUNIER R., HÖKMARK H. (2004): Respect distances. Rationale and means of computation. SKB R-04-17, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- NIINI H. (1976): Engineering-geological bedrock classification [in Finnish]. In: RIL (1976): *Earth and rock construction* [in Finnish]. Association of Finnish Civil Engineers (RIL), Helsinki, RIL 98, 212–220.
- OSYPOV K. (2001): REFRACTION TOMOGRAPHY: A Practical Overview of Emerging Technologies, CSEG Recorder, Feb 2001, Vol. 26, No.02
- PALMÉN J. A. (1999): Mining-Geological Rock Classification [in Finnish with an English abstract]. Licentiate's thesis, Helsinki University of Technology, Department of Materials Science, Laboratory of Engineering Geology and Geophysics, 90 p.
- PATOČKA M., JAROŠ M. (2018): Interpretace geologické dokumentace vrtů S-22, S-23, S-24, S-25 a S-26 – TZ 225/2018 Dolní Rožinka, Archiv SÚRAO.
- PEACOCK D. C. P., DIMMEN V., ROTEVATN A., SANDERSON D. J. (2017): A broader classification of damage zones. *J. Struct. Geol.* 102, 179–192.
- ROMANA M. (1985): New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes. *Proc. Int. Symp. on the Role of Rock Mechanics*: 49–53.
- ROMANA M. (1995): The geomechanical classification SMR for slope correction. *Proc. Int. Congress on Rock Mechanics* 3, 1085–1092.
- RUKAVIČKOVÁ L. ET AL. (2014): Metodika vodních tlakových zkoušek v prostředí pevných hornin s nízkou propustností, Projekt FR-TI 3/325. – Česká geologická služba.
- SCHUELLER S., BRAATHEN A., FOSSEN H., TVERANGER J. (2013): Spatial distribution of deformation bands in damage zones of extensional faults in porous sandstones: statistical analysis of field data. *J. Struct. Geol.* 52, 148–162.
- SCHULMANN K., KRÖNER A., HEGNER E., WENDT I., KONOPÁSEK J., LEXA O., ŠTÍPSKÁ P. (2005): Chronological constraints on the pre-orogenic history, burial and exhumation of deep-seated

rocks along the eastern margin of the Variscan Orogen, Bohemian Massif, Czech Republic. *American Journal of Science*, 305, 407–448.

SCHULMANN K., LEXA O., ŠTÍPSKÁ P., RACEK M., TAJČMANOVÁ L., KONOPÁSEK J., EDEL J. B., PESCHLER A., LEHMANN J. (2008): Vertical extrusion and horizontal channel flow of orogenic lower crust: key exhumation mechanisms in large hot orogens? *J. Metamorph. Geol.* 26, 273–297.

SCHULMANN K., LEXA O., JANOUŠEK V., LARDEAUX J. M., EDEL J. B. (2014): Anatomy of a diffuse cryptic suture zone: an example from the Bohemian Massif, European Variscides. *Geology* 42, 275–278.

SHIPTON Z. K., COWIE P. A. (2001): Damage zone and slip-surface evolution over mm to km scales in high-porosity Navajo sandstone, Utah. *J. Struct. Geol.* 23, 1825–1844.

SHIPTON Z. K., SODEN A. M., KIRKPATRICK J. D., BRIGHT A. M., LUNN R. J. (2006): How thick is a fault? Fault displacement-thickness scaling revisited. In: Abercrombie, R. (ed.): *Earthquake: Radiated Energy and the Physics of Faulting*, pp. 193–198.

SINGH B., GOEL, R. K. (2011): Rock Mass Quality Q-System. In: Singh, B. Goel, R.K. *Engineering* (eds.): *Rock Mass Classification*, Butterworth-Heinemann, Pages 85–118.

SKBF (1983): Final storage of spent nuclear fuel – KBS-3. Swedish Nuclear Fuel Supply Co (SKBF), Division KBS, Stockholm, Volumes 1 to 4.

SKINNER E. H. (1988): A Ground Support Prediction Concept: The Rock Structure Rating (RSR) Model. In Kirkaldie L. (ed.), (1988): *Rock Classification Systems for Engineering Purposes*. ASTM International, 43–64 p. (doi:10.1520/STP48462S. ISBN 978-0-8031-0988-9).

SOEJONO I., BUKOVSKÁ Z., RUKAVIČKOVÁ L., ŠVAGERA O., CHABR T., SOUČEK K., VAVRO M., MORÁVEK R., LEVÝ O., SOSNA K., KRYL J., ŘIHOŠEK J., ZELINKOVÁ T., DOBEŠ P., HANÁK J., ČEČMÁK F., KAŠPAR R., MAREČEK L., NEDVĚD J., VAVRO L., MYŠKA O., JANEČEK I. (2024): *Geologická a geotechnická charakterizace horninového prostředí – PVP Bukov II – třetí průběžná zpráva – TZ 744/2024, SÚRAO, Praha.*

SOEJONO, I., ŽÁČKOVÁ, E., JANOUŠEK, V., MACHEK, M., KOŠLER, J., 2010. Vestige of an Early Cambrian incipient oceanic crust incorporated in the Variscan orogen, Letovice Complex, Bohemian Massif. *J. Geol. Soc. London.* 167, 1113–1130.

STEWART M., HOLDSWORTH R. E., STRACHAN R. A. (2000): Deformation processes and weakening mechanisms within the frictional-viscous transition zone of major crustal-scale faults: insights from the Great Glen Fault Zone, Scotland. *Journal of Structural Geology*, 22, 543–560.

SVOBODA J., ŠTÁSTKA J., VAŠÍČEK R., ŠPINAR O., BUREŠ P., POSPÍŠKOVÁ I., VOZÁR M., KRAJNÁK M., ŠACHLOVÁ Š., VEČERNÍK P., ZUNA M., HAVLOVÁ V., STIBLÍKOVÁ P., ČERNÁ K., HLAVÁČKOVÁ V.

- (2022): Návrh českého koncepčního řešení bufferu, backfillu, zátek, výplní komor ostatních RAO, ostatních výplní a konstrukčních prvků. – TZ 644/2022rev.1, SÚRAO, Praha.
- TAJČMANOVÁ L., SOEJONO I., KONOPÁSEK J., KOŠLER J., KLÖTZLI U. (2010): Structural position of high-pressure felsic to intermediate granulites from NE Moldanubian domain (Bohemian Massif). *Journal of the Geological Society, London*, 167, 329–345.
- TANSKANEN J., PALMU M. (2004): Facility Description 2003. Posiva Oy, Oikiluoto, Working Report 2004-26, 146 p + App.
- TESAŘ O. (1990): Klasifikace skalních a poloskalních hornin. – Projektový ústav dopravních a inženýrských staveb s.p., Praha.
- TORABI, T. S. S. ELLINGSEN, M. U. JOHANNESSEN, B. ALAEI, A. ROTEVATN, D. CHIARELLA, 2020. Fault zone architecture and its scaling laws: where does the damage zone start and stop? In: Ogilvie S. R., Dee S. J., Wilson R.W., Bailey W. R. (eds.) (2020): Integrated Fault Seal Analysis. Geological Society, London, Special Publications, 496, 99–124
- O'HARA A. P., JACOBI R. D., SHEETS H. D. (2017): Predicting the width and average fracture frequency of damage zones using a partial least squares statistical analysis: implications for fault zone development. *J. Struct. Geol.* 98, 38–52.
- 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.
- VRÁNA S., BLÜMEL P., PETRAKAKIS K. (1995): Metamorphic evolution of the Moldanubian Zone. In: Dallmeyer R. D., Franke W., Weber K. (eds), (1985): Pre-Permian Geology of Central and Eastern Europe. Springer, 453–466.
- WIBBERLEY C. A. J. (2005): Initiation of basement thrust detachments by fault-zone reaction weakening. In: Bruhn D., Burlini L. (eds.), (2005): High Strain Zones: Structure and Physical Properties. Geological Society, London, Special Publications, 245, 347–372.
- WIBBERLEY C. A. J., YIELDING G., DI TORO G. (2008): Recent advances in the understanding of fault zone internal structure: a review. In: Wibberley C. A. J., Kurz W., Imber J., Holdsworth R. E., Collettini C. (eds.), (2008): The Internal Structure of Fault Zones: Implications for Mechanical and Fluid-Flow Properties. Special Publication 299, London: Geological Society, 5–33.
- WICKHAM G. E., TIEDEMANN H. R., SKINNER E. H. (1974): Ground support prediction model - RSR concept. Proc. 2nd North American Rapid Excavation & Tunnelling Conference (RETC), San Francisco. Vol. 1. American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers (AIME), New York, 691–707.

WINTSCH R. P., CHRISTOFFERSON R., KRONENBERG A. K. (1995): Fluid–rock reaction weakening of fault zones. *Journal of Geophysical Research*, 100, 13021–13032.

Vyhlášky, technické normy a standardy:

ČSN EN ISO 14689 (ČSN 721005). Geotechnický průzkum a zkoušení – Pojmenování, popis a klasifikace hornin. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.

Vyhláška MŽP a MZd ČR č. 5/2011 Sb. o vymezení hydrogeologických rajonů a útvarů podzemních vod, způsobu hodnocení stavu podzemních vod a náležitostech programů zjišťování a hodnocení stavu podzemních vod, ve znění pozdějších předpisů.



SÚRAO

SPRÁVA ÚLOŽIŠŤ
RADIOAKTIVNÍCH
ODPADŮ

NAŠE
BEZPEČNÁ
BUDOUCNOST

info@surao.cz | www.surao.cz