

GEOLOGICKÁ A GEOTECHNICKÁ CHARAKTERIZACE HORNINOVÉHO PROSTŘEDÍ PVP BUKOV II

-

ZÁVĚREČNÁ ZPRÁVA

Autoři: Zita Bukovská a kolektiv

NÁZEV ZPRÁVY: Geologická a geotechnická charakterizace horninového prostředí – PVP Bukov II – závěrečná zpráva

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

IDENTIFIKACE V RÁMCI PROJEKTU:

Závěrečná zpráva

ČÍSLO SMLOUVY: SO 2020–087

Bibliografický zápis: 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., BRITNA M., PEŘESTÝ V., HÁJEK T., HOLEČEK J., MYŠKA O., TŘÍSKALOVÁ I., VELÍMKOVÁ A., DOBEŠ P., KOHOUŠEK I. (2025): Geologická a geotechnická charakterizace horninového prostředí – PVP Bukov II – závěrečná zpráva. – TZ812/2025, SÚRAO, Praha.

ŘEŠITELÉ:

Česká geologická služba¹, INSET, s.r.o.², SG Geotechnika, a.s.³, Ústav geoniky AV ČR, v.v.i.⁴

SPOLUŘEŠITELÉ:

Masarykova universita⁵, ÚJV Řež, a.s.⁶

AUTORSKÝ KOLEKTIV: Bukovská Z.¹, Soejono I.¹, Rukavičková L.¹, Chabr T.², Morávek R.², Levý O.², Sosna K.³, Souček K.⁴, Vavro M.⁴, Zelinková T.¹, Pořádek P.¹, Řihošek J.¹, Švagera O.¹, Kryl J.¹, Hanák J., Zeman J.⁵, Zuna M.⁶, Čermák F.³, Kašpar R.³, Mareček L.³, Nedvěd J.³, Vavro L.⁴, Staš L.⁴, Georgiou L.⁴, Myška O.¹, Janeček I.⁴, Kočan K.⁶, Hofman D.², Jákl M.², Britna M.², Peřestý V.¹, Hájek T.¹, Holeček J.¹, Myška O.¹, Třískalová I.¹, Velímková A.¹, Dobeš P.¹, Kohoušek I.³

Lucie Mareda

Manažer projektu (SÚRAO)

5. 3. 2025

Igor Soejono

Manažer projektu (Společnost Bukov II)

5. 3. 2025

Obsah

1	Úvod	11
1.1	Cíle a průběh projektu	11
1.2	Regionální geologická stavba PVP Bukov II	15
2	Výsledky řešení projektu	16
2.1	Datamanagement	16
2.2	Základní dokumentace díla	17
2.2.1	Dokumentace čeleb a stěn	17
2.2.2	Popis vrtných jader	19
2.2.3	3D sken vyraženého podzemního díla	20
2.3	Geologická a strukturněgeologická charakterizace	21
2.3.1	Strukturněgeologická mapa	21
2.3.2	3D strukturněgeologický model	23
2.4	Petrografická a geochemická charakteristika	25
2.4.1	Petrografická charakteristika	25
2.4.2	Geochemie žilných a puklinových mineralizací	27
2.4.3	Celohorninová geochemická charakteristika	27
2.4.4	Oxidačně-redukční podmínky	29
2.5	Hydrogeologická charakterizace	30
2.5.1	Přítoky podzemní vody do PVP Bukov II	30
2.5.2	Chemické složení podzemních vod	33
2.5.3	Stáří a původ podzemních vod	34
2.5.4	Hydraulické vlastnosti hornin	36
2.5.5	Hydrogeologický monitoring	38
2.6	Transportní vlastnosti	40
2.6.1	Difuzní experimenty	40
2.6.2	Sorpční experimenty	42
2.7	Geomechanika	45
2.7.1	Stanovení fyzikálně mechanických a geotechnických vlastností hornin laboratorními testy	45
2.7.2	Petrofyzikální vlastnosti hornin	49
2.7.3	Stanovení fyzikálně mechanických a geotechnických vlastností hornin in-situ testy	50
2.7.4	Geofyzikální měření ve vrtech geotechnických stanic	57
2.8	Geofyzikální charakterizace	65

2.8.1	Georadar	65
2.8.2	Elektrická odporová měření	65
2.8.3	Mělká refrakční seismika	66
2.8.4	Výsledky geofyzikální charakterizace	66
2.9	Seismické účinky trhacích prací	73
2.9.1	Měření seismických účinků trhacích prací	74
2.9.2	Vyhodnocení záznamů seismických účinků trhacích prací	74
2.10	Vodní tlakové zkoušky pro charakterizaci EDZ	79
2.10.1	Srovnání výsledků charakterizace EDZ podle seismické refrakční tomografie a VTZ	80
2.11	Systém klasifikace horninových bloků	85
3	Závěry, interpretace a doporučení	86
3.1	Shrnutí hlavních výsledků projektu	86
3.2	Data využitelná pro popisné modely	90
3.3	Popis a charakterizace účinků razicích prací na okolí nově vyražených chodeb a komor	92
3.4	Zkušenosti a doporučení pro realizaci budoucích projektů	94
3.4.1	Specifika horninového prostředí PVP Bukov II	94
3.4.2	Specifika charakterizace a dokumentace v podzemí	94
3.4.3	Dokumentace vrtných jader	97
3.4.4	Vodní tlakové zkoušky	97
3.4.5	Hydrogeologický monitoring	97
3.4.6	Geomechanika	98
3.4.7	Geofyzika	99
3.4.8	Klasifikační systém horninového masivu pro účely ražby ukládací chodby	101
	Reference	102

Seznam elektronických příloh:

Elektronická příloha 1 GIS projekt zahrnující lokalizace čeleb, odběrů vzorků a dalších prací na půdorysu PVP Bukov II

Elektronická příloha 2 Výsledky dokumentace čeleb a chodeb – Dokumentace čeleb a výsledky klasifikace; Georeferencovaná strukturní data z chodeb PVP Bukov II s korekcí na 3D fotogrammetrický model; Lokalizace, strukturní charakteristiky a mineralogie poruchových zón (kritických struktur) dokumentovaných na stěnách chodeb PVP Bukov II

Elektronická příloha 3 Vrtné kolonky dokumentovaných vrtů

Elektronická příloha 4 3D PDF laserscanu prostor PVP Bukov II

Elektronická příloha 5 Fotografická dokumentace poruchových zón (kritických struktur) dokumentovaných na stěnách chodeb PVP Bukov II

Elektronická příloha 6 Strukturněgeologická mapa PVP Bukov II

Elektronická příloha 7 3D PDF strukturněgeologického modelu PVP Bukov II

Elektronická příloha 8 Petrografická dokumentace – lokalizace a popisy vzorků, výsledky analýz

Elektronická příloha 9 Geochemie žilných výplní – přehled odebraných vzorků, výsledky analýz

Elektronická příloha 10 Celohorninová geochemie – obsahy hlavních a stopových prvků celohorninových geochemických vzorků

Elektronická příloha 11 Výsledky stanovení oxidačně-redukčních podmínek – koncentrace kyslíku, redox páry a redukční kapacity, silikátové analýzy vzorků pro stanovení oxidačně-redukčních podmínek

Elektronická příloha 12 Terénní dokumentace přítoků a terénní měření hydrogeologických parametrů

Elektronická příloha 13 Chemické analýzy složení vod

Elektronická příloha 14 Výsledky stáří a původu podzemních vod

Elektronická příloha 15 Rozbory HG monitoring

Elektronická příloha 16 Výsledky transportních experimentů

Elektronická příloha 17 Listy fyzikálně-mechanických vlastností velkoobjemových vzorků

Elektronická příloha 18 Výsledky stanovení Schmidtovo kladívko

Elektronická příloha 19 Výsledky měření Goodman Jack

Elektronická příloha 20 Výsledky stanovení napětí horninového masivu metodou hydrofracturing

Elektronická příloha 21 Geofyzikální měření ve vrtech geotechnických stanic: rychlostní řezy podle seismické tomografie, výsledky seismokarotáže, georadarového měření ve vrtech, lehké úderové seismiky

Elektronická příloha 22 Geofyzikální charakterizace, měření na stěnách laboratorních chodeb: profilové řezy (radarový, rychlostní a odporový) a souhrnné interpretační řezy

Elektronická příloha 23 Geofyzikální měření v okolí zkušebních komor laboratorní chodby L7: profilové řezy (radarový, rychlostní a odporový) a souhrnný interpretační řez

Elektronická příloha 24 Měření seismických účinků trhacích prací – vyhodnocené záznamy, souhrnná tabulka, grafické shrnutí pro jednotlivé chodby, zpracování dle ČSN 73 0040

Elektronická příloha 25 Výsledky vodních tlakových zkoušek pro stanovení EDZ

Seznam použitých zkratk:

ABI	akustická karotáž
AM	aritmetický průměr
amf.	amfibolit
AMS	anizotropie magnetické susceptibility
apfu	atom per formula unit
AV ČR	Akademie věd České republiky
CEC	kationtová výměnná kapacita
EDZ	Excavation Damage Zone
EL	elektrická vodivost, konduktivita
ERT	elektrická odporová tomografie
eU	ekvivalentní obsahy uranu
eTh, Th	ekvivalentní obsahy thoria
F	magnetická foliace
FMV	fyzikálně mechanické a geotechnické vlastnosti
GS	geotechnická stanice
HiRAT	akustická karotáž (high-resolution acoustic televiewer)
HM	horninový masív
K	obsah draslíku
K	hydraulická vodivost
k ₁₀	koeficient hydraulické vodivosti při 10 °C
mgm	migmatit
MIP	vysokotlaká rtuťová porozimetrie
OAMH ÚSMH	Oddělení aplikované mechaniky hornin Ústavu struktury a mechaniky hornin
OBI	optická karotáž
p	otevřená pórovitost
P–T	teplotně tlakové podmínky
PVP	podzemní výzkumné pracoviště
Q	Quality
QTS	Quality Testing System
RMR	Rock Mass Rating
RQD	Rock Quality Designation
SD	směrodatná odchylka
SRF	Stress Reduction Factor
SW	software
T	transmisivita
TH	ocelová výztuž/hajcman profilu TH (Thusaint a Heitzmann)
TP	trhací práce
T.V.	technická voda
U	obsahy uranu
UCS	Uniaxial Compressive Strength (pevnost v prostém tlaku)
ÚGN	Ústav geoniky
VES	vertikální elektrické sondování
VO	velkoobjemový vzorek
VŠB-TUO	Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
VTZ	vodní tlakové zkoušky
ZDA	základní dokumentační analýza

ZK	zkušební komora
ZLVCH HGF	Zkušební laboratoř Výzkumného centra hornin Hornicko-geologické fakulty
μ	Poissonovo číslo
σ	elektrická konduktivita
$\bar{}$	aritmetický průměr

Abstrakt

Tato závěrečná zpráva shrnuje práce provedené v rámci řešení veřejné zakázky Geologická a geotechnická charakterizace horninového prostředí – PVP Bukov II, jejich výsledky a implikace. Charakterizační a popisné práce přímo navázaly na ražbu prostor pro budoucí podzemní laboratoř a zahrnuly zejména: geologické a geotechnické dokumentace čeleb a stěn díla, petrografickou, mineralogickou a strukturněgeologickou dokumentaci, hydrogeologickou charakterizaci prostředí, dále stanovení fyzikálně-mechanických vlastností horninového masivu in situ a v laboratoři, geofyzikální charakterizaci a monitoring seismických účinků trhacích prací. Dále mezi významné výsledky projektu patří 3D strukturněgeologický model, laserskenový model prostor, klasifikační systém URA, popis účinků razících prací na okolí nově vyražených chodeb a zkušenosti a doporučení pro budoucí projekty.

Klíčová slova

PVP Bukov, Geologická dokumentace, 3D model, laserové skenování, petrografie, geochemie, petrofyzikální data, objemová hustota, mineralogická hustota, pórovitost, magnetická susceptibilita, anizotropie magnetické susceptibility, přirozená radioaktivita, elektrická konduktivita, fyzikálně mechanické a geotechnické vlastnosti, laboratorní zkoušky, Goodman Jack, vodní tlakové zkoušky, hydrogeologický monitoring, geofyzikální průzkum, seismická tomografie, georadar, elektrická odporová tomografie, refrakční seismika, rychlost šíření seismických vln, měrný elektrický odpor horninového prostředí, měření seismických účinků trhacích prací, rychlost kmitání, EDZ, klasifikační systém

Abstract

This final report summarises the work carried out as part of the public contract Geological and geotechnical characterisation of the rock environment – Bukov URF II and its results and implications. The characterisation and descriptive work was directly related to the excavation of the space for the future underground laboratory and included in particular: geological and geotechnical documentation of the faces and walls of the work, petrographic, mineralogical and structural geological documentation, hydrogeological characterisation of the environment, as well as determination of the physical and mechanical properties of the rock mass in situ and in the laboratory, geophysical characterisation and monitoring of the seismic effects of blasting. In addition, significant results of the project include a 3D structural geological model, a laser scanning model of the area, a URA classification system, a description of the effects of blasting on the surroundings of the newly mined tunnels, and experiences and recommendations for future projects.

Keywords

Bukov URF, Geological documentation, 3D model, laserscanning, petrography, geochemistry, petrophysical data, bulk density, grain density, porosity, magnetic susceptibility, anisotropy of magnetic susceptibility, natural radioactivity, electrical conductivity, physico-mechanical and geotechnical properties, laboratory testing, Goodman Jack, water pressure test, hydrogeological monitoring, geophysical research, seismic tomography, georadar, electric resistivity tomography, seismics, excavation induced vibration measurement, vibration velocity, EDZ, classification

1 Úvod

1.1 Cíle a průběh projektu

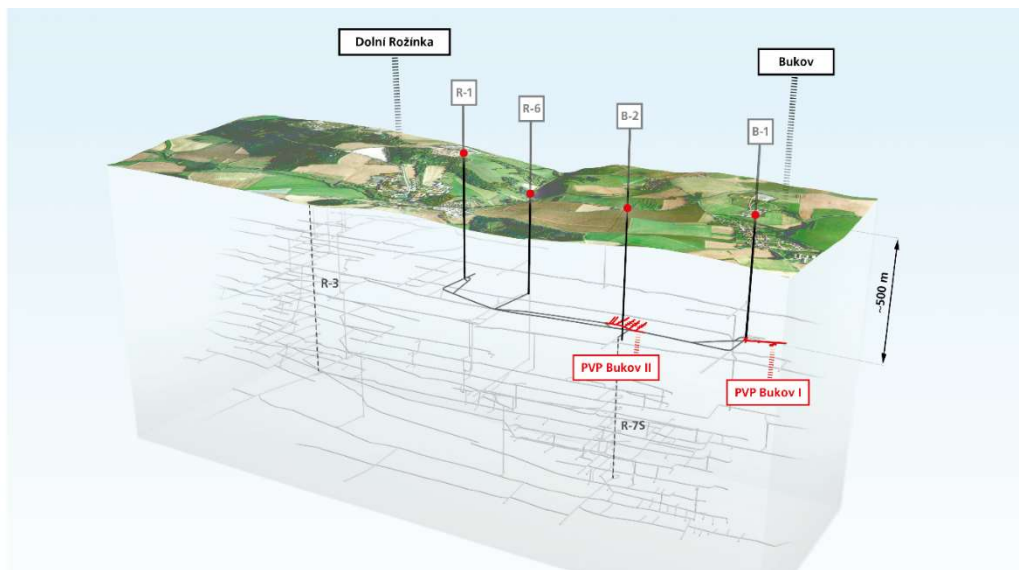
Realizace projektu Geologická a geotechnická charakterizace horninového prostředí – PVP Bukov II probíhala v letech 2021–2025 v přímé návaznosti na razicí práce realizované s.p. DIAMO o.z. GEAM pro SÚRAO. Řešení veřejné zakázky zajistil kolektiv Společnosti Bukov II, sestavený z odborníků z organizací Česká geologická služba (ČGS), INSET, s.r.o. (dále jen INSET), SG Geotechnika, a.s. (dále jen SG Geotechnika) a Ústav geoniky Akademie věd ČR (dále jen ÚGN), v.v.i. Na řešení se subdodavatelsky podílely také další subjekty – ÚJV Řež, a.s., Fakulta stavební ČVUT, Masarykova univerzita a RNDr. Jaromír Hanák.

Předmětem plnění veřejné zakázky bylo provedení komplexu geologických, hydrogeologických, geofyzikálních, geomechanických a jiných měření během ražby v nově vybudované části PVP Bukov (Smutek et al. 2023) označovaného jako II. etapa (dále jen PVP Bukov II). Výzkumné práce probíhaly jak in-situ, tak i v laboratořích a jejich účelem byla charakterizace horninového prostředí v místě nově vyražených laboratorních chodeb pro účely umísťování výzkumných experimentů SÚRAO. Mezi nejvýznamnější cíle zakázky patřily:

- vývoj a testování metod pro charakterizaci porušené a ovlivněné oblasti hornin v bezprostřední blízkosti nově vyražených podzemních prostor;
- vytvoření klasifikačního systému horninového masivu za účelem definování vhodných bloků hostitelského horninového prostředí pro umístění ukládacího obalového souboru v rámci hlubinného úložiště;
- získání relevantních dat využitelných pro sestavení a ověření popisných a matematických modelů.

Dle charakteru prací se jednalo o následující činnosti:

- dokumentace čeleb a průběhu trhacích prací,
- dokumentace a charakterizace horninového prostředí po vyražení příslušného důlního díla (geotechnické stanice, geofyzika, EDZ, VTZ apod.),
- laboratorní práce na vzorcích z vyraženého důlního díla (geomechanika, transportní vlastnosti apod.),
- monitorovací práce (hydrogeologie, seismické účinky trhacích prací),
- koncepční práce (3D geologický model, klasifikační systém apod.).



Obr. 1 Schéma bývalého dolu Rožná s lokalizací PVP Bukov I a PVP Bukov II (zdroj: SÚRAO)

Realizace prací proběhla jak in-situ v PVP Bukov II (dokumentační a monitorovací práce; Obr. 1), tak i v laboratořích a na pracovištích řešitelských organizací a jejich subdodavatelů. V podzemí byly práce realizovány na 12. patře bývalého dolu Rožná I, v oblasti východně od jam B-2 a R-7S a dopravního ochozu PŠ1-123 (Obr. 2). Rozsah vyražených prostor PVP Bukov II včetně provedených vrtných prací je uveden na Obr. 3.

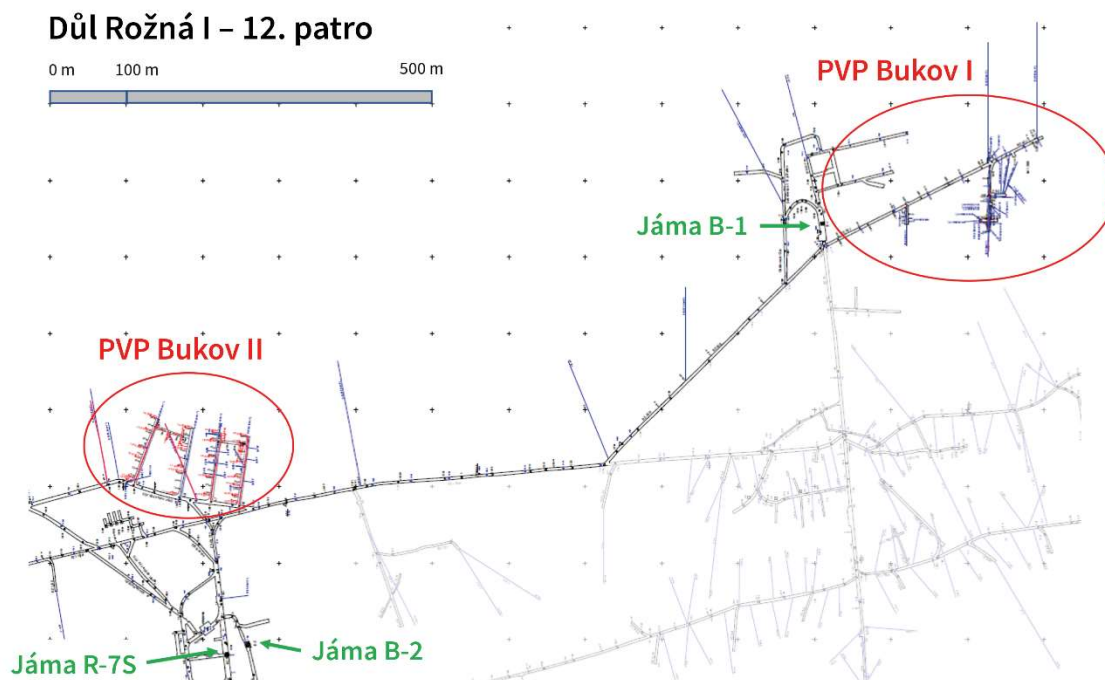
V rámci tohoto projektu byly připraveny následující technické zprávy, které popisují realizaci projektu, uvádějí metodiky prací a průběžně shrnují postup prací po jednotlivých letech řešení projektu:

- realizační projekt prací (Bukovská et al. 2021; TZ 542/2021);
- první průběžná zpráva – realizované práce v období 03/2021–02/2022 (Bukovská et al. 2022; TZ 596/2022);
- druhá průběžná zpráva – realizované práce v období 03/2022–02/2023 (Bukovská et al. 2023; TZ 664/2023);
- třetí průběžná zpráva – realizované práce v období 03/2023–02/2024 (Soejono et al. 2024; TZ 744/2024);
- čtvrtá průběžná zpráva – realizované práce v období 03/2024–02/2025 (Bukovská et al. 2025; TZ 811/2025).

K těmto zprávám a pro účel fakturací v mezidobí mezi průběžnými zprávami pak byla odevzdávána primární i interpretovaná data a další podklady, které jsou umístěny v odpovídajících složkách tohoto projektu na úložišti SÚRAO Sharepoint.

Závěrečné výstupy tohoto projektu pak zahrnují:

- závěrečná zpráva (tento dokument; TZ 812/2025);
- URA – systém klasifikace horninového masivu pro účely budování hlubinného úložiště v měřítku ukládací chodby (Soejono et al. 2025; TZ 810/2025);
- anglické shrnutí (TZ 812/2025_ENG).



Obr. 2 Schéma části 12. patra bývalého dolu Rožná mezi PVP Bukov I a PVP Bukov II (zdroj: SÚRAO)

Tato závěrečná zpráva shrnuje výsledky provedených prací dle jednotlivých témat definovaných Smlouvou a Realizačním projektem prací (kapitola 2) a dále zahrnuje komplexní popis horninového prostředí PVP Bukov II (kapitola 3.1), zhodnocení účinků razicích prací na prostředí PVP (kapitola 3.2) a zkušenosti a doporučení pro realizaci budoucích charakterizačních projektů (kapitola 0). V elektronických přílohách této zprávy jsou pak shrnuta nejvýznamnější data získaná v rámci řešení tohoto projektu.

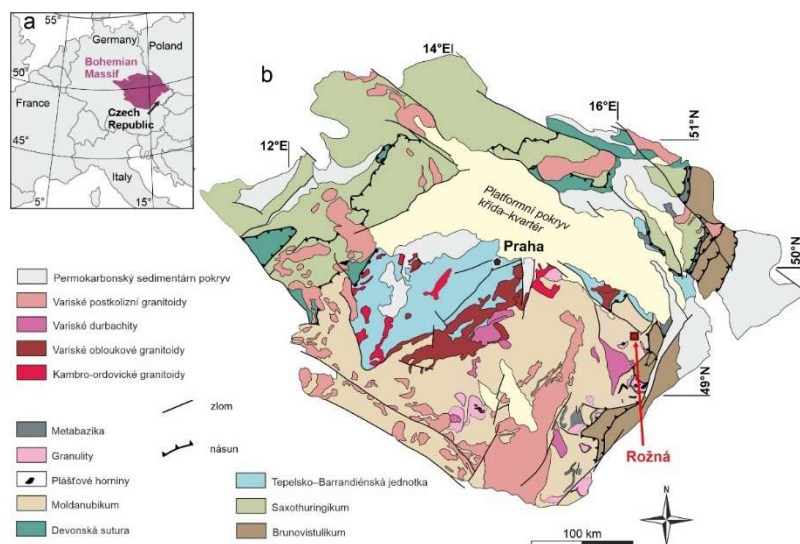


Obr. 3 Finální rozsah PVP Bukov II k začátku roku 2025 – vyznačení vyražených a dokumentovaných prostor po dobu řešení projektu včetně průběhu realizovaných vrtů na PVP Bukov II (zdroj: SÚRAO)

1.2 Regionální geologická stavba PVP Bukov II

PVP Bukov II je novou částí již existujícího Podzemního výzkumného pracoviště Bukov (Bukovská et al. 2019; Smutek et al. 2023) využívající infrastrukturu bývalého hlubinného uranového dolu Rožná. Lokalita dolu Rožná se nachází ve východní části Českého masivu (Obr. 4b). Z hlediska regionálního geologického členění je důl Rožná umístěn ve vysoce metamorfovaných horninách tzv. svrateckého moldanubika. To je součástí moldanubické zóny, která v rámci variského orogenního pásma a v současném erozním řezu tvoří její nejhlubší část (Dallmeyer et al. 1995; Schulmann et al. 2014). Svratecké krystalinikum je tvořeno především metasedimentárními a metavulkanickými horninami metamorfovanými v teplotně-tlakových podmínkách vyšší amfibolitové facie. Obsahuje však i drobná tělesa spodněkorových granulitů a ultrabazických hornin pocházející ze zemského pláště (Schulmann et al. 2008; Tajčmanová et al. 2010).

PVP Bukov II se nachází na 12. patře dolu v hloubce cca 500 m pod povrchem (Obr. 1) a je tvořeno relativně monotónní sekvencí migmatitizovaných pararul, migmatitů a amfibolitů s vložkami erlanů. Charakteristická je relativně komplikovaná vrásavá stavba, která je výsledkem heterogenní transpozice dvou metamorfních foliací (Bukovská et al. 2019; Soejono et al. 2010; Tajčmanová et al. 2010). Celková litologická asociace a duktilní strukturní záznam je výsledkem polyfázového deformačního a metamorfního vývoje v centrální části variského kolizního systému (Schulmann et al. 2005, 2008). Oblast dolu Rožná je specifická křehkým porušením, projevujícím se přítomností velkého množství střížných zlomových zón a puklin. Výsledná zlomová síť a puklinový systém a jejich několikanásobná reaktivace jsou důsledkem několika etap pozdně variské až alpské zlomové aktivity a frakturace (Bukovská et al. 2020; Kříbek et al. 2009)



Obr. 4 Lokalizace dolu Rožná (a) geografická pozice Českého masivu, (b) zjednodušená geologická mapa Českého masivu

2 Výsledky řešení projektu

V rámci projektu byl realizován rozsáhlý výzkum zahrnující velké množství specializací a metod využitých pro komplexní charakterizaci horninového prostředí PVP Bukov II. V průběhu projektu byla získaná data prezentovaná v ročních zprávách (Bukovská et al. 2022, 2023, 2025; Soejono et al. 2024), ve kterých je detailně popsán průběh a výsledky prací v jednotlivých letech trvání projektu. V této závěrečné zprávě jsou popsány nejdůležitější výsledky jednotlivých metod, závěry a interpretace přispívající k detailnímu pochopení geologických, tektonických, hydrogeologických, geomechanických a dalších vlastností horninového masivu v PVP Bukov II.

2.1 Datamanagement

V rámci projektu byl po celou dobu dodržován schválený datový model, který byl součástí Realizačního projektu prací (Bukovská et al. 2021) a definoval plánovaná výstupní data tohoto projektu. V rámci sjednocení dat s dokumentací v podzemí byl průběžně tvořen a upravován GIS projekt (Elektronická příloha 1), který zahrnuje dokumentační body (hydrogeologické, čelby, petrografie), lokace odebraných vzorků (petrologie, SEM, geochemie žil, celohorninová geochemie, velkoobjemové vzorky), strukturněgeologickou mapu PVP Bukov II, chodby, vrty a metráže (převzato od SÚRAO, resp. DIAMO s.p. o.z. GEAM) a další prostorová data.

2.2 Základní dokumentace díla

2.2.1 Dokumentace čeleb a stěn

V rámci geotechnické a geomechanické dokumentace ražeb bylo pracovníky firem SG Geotechnika a INSET provedeno celkově 449 záběrových listů obsahujících obsahující geologickou a geotechnickou dokumentaci ražeb, fotodokumentaci záběru, formulář s výpočtem indexových klasifikačních systémů QTS, RMR a Q systém a fotogrammetrický model. Pro geotechnickou dokumentaci ražeb byly využity tři indexové klasifikační systémy užívané v podzemním stavitelství RMR (Bieniawski 1989), QTS (Tesař 1977 a 1978) a Q systém (Barton et al. 1974).

Metodika vyhotovení záběrových listů byla podrobně popsána v předešlých průběžných zprávách tohoto projektu. Podrobné vyhodnocení ražeb pro jednotlivé laboratorní i větrací chodby i zkušební komory bylo také vyhodnoceno v rámci průběžných zpráv (Tab. 1).

Tab. 1 Přehled chodeb a zkušebních komor PVP Bukov II a odpovídajících průběžných zpráv, ve kterých jsou popsány výsledky dokumentace čeleb a stěn

	Chodby (staničení), které byly hodnoceny
První průběžná zpráva (Bukovská et al. 2022)	L8; L7; V7-8; L6 (0-55 m); L5 (0-72,2 m)
Druhá průběžná zpráva (Bukovská et al. 2023)	L6 (55-90,6 m); L5 (72,2-90,8 m); L4a (0-37,1 m); V5-6, respektive V6-5; ZK8-1S; ZK8-1J; ZK8-2S; ZK8-2J
Třetí průběžná zpráva (Soejono et al. 2024)	L4a (37,1-75,4 m); L4b; L4c; L4d; ZK6-1S; ZK6-2S; ZK7-1J; ZK7-1S; ZK7-2J; ZK7-2S; ZK7-3J
Čtvrtá průběžná zpráva (Bukovská et al. 2025)	ZK5-1J; ZK5-1S

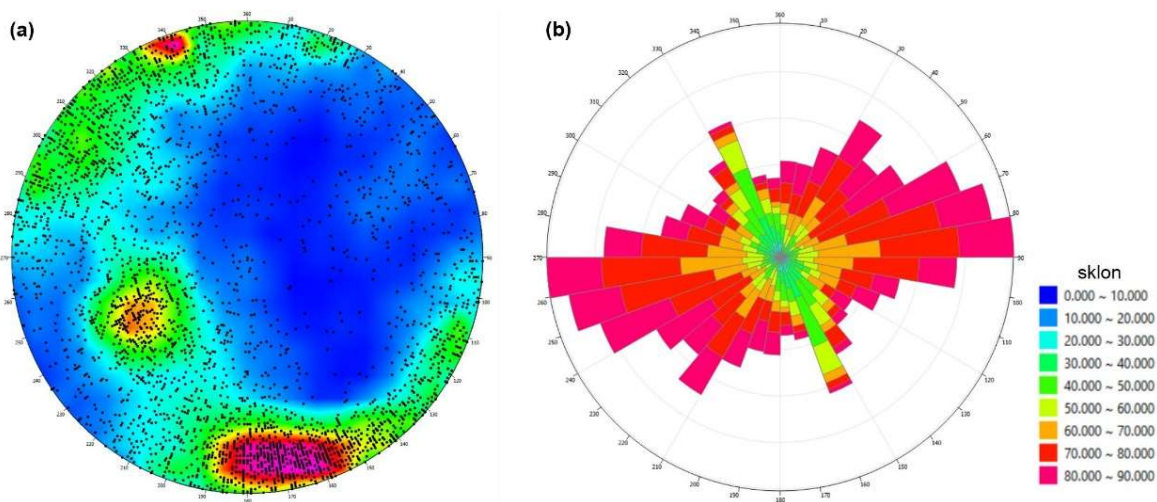
Sledované parametry se pohybovaly v následujícím rozsahu:

Horninový masiv byl nejčastěji rozpukáný ve dvou diskontinuitních systémech, přičemž rozpukání bylo v blízkosti poruchových pásem až ve třech systémech s dalšími nepravidelnými diskontinuitami. V několika místech byl horninový masiv v podstatě pouze nepravidelně rozpukáný. Průměrná vzdálenost diskontinuit byla od 0,04 po 2 m s průměrnou vzdáleností 0,2 m. Povrchy diskontinuit byly nejčastěji zvlňené a drsné. Zlomy a střížné pukliny byly nejčastěji sevřené nebo pevně vyhojené kalcitem, případně křemenem. Několik podružných střížných puklin bylo vyplněno jílem s rozevřením až 20 mm, ojediněle s ohlazy. Pevnost horniny v prostém tlaku dosahovala hodnot v rozmezí 50–130 MPa s průměrnou hodnotou 100 MPa. Průměrná hodnota RQD byla 87 % s ojedinělými výkyvy mezi 35–100 %. V prostoru PVP Bukov II je horninový masiv poměrně suchý s relativně malými přítoky vázanými hlavně na tektonické poruchy horninového masivu. Proto se méně často měnily parametry charakterizující vliv podzemní vody a tím měly malý podíl na výpočet bodů indexových klasifikací. Ostatní parametry, jako SRF v případě Q systému a jiné, se měnily pouze sporadicky. Indexové klasifikace se mírně liší v parametrech, které vyhodnocují, a také v míře vážnosti, kterou jednotlivým parametrům přisuzují. Odlišnosti ve vyhodnocovaných parametrech se odráží v mírné rozdílnosti bodového ohodnocení indexových klasifikačních systémů. Přes tyto rozdíly však všechny parametry vykazují v průměru vlastnosti velmi dobrého horninového prostředí, které vedly k relativně vysokým hodnotám bodů indexových

klasifikačních systémů. Přehled výsledků indexových klasifikací pro jednotlivé záběry je v Elektronická příloha 2.

Celkově probíhala ražba chodeb pro PVP Bukov II ve velmi dobrých podmínkách z hlediska stability podzemního díla, o čemž svědčí nutnost minimálního vystrojení chodeb technickými prostředky. Mírně zhoršené vlastnosti byly pozorovány v blízkosti křížení chodeb, kde byl pro stabilizaci výrubu užitý stříkaný beton. V několika krátkých úsecích s problematickou polohou křehce(-duktilně) reaktivované foliace („měkkého“ migmatitu) byl výrub vystrojen TH výztuží.

Strukturněgeologická dokumentace stěn chodeb PVP Bukov II byla průběžně prováděna pracovníky České geologické služby za účelem získání informací o litologické a tektonické stavbě. Získaná data posloužila jako základ pro tvorbu strukturněgeologické mapy, 3D strukturněgeologického modelu a hrála i významnou roli v hodnocení stěn klasifikačním systémem URA (Soejono et al. 2025). Během těchto prací byl kladen důraz na identifikaci všech duktilních i křehkých typů struktur (Elektronická příloha 2), jejich orientaci, vztahy, četnost, mocnost, typ výplně, její mocnost a kinematiku. Mocnost výplně je určována ve směru kolmém na strukturu dané mocnosti v místě dokumentace. Z hlediska dokumentace stěn chodeb jsou struktury rozlišovány jako průběžné a neprůběžné. Jako průběžné jsou nazývány struktury probíhající přes celý profil chodby a pokračující dále do horninového masivu. Struktury, které jsou v rámci chodby ukončeny a dále nepokračují, jsou klasifikovány jako neprůběžné. Souběžně byla prováděna fotogrammetrická dokumentace chodeb. Významnější poruchové zóny dokumentované na stěnách byly korelovány s texturou ve fotogrammetrického modelu. Metodika terénních prací, zpracování dat a výsledky strukturněgeologické a fotogrammetrické dokumentace stěn chodeb PVP Bukov II jsou detailně popsány ve zprávách Bukovská et al. (2022, 2023, 2025) a Soejono et al. (2024) viz Tab. 1.



Obr. 5 Strukturní diagramy zobrazující pukliny dokumentované na stěnách chodeb PVP Bukov II: (a) póly ploch a konturový diagram puklin ($n = 5482$), Schmidtova projekce na spodní polokouli, interval kontur 0,01 %; (b) růžicový diagram průběhu puklin s krokem 10° a barevným histogramem sklonu struktur (počet struktur, $n = 5482$)

Petrografické charakteristiky jsou blíže popsány v kapitole 2.4.1.1. Duktilní deformační záznam na PVP Bukov II je výsledkem superpozice dvou generací metamorfních foliací. Starší stavba měla původně strmou orientaci a je zachována pouze reliktně ve formě uzavřených až izoklinálních vrás se subhorizontálními vrásovými osami a generelně sz.–jv. průběhem. Druhá foliace má penetrativní charakter a generelně zapadá pod středními úhly k JZ. Metamorfní foliace představuje zásadní strukturní prvek významně ovlivňující jak systematiku křehkých prvků, tak i celkové porušení a homogenitu horninového prostředí. Puklinový systém je tvořen několika různě významnými puklinovými sety (Obr. 5). Dominantní puklinový set je tvořen subvertikálními puklinami zjz.–vsv. průběhu. Další významná skupina je zastoupena strukturami kolmými na průměrnou orientaci metamorfní foliace a zapadajícími pod středními úhly k SV. Početně méně významné puklinové sety zahrnují subvertikální pukliny sv.–jz. a zsz.–vjv. průběhu. Nicméně vzhledem k silné mechanické anizotropii (foliaci) a její časté reaktivaci jsou puklinové sety nepravidelné a nesystematické. Nejdůležitějšími strukturami jsou významnější zlomové a poruchové zóny vstupující do klasifikačního systému jako kritické struktury (Soejono et al. 2025). V rámci PVP Bukov II se vyskytují dva typy kritických struktur představující oblasti s výrazně negativními mechanickými a hydrogeologickými vlastnostmi. Prvními jsou zóny křehce reaktivované a silně alterované metamorfní foliace představující polohy konkordantní s penetrativní duktilní stavbou, tvořené dominantně biotitem a obsahující místy také chlorit a jílové minerály. Dalším typem jsou střížné poruchy (střížné pukliny až malé zlomy). Tyto zóny jsou většinou vyplněné kataklastickým materiálem, jílovými minerály, chloritem, karbonáty nebo křemenem. Mocnost a typ výplně je však v rámci jednotlivých struktur velice variabilní. Celková zlomová síť je popsána v kapitole 2.3.2, projevy jednotlivých struktur na stěnách chodeb jsou uvedeny v Elektronická příloha 2 a Elektronická příloha 5 a jejich prostorová distribuce zobrazená ve strukturněgeologické mapě (Obr. 6 a Elektronická příloha 7).“

2.2.2 Popis vrtných jader

V rámci projektu PVP Bukov II bylo dokumentováno 10 vrtných jader (L7-87D, L7-87L, L7-87U, L7-87UL, L7-90F, L8-54DL, L4a-72D, L4a-72U, L4-72UL, L4-72L). Tato jádra byla popsána z hlediska zastižených struktur, petrografie a skenována pomocí skeneru vrtných jader DMT CoreScan3. Účelem skenu bylo získání rozbalených válcových ploch jednotlivých vrtů (sken). Tyto skeny byly následně zpracovány nejprve v SW CoreBase (všechny vrty z chodeb L7 a L8) a následně v nově zakoupeném SW WellCAD (vrty z chodby L4a). V roce 2024 byly zároveň vrty L7-87D, L7-87L a L7-87U přepracovány v SW WellCAD. Výsledkem jsou vrtné kolonky ve formátu .pdf obsahující informace vztahující se k in-situ dokumentaci vrtných jader (typ struktury, její výplň a mocnost výplně, litologie atd.) a data ze skeneru vrtných jader v kombinaci s daty získanými ze SW WellCAD (sken rozbaleného jádra, T_{ad} póly, 3D snímek s plochami jednotlivých struktur). Součástí předaných dat jsou i stereografické projekce struktur (póly ploch na spodní hemisféru ve Schmidově projekci; Elektronická příloha 3) pro každý vrt, data ve formátu .xlsx a zdrojová data příslušející jednotlivým vrtům. Výsledkem je přehledné grafické zobrazení vrtného jádra (v pdf, Elektronická příloha 3) se všemi získanými informacemi a údaji o vrtu, zachycených strukturách a jejich charakteru. V kombinaci se stereografickými projekcemi struktur jednotlivých vrtů slouží tato data jako jeden ze vstupů k posouzení vývoje a charakteru křehkých struktur, foliačních staveb a litologických přechodů v délce vrtů.

2.2.3 3D sken vyraženého podzemního díla

Zaměření skutečného stavu nově vyražených prostor PVP Bukov II bylo provedeno pomocí technologie laserového skenování. Prvotním výstupem ze skeneru je mračno bodů (point cloud). Jedná se řádově o milióny bodů rozmístěných v prostoru, které vznikají během procesu samotného skenování, kde každý bod mračna je definován vlastní prostorovou souřadnicí (x, y, z). Získané mračno bodů bylo připojeno na důlní bodové pole v souřadnicovém systému S-JTSK a v jadranském výškovém systému. V další fázi zpracování bylo v SW Cyclone CORE provedeno filtrování mračen bodů od nežádoucího šumu. Takto upravená mračna bodů byla exportována do formátu .e57. Z filtrovaného mračna bodů byl následně v SW Cyclone 3DR generován 3D TIN model nově vyražených prostor. Povrch modelu byl upraven do topologicky čisté podoby bez nadbytečných trojúhelníků a otvorů. Vzhledem k velkému objemu dat byl model decimován cca na 30 % s cílem zachovat hustotou trojúhelníků v místech s vyšší křivostí, tak aby bylo možné s modelem dále efektivně pracovat i v jiném SW. Výsledný model byl exportován do formátu .obj a .dwg. Výsledný model ve formátu 3D pdf je obsahem přílohy (Elektronická příloha 4).

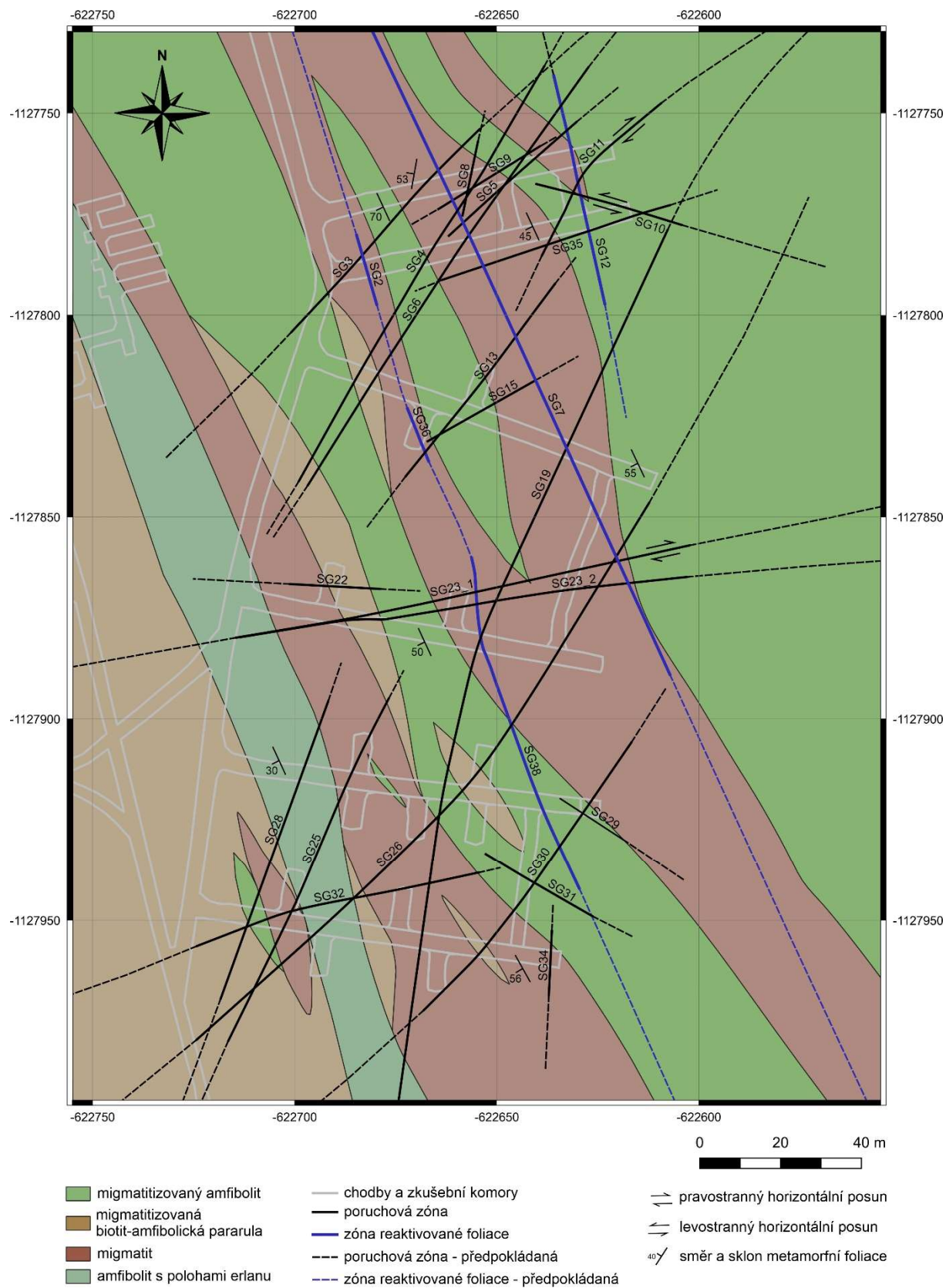
2.3 Geologická a strukturněgeologická charakterizace

2.3.1 Strukturněgeologická mapa

Strukturněgeologická mapa (Obr. 6) zobrazuje geologické a strukturní poměry PVP Bukov II a navazuje na mapu založenou na interpretaci pilotních vrtů S-28, S-29, S-30, S-32 a S-33 (Jaroš et al. 2021). Mapa byla sestavena na základě detailní terénní petrografické (kapitola 2.4.1) a strukturní (kapitola 2.2.1) dokumentace chodeb a fotogrammetrického modelu jednotlivých chodeb. Terénní pozorování byla doplněna informacemi o chemickém složení hornin (kapitola 2.4.3) a výsledky geofyzikálního výzkumu (kapitola 2.8). Metodika terénních prací, zpracování dat a podrobný popis petrografických a tektonických charakteristik a geologických vztahů v jednotlivých chodbách jsou uvedeny ve zprávách Bukovská et al. (2022, 2023, 2025) a Soejono et al. (2024) – prostorově dle Tab. 1. Pro přehlednost jsou v mapě vykresleny rozsahy chodeb PVP Bukov II a blízkého okolí.

Oblast PVP Bukov II je dominantně tvořena tělesy migmatitizovaných amfibolitů, migmatitizovaných pararul a migmatitů. Tyto horninové typy nemají ostré vzájemné kontakty, ale ve většině případů jsou mezi nimi plynulé přechody. Celková konfigurace horninových těles a litologických přechodů respektuje regionální průběh mladší penetrativní metamorfní stavby zapadající generelně pod středními úhly k JZ. Tektonická síť zobrazuje známý a předpokládaný rozsah poruchových zón (resp. kritických struktur; Obr. 6; Elektronická příloha 2). Ty zahrnují jednak lokalizované zóny křehce reaktivované foliace a zlomové struktury většího měřítka. Systém poruchových zón je popsán v kapitole 2.3.2.

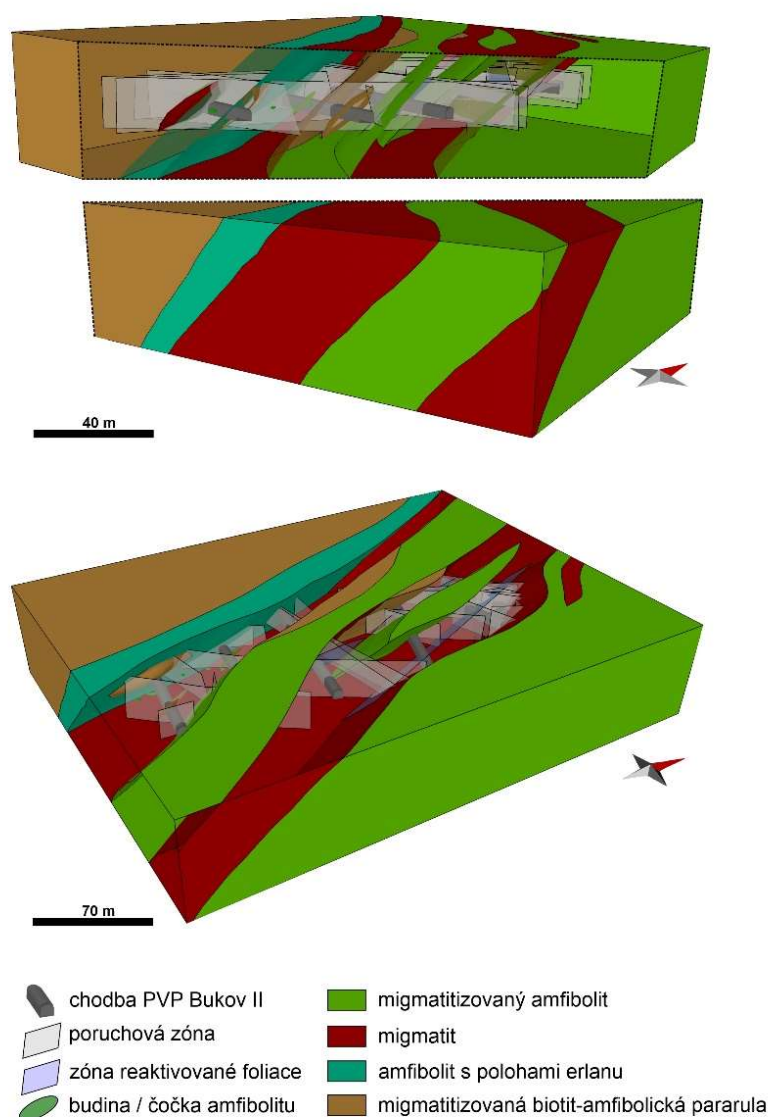
Nově sestavená strukturněgeologická mapa (Obr. 6) a mapa Jaroše et al. (2021) se shodují v základní orientaci kontaktů jednotlivých horninových typů, v převažujícím výskytu migmatitizovaných pararul v západní části a migmatitů a amfibolitů ve východní části PVP Bukov II. Dále v obou mapách relativně dobře koreluje rozsah tělesa horniny nazývané jako amfibolit s polohami erlanu/erlan-amfibolitový stromatit. V mapě Jaroše et al. (2021) jsou v centrální a východní části oblasti relativně rovnoměrně zastoupeny střídající se tenká tělesa (o mocnosti cca 1–5 m) migmatitu a amfibolitu. Naopak v nové mapě (Obr. 6) tvoří jednotlivé litologie výrazně mocnější tělesa. V mapě Jaroše et al. (2021) se v severovýchodní části mapy nacházejí čtyři tektonické zóny, které svojí polohou a geometrií přibližně odpovídají pozorovaným zónám reaktivované foliace (Obr. 6). Ostatní zlomové zóny pozorované na stěnách vyražených chodeb (Obr. 6) nebyly v dokumentovaných vrtech zastiženy. Popsané rozdíly vyplývají především z různého měřítka dokumentace vrtného jádra a vyražené chodby. V rámci celé chodby je možné stanovit převažující horninový typ v širším prostorovém kontextu. V menší míře mohou být některé rozdíly způsobené částečně subjektivním terminologickým zařazením dokumentujícím geologem. Srovnání těchto dvou metodik petrografické dokumentace ukazuje v základních rysech na jejich relativně dobrou shodu. Tektonická síť je v mapě Jaroše et al. (2021) výrazně jednodušší a ukazuje na výrazné limity detekce zlomových zón pouze z vrtných dat.



Obr. 6 Strukturněgeologická mapa PVP Bukov II

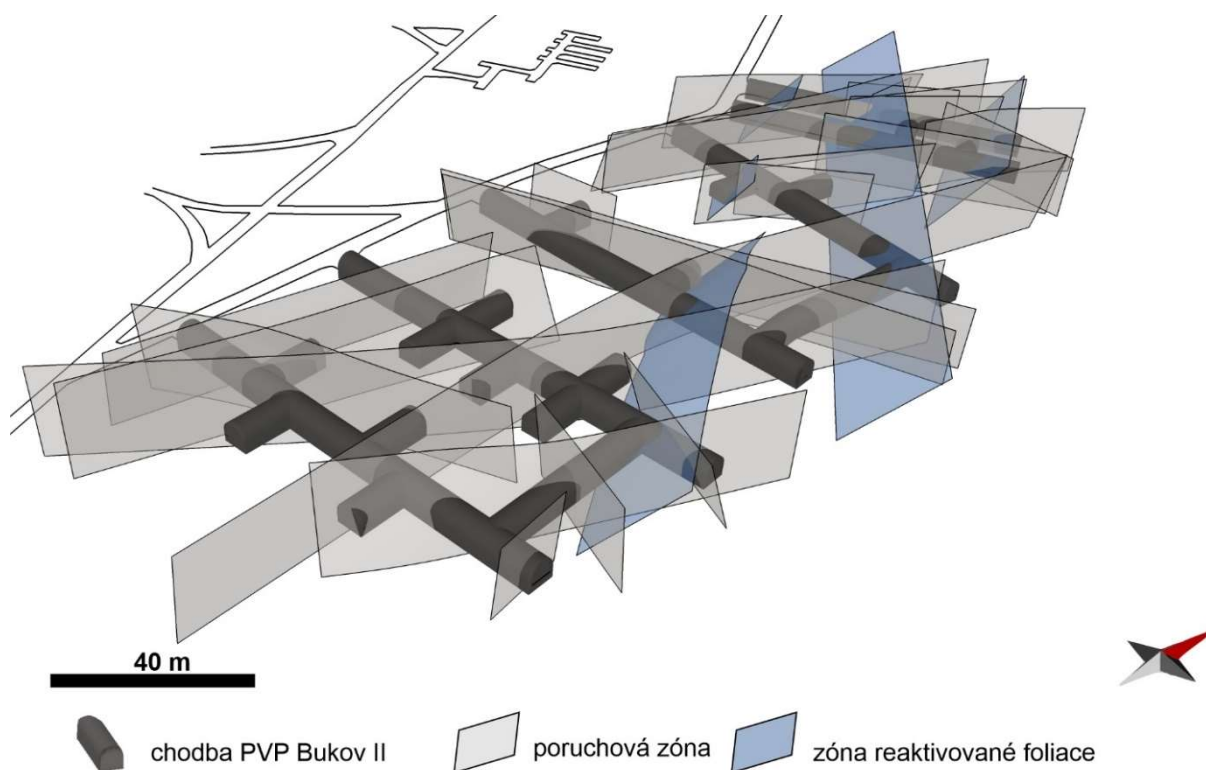
2.3.2 3D strukturněgeologický model

3D strukturněgeologický model zobrazuje interpretaci geologické a tektonické stavby studovaného prostoru PVP Bukov II a nejbližšího okolí (Obr. 7; Elektronická příloha 7). 3D model a jeho dílčí grafické výstupy poskytují efektivní možnosti prezentace výsledků projektu využitelné pro navazující výzkumné činnosti na PVP Bukov II. Model byl sestaven na základě strukturněgeologické mapy (Obr. 6) doplněné dalšími informacemi o prostorové geologické a strukturní stavbě oblasti. Metodika tvorby 3D modelu je detailně popsána ve zprávách Bukovská et al. (2023, 2025) a Soejono et al. (2024). Rozměry modelu činí $260 \times 200 \times 50$ m s celkovým objemem $2,6 \times 10^5$ m³.



Obr. 7 3D strukturněgeologický model PVP Bukov II zobrazující hlavní litologická tělesa a strukturní prvky

Model zahrnuje prostorovou distribuci a orientaci dvou hlavních typů geologických objektů (Obr. 7): litologických těles a poruchových zón (Obr. 8). Kromě modelovaného tvaru hlavních horninových těles a jejich kontaktů jsou v modelu zobrazena drobnější tělesa amfibolitu, lokálně tvořící čočky nebo budiny. Poruchová síť kritických struktur (kapitola 2.2.1) je tvořená pěti zónami reaktivované foliace konkordantními s penetrativní metamorfní stavbou a dvaceti třemi poruchovými zónami (Obr. 6; Elektronická příloha 2; Elektronická příloha 5; Elektronická příloha 6; Elektronická příloha 7). Projevy dvou zón reaktivované foliace SG7 a SG12 byly konzistentně dokumentovány na všech stěnách zasažených chodeb, a proto jsou tyto dvě struktury považované v daném rozsahu jako ověřené (Obr. 5). V centrální části PVP Bukov II (Obr. 5) byly odpovídající projevy zjištěny pouze na některých chodbách (L4b, ZK5-1J, L6 a L7), zatímco na chodbách L4a a L5 byly méně výrazné. Proto jsou tyto tři segmenty SG2, SG36 a SG38 zobrazeny samostatně (Elektronická příloha 2) a jejich propojení je předpokládáno (Obr. 5). Nejvíce jsou těmito strukturami zasaženy severní (L4a, L4b a L5) a jižní (L7 a L8) části oblasti, zatímco centrální část (L5 a L6) je jimi relativně méně porušená. Poruchové zóny mají většinou subvertikální orientaci a na základě průběhu tvoří tři skupiny (Obr. 6, Obr. 8): nejdelší zlomy s ssv.–jjz. až sv.–jz. průběhem, kratší zlomy s ssz.–jjv. průběhem a nejméně početné zóny s zjz.–vsv. průběhem. Maximální posuny na identifikovaných kritických strukturách jsou v řádu desítek cm a zóny křehce reaktivované foliace nejsou výrazněji posouvány protínajícími zlomovými zónami. Míra pohybu identifikovaná na některých zlomových strukturách není promítnutelná v daném měřítku modelu.



Obr. 8 Zjednodušené geometrie chodeb PVP Bukov II se zobrazením poruchových zón a zón reaktivované foliace

2.4 Petrografická a geochemická charakteristika

2.4.1 Petrografická charakteristika

2.4.1.1 Petrografie hornin

Petrografická charakteristika hornin PVP Bukov II byla prováděna pracovníky České geologické služby. Chemické složení minerálních fází bylo stanoveno v Laboratoři rentgenové mikroanalýzy ČGS. Prostředí PVP Bukov II je tvořeno migmatity, migmatitizovanými pararulami a amfibolity ($\geq 80\%$ amfibolu). Litologie do sebe pozvolně přechází podél ploch foliace a lze je klasifikovat jako biotitické, amfibol-biotitické až amfibolické. Dominantní litologií je stromatitický biotitický migmatit (Obr. 9). Všechny litologie obsahují granát, který může dosahovat velikosti až 1,5 cm. V celém prostředí se hojně vyskytují budiny amfibolitů (Obr. 10). Lokálně jsou přítomny i polohy pegmatitu. V amfibolitech byly v několika úsecích dokumentovány několik cm mocné polohy erlanu (Obr. 11). Okolo zlomů či střížných puklin dochází k alteracím okolní horniny (Obr. 12). Běžně se jedná o sericitizaci, karbonatizaci či hematizaci živců, a dále chloritizaci biotitu. Hojnými akcesoriemi ve všech litologiích jsou apatit, sulfidy, zirkon, monazit, a v amfibolitech navíc také titanit.



Obr. 9 Biotitický migmatit se stromatitickou texturou



Obr. 10 Budina amfibolitu v migmatitu



Obr. 11 Amfibolit s polohami erlanu



Obr. 12 Hydrotermálně alterovaná zóna v okolí zlomu

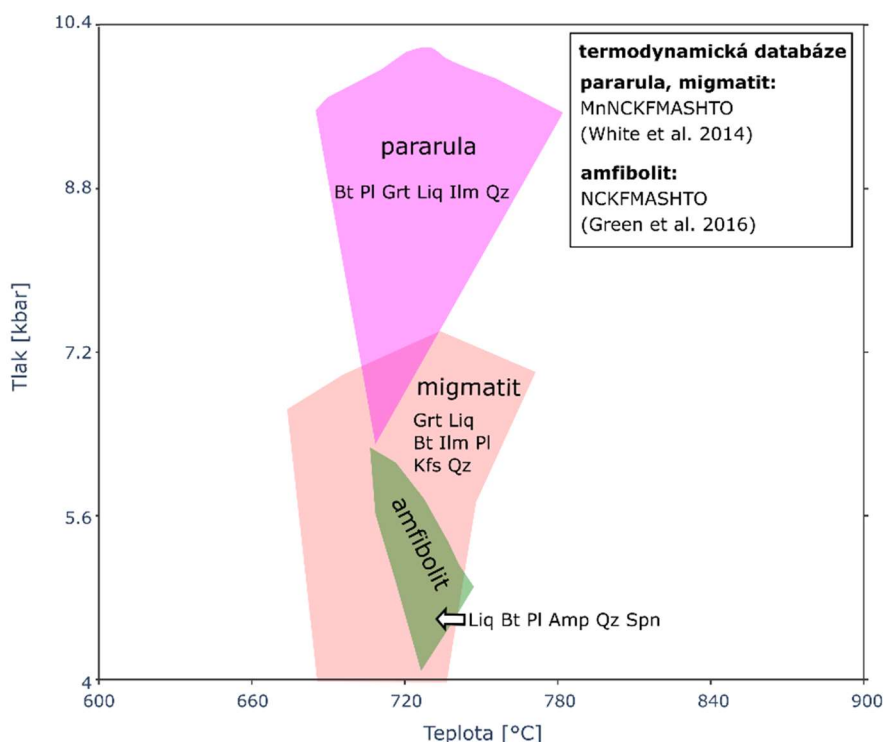
Migmatity jsou tvořeny světlými pásy obsahujícími křemen, plagioklas ($X_{Ab} = 66,3-75,7$), K-živce ($X_{Ab} = 1,1-15,4$) a porfyroblasty granátu či jejich reliktů ($Prp_{5,5-13,8}Alm_{44,4-72,0}Grs_{4,1-21,0}Sps_{9,8-30,6}$; $XMg = 0,10-0,16$). Světlé pásy se střídají s tmavými pásy, které jsou dominantně tvořeny variabilním množstvím amfibolu a biotitu ($XMg = 0,44-0,50$; $Ti = 0,1-0,2$ apfu). Pararuly jsou tvořeny křemenem, plagioklasem ($X_{Ab} = 64,3-78,8$), K-živcem ($X_{Ab} = 1,3-31,8$), variabilním množstvím biotitu ($XMg = 0,47-0,59$, $Ti = 0,0-0,2$ apfu) a amfibolu a porfyroblasty granátu ($Prp_{8,4-27,1}Alm_{5,3-72,0}Grs_{4,8-25,10}Sps_{1,6-26,7}$; $XMg = 0,11-22,7$). Amfibolity jsou dominantně tvořeny amfibolem o složení fero-až magnezio-hornblendu ($XMg = 0,41-0,62$, $Ti = 0,0-0,2$ apfu), plagioklasem ($X_{Ab} = 35,9-77,1$) a dále variabilním množstvím biotitu,

porfyroblasty granátu ($\text{Prp}_{8,3-16,9}\text{Alm}_{52,5-71,4}\text{Grs}_{6,0-31,0}\text{Sps}_{1,4-10,6}$; XMg : 0,13–0,23), křemenem a K-živcem (XAb = 0,7–18,6).

Detailní charakteristika vybraných litologických typů včetně makro a mikrofotografií a chemismů minerálních fází je součástí přechozích průběžných zpráv (Bukovská et al. 2022, 2023, 2025; Soejono et al. 2024). Petrografická dokumentace zahrnující seznam odebraných vzorků a dokumentaci chodeb a vrtů je k dispozici v Elektronická příloha 8.

2.4.1.2 Termodynamické modelování teplotně-tlakových podmínek metamorfózy

Výzkum teplotně-tlakových podmínek metamorfózy byl proveden pracovníky České geologické služby. Pro termodynamické modelování teplotně-tlakových podmínek metamorfózy (P–T) byly vybrány tři reprezentativní litologie v prostředí PVP Bukov II, kterými jsou biotitická pararula s granátem, biotitický migmatit s granátem a granátický amfibolit. Pozorované hlavní minerální asociace hornin odpovídají ve vypočtených pseudosekcích polím: pararula: Bt–Pl–Grt–Liq–Ilm–Qz; migmatit: Grt–Liq–Bt–Ilm–Pl–Kfs–Qz; amfibolit: Liq–Bt–Pl–Amp–Qz–Spn, která ukazují na vývoj v podmínkách amfibolitové facie (Obr. 13). Teplotně-tlakové podmínky pro litologie z prostředí PVP Bukov II byly na základě modelovaných pseudosekcí odhadnuty na cca 5,7–7,1 kbar a 690–730 °C. Detaily určení P–T podmínek jsou k dispozici ve čtvrté průběžné zprávě (Bukovská et al. 2025).



Obr. 13 Shrnutí výsledných odhadovaných P–T podmínek pro reprezentativní litologické typy PVP Bukov II (zelené pole – amfibolit, oranžové pole – migmatit, růžové pole – pararula)

2.4.2 Geochemie žilných a puklinových mineralizací

Výzkum žilných a puklinových mineralizací byl proveden pracovníky České geologické služby a navazoval na předešlé studie v prostoru PVP Bukov (Bukovská et al. 2017) a dolu Rožná (Bukovská et al. 2020).

Během let 2021–2023 byly průběžně odebírány vzorky z chodeb L4a až L8 a V5-6. Celkem bylo odebráno 102 vzorků. Popisy všech odebraných vzorků jsou uvedeny v průběžných zprávách (Bukovská et al. 2022, 2023, 2025; Soejono et al. 2024). Pro analýzy bylo vybráno 48 vzorků (Elektronická příloha 9). Do analýz a následných interpretací byly zahrnuty i vzorky z vrtů S-27, S-31 a S-36.

Metodika analytických prací byla detailně popsána v průběžných zprávách (Bukovská et al. 2024, 2025). V karbonátech z karbonátových a křemen-karbonátových žil byly stanoveny hlavní prvky, stopové prvky a REE. Dále byly stanoveny poměry izotopů uhlíku a kyslíku a obsahy izotopů stroncia. V karbonátech a křemenech byly studovány také fluidní inkluze. V sulfidech bylo stanoveno izotopické složení síry. Na vybraných vzorcích minerálů metasomatických a alteračních procesů byla provedena rtg analýza. Oproti projektu nebyla karbonátová mineralizace podrobena katodoluminiscenci na elektronovém mikroskopu. Cílem studia bylo určení P–T podmínek vzniku mineralizace a stanovení zdrojů minerogenetických roztoků.

Karbonátové a křemen-karbonátové žíly jsou převážně strmé. Karbonáty jsou zastoupeny většinou jednou generací, výjimečně až třemi generacemi. Sulfidická mineralizace je zastoupena převážně pyritem, méně pyrhotinem. Sulfidy většinou tvoří povlaky na puklinách, případně jsou součástí karbonátových a křemen-karbonátových žil.

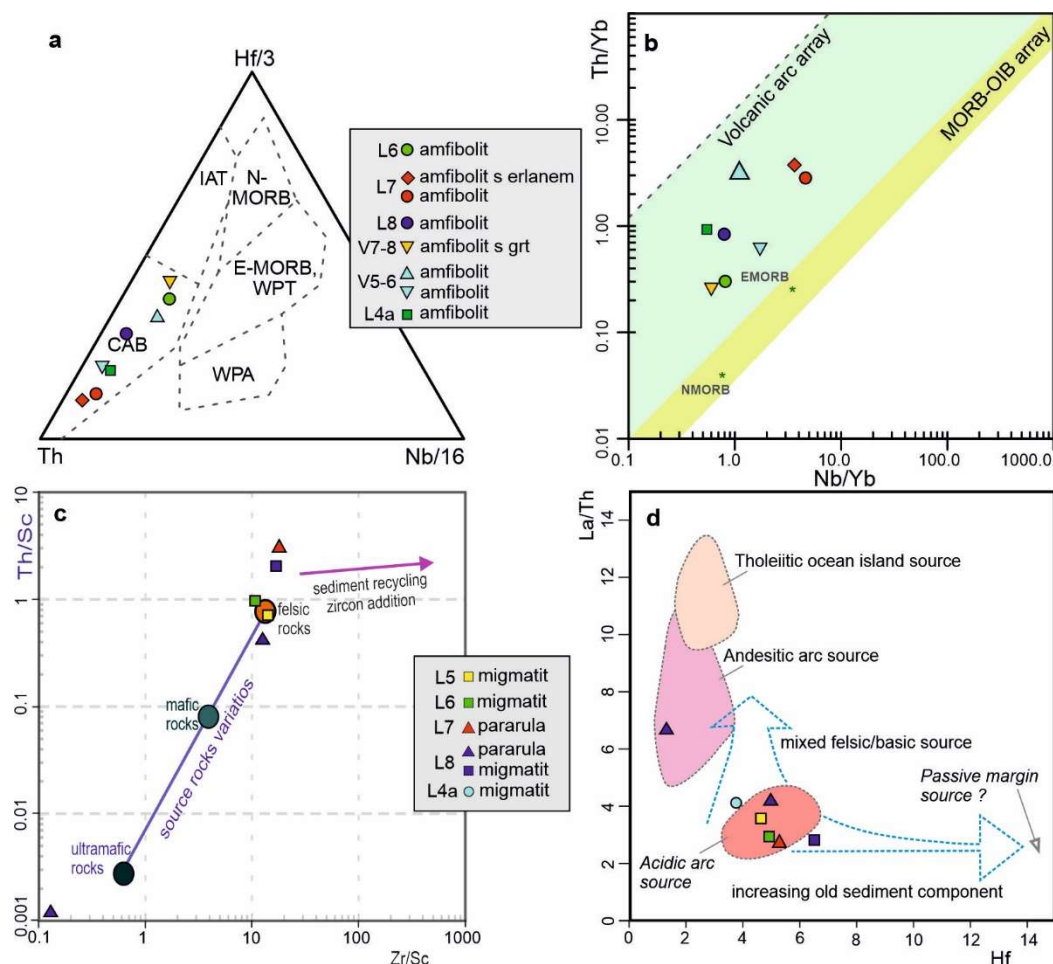
Detailní výsledky analýz jsou sepsány v tabulce (Elektronická příloha 9) a popsány ve čtvrté průběžné zprávě (Bukovská et al. 2025). Celkové výsledky jsou podobné hodnotám analýz z prostoru PVP Bukov (Bukovská et al. 2017). Většina analyzovaných karbonátů jsou kalcity, u pěti vzorků byl analyzován dolomit a u jednoho vzorku siderit. Kalcity z prostoru PVP Bukov II na základě mikrotermometrického měření plynokapalných uzavřenin nejlépe odpovídají hodnotám z porudního a pouranového stadia mineralizace, které bylo popsáno na ložisku Rožná (Kříbek a Hájek 2005). Obsahy Sr v karbonátech svědčí o jejich hydrotermálním původu. Na základě poměrů $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ lze předpokládat směsný zdroj z různých horninových typů vyluhovaných solankami. Tyto poměry jsou podobné hodnotám z ložiska Rožná (Kříbek a Hájek 2005). Původ roztoků je na základě hodnot $\delta^{18}\text{O}$ nejspíše v solankách sedimentárních bazénů. Hodnoty $\delta^{13}\text{C}$ pravděpodobně odpovídají uhlíku z hlubinného zdroje, u nižších minusových hodnot uhlíku organického původu, případně směsi uhlíků z více zdrojů. Naměřené hodnoty $\delta^{34}\text{S}$ v pyritech a pyrhotinech z prostoru PVP Bukov II odpovídají hodnotám sulfidů z pouranové křemen-karbonát-sulfidické mineralizace z ložiska Rožná (Kříbek et al. 2009, Kříbek a Hájek 2005) a dřívějším analýzám sulfidů v prostoru PVP Bukov (Bukovská et al. 2017).

2.4.3 Celohorninová geochemická charakteristika

Geochemické vlastnosti hornin PVP Bukov II byly studovány pracovníky České geologické služby. Celohorninové analýzy hlavních a stopových prvků byly provedeny v laboratořích Bureau Veritas Minerals (dříve Acme Analytical Labs Ltd) v Kanadě. Pro účely geochemické

charakteristiky bylo v průběhu projektu odebráno 7 metasedimentárních a 8 metavulkanických horninových vzorků, ve kterých byly stanoveny obsahy hlavních i stopových prvků (Elektronická příloha 10). Metodika analytických prací, zpracování dat a podrobný popis chemických charakteristik jednotlivých vzorků jsou uvedeny ve zprávách Bukovská et al. (2023, 2025) a Soejono et al. (2024).

Studované metavulkanické vzorky vykazují v základních rysech podobné geochemické parametry (Elektronická příloha 10) a až na vzorek amfibolitu s erlanem 296CGTT0037 reprezentují původně subalkalické, metaluminické bazaltické až andezitové lávy (Bukovská et al. 2023; Soejono et al. 2024). Drobné odchylky jsou nejspíše způsobené rozdíly v deformačním a metamorfním přetisku. Přibližně polovina vzorků má vápenato-alkalické složení a druhá polovina odpovídá spíše tholeitické sérii. Částečně odlišné složení vzorku 296CGT0009 nejspíše souvisí s předpokládanou limitovanou přítomností klastické komponenty v původně bazickém tuфу. Obsahy stopových prvků metavulkanických hornin na PVP Bukov II (Bukovská et al. 2025; Elektronická příloha 10) indikují jejich vznik v tektonickém prostředí magmatického oblouku (Obr. 14a, b).



Obr. 14 Geochemické diagramy definující tektonické prostředí a zdroje studovaných metavulkanických (a, b) a metasedimentárních (c, d) hornin: (a) ternární diagram Th–Hf/3–Nb/16 (Wood 1980), (b) diskriminační diagram Nb/Yb vs. Th/Yb (Pearce 2008), (c) Th/Sc vs. Zr/Sc diagram ilustrující recyklaci starších sedimentů (McLennan et al. 1993), (d) diskriminační diagram Hf vs. La/Th ukazující zdroje sedimentárního materiálu (Floyd a Leveridge 1987)

Až na výjimky (296CGT0010) mají studované metasedimentární horniny podobné obsahy jak hlavních, tak i stopových prvků (Elektronická příloha 10). Většina studovaných vzorků odpovídá původně nevytříděným pískovcům s nezralými zdroji klastického materiálu (Bukovská et al. 2023; Soejono et al. 2024). Drobné odchylky můžou být způsobeny rozdílným stupněm vytřídění, zvětráním minerálních komponent, vícenásobnou sedimentární recyklací nebo metamorfním přetiskem. Rozdílný stupeň parciálního tavení nemá na celkové složení výraznější vliv. Sekundární zvětrání je vzhledem k hloubce pod povrchem vyloučené. Pararula 296CGT0010 má oproti všem ostatním studovaným vzorkům odlišné chemické složení (Elektronická příloha 10) ukazující na výrazné zastoupení bazickou detritickou komponentou. Většina vzorků má mírně vyšší poměry Th/U než je průměrná hodnota svrchní kontinentální kůry (McLennan et al. 1993), což ukazuje spolu s obsahy Sc a Zr na relativně nízký podíl recyklovaného materiálu (Obr. 14c). Pro většinu vzorků byl detritus derivován z kyselých magmatických hornin kontinentálního magmatického oblouku (Obr. 14c, d), což odpovídá předpokládanému prostředí vzniku metavulkanických členů horninové asociace PVP Bukov II.

2.4.4 Oxidačně-redukční podmínky

Stanovení vývoje redoxního potenciálu a redukční kapacity horninového prostředí PVP Bukov II bylo provedeno pracovníky Masarykovy univerzity. Pro reprezentativní horninové vzorky byly provedeny laboratorní experimenty sledování spotřeby kyslíku rozpuštěného ve vodě, nově bylo analyzováno chemické složení šesti celohorninových vzorků a také bylo provedeno vyhodnocení oxidačně-redukčního potenciálu (Elektronická příloha 11). Tato data byla doplněna stávajícími chemickými analýzami vzorků hornin (Elektronická příloha 10) a podzemní vody (Elektronická příloha 13) a také terénními měření pH, měrné elektrické vodivosti, teploty a koncentrace rozpuštěného kyslíku (Elektronická příloha 12). Metodika analytických prací a zpracování dat a podrobný popis dat a výsledků jsou uvedeny ve zprávě Bukovská et al. (2025).

Redoxní potenciál hornin PVP Bukov II odpovídá přechodným až mírně redukčním podmínkám a je většinou řízený rovnováhou mezi dvojmocným železem v roztoku a hydroxidem železitým. V několika případech přechází kontrola redoxního potenciálu na redoxní pár mezi pyrit-síranové ionty. Kyslík rozpuštěný v podzemních vodách ovlivňuje redoxní potenciál horninového prostředí jen zprostředkovaně přes oxidaci redukovaných členů uvedených redoxních párů. Experimenty sledující interakci vody nasycené vůči atmosférickému kyslíku ukázaly, že amfibolit i pararula jsou vůči oxidaci velmi odolné. To odpovídá nízkému stupni zvětrávání hornin z ložiska Rožná. Redukční kapacita hornin se pohybuje kolem 1 000 mg O₂ na 100 g horniny, přičemž o redukční kapacitě hornin rozhoduje zejména obsah sulfidů a je výrazně modifikována zastoupením tmavých minerálů obsahujících dvojmocné železo. Mangan se podílí na redukční kapacitě hornin nejméně. V rámci PVP Bukov II mají nejvyšší redukční kapacitu pararuly (sulfidická síra) a amfibolity (vysoký obsah dvojmocného železa). Nižší redukční kapacitu má migmatit a migmatizovaný amfibolit.

2.5 Hydrogeologická charakterizace

Hydrogeologická charakterizace byla prováděna pracovníky České geologické služby, hydrogeologický monitoring pak pracovníky SG Geotechnika. V průběhu ražby chodeb a komor PVP Bukov II od počátku roku 2021 probíhala hydrogeologická dokumentace průsaků/přítoků podzemní vody do ražených děl. Celkem zde bylo zdokumentováno 40 průsaků/přítoků (Obr. 15). Dalších deset dokumentovaných bodů leží mimo vlastní PVP Bukov II ve spojovacích chodbách PŠ1-123 a BZ-XIIS. Alespoň jedenkrát za rok byly veškeré průsaky v prostoru PVP Bukov II revidovány (od počátku roku 2023). Poslední revize proběhla v listopadu 2024.

Z vydatnějších přítoků byly odebírány vzorky podzemní vody pro základní dokumentační analýzy (ZDA, dle projektu prací Bukovská et al. 2021). Z průsaků/přítoků, jejichž vydatnost to umožňovala, byly dále odebrány vzorky pro stanovení obsahů stopových prvků, radioaktivity vod a celkového obsahu organického uhlíku. Celkem bylo v rámci dokumentace odebráno 44 vzorků podzemních vod pro analýzy. Významné přítoky (viz Bukovská et al. 2025, Elektronická příloha 12) byly vzorkovány opakovaně. Do uvedeného počtu jsou zahrnuty odběry v rámci pravidelného monitoringu odebírané v rámci hydrogeologické dokumentace chodeb.

Za účelem studia původu a stáří podzemní vody byly odebírány vzorky z 8 objektů. Šest objektů se nachází přímo v prostorech PVP Bukov II, nicméně pro nedostatek vhodných objektů a pro účely srovnání byly odebírány i 2 objekty ležící mimo PVP Bukov II. Jednorázově byly u všech objektů odebrány vzorky pro určení stáří radiokarbonovou metodou a analýzu obsahu tritia ^3H . Pokud to okolnosti dovolily, byly opakovaně odebírány vzorky na analýzu stabilních izotopů H, O, S, a C. Celkem bylo z těchto objektů odebráno 15 vzorků na stabilní izotopy. U tří objektů byly stanoveny obsahy freonů a SF_6 .

V šesti vybraných vrtech byly provedeny vodní tlakové zkoušky (VTZ). Bylo proměřeno 13 intervalů o celkové délce 219 m.

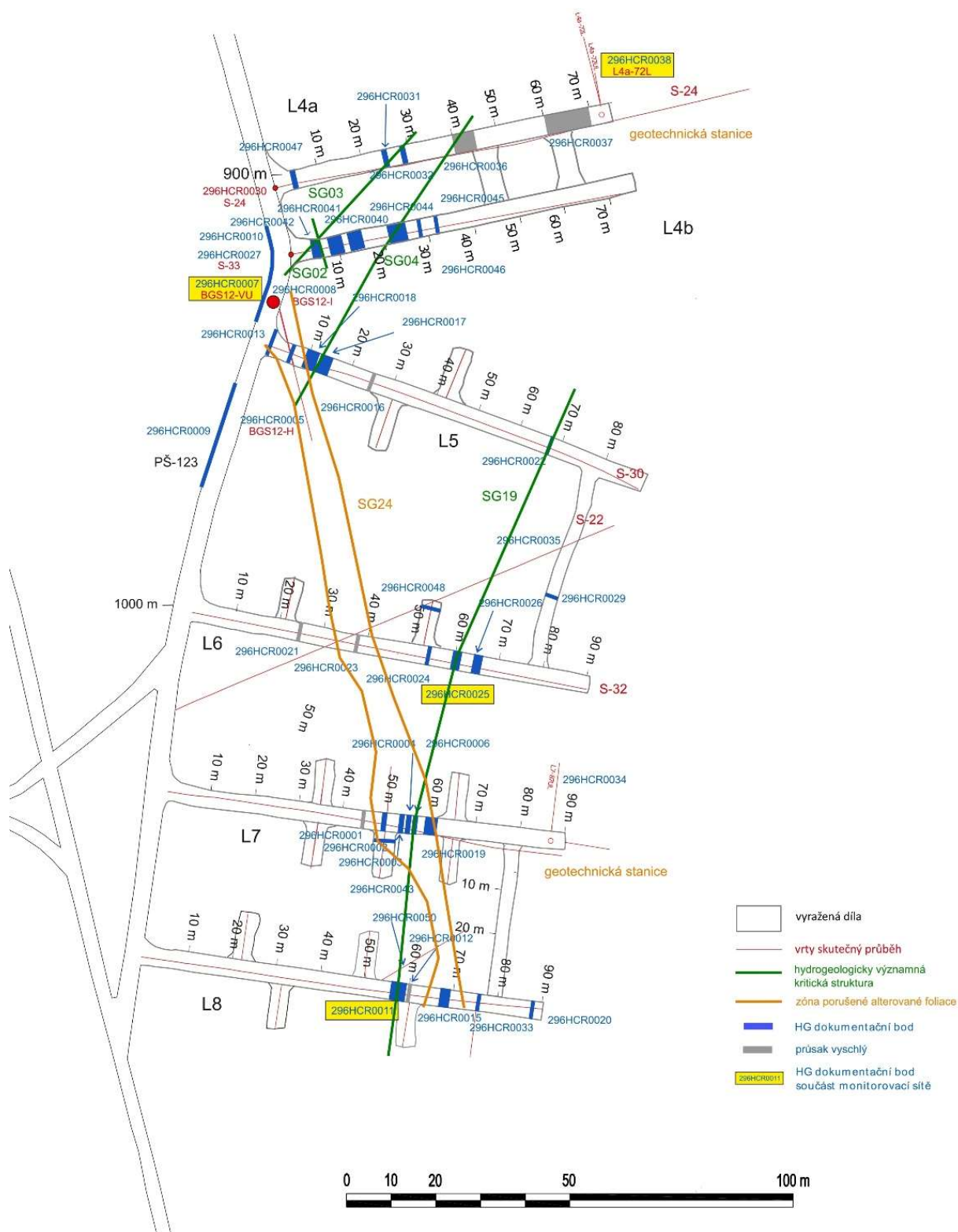
Metodika prací, charakteristika přítoků, výsledky měření a chemických analýz jsou podrobně popsány v průběžných zprávách projektu (Bukovská et al. 2021, 2022, 2023; Soejono et al. 2024) a uvedeny v přílohách (Elektronická příloha 12, Elektronická příloha 13, Elektronická příloha 14).

2.5.1 Přítoky podzemní vody do PVP Bukov II

Míra zvodnění podzemí v prostoru PVP Bukov II je velmi nízká. V chodbách a zkušebních komorách se nevyskytují žádné vydatné přítoky podzemních vod. Většina průsaků do chodeb má charakter vlhnutí stěn s občasnými úkapy. Nejvyšší měřitelné vydatnosti průsaků a výtoků z vrtů v prostoru PVP Bukov II se pohybovaly v jednotkách ml.s^{-1} .

Rozsah a míra zvodnění se u jednotlivých přítoků s časem měnily. V průběhu výstavby byly průsaky ve velké míře ovlivněny způsobem větrání a probíhajícími technickými pracemi. K šíření vlhkosti od primárních zdrojů (zlom) docházelo zejména po foliačních plochách, lokálně reaktivovaných, a po menších puklinách otevřených ražbou. Řada průsaků oddělených při primární dokumentaci se postupně spojila do prakticky souvislých, slabě zvodněných úseků. Některé průsaky vyschly zcela nebo se při opakovaných revizních dokumentacích projevovaly pouze náznakem vlhkosti (na Obr. 15 jsou vyznačeny šedou barvou). Jednalo se

o přítoky z izolovaných puklinových systémů bez napojení na významnější vodivou strukturu nebo oddělené od nadložních struktur zlomem s izolační funkcí (např. zadní část chodby L4a).



Obr. 15 Pozice průsaků/přítoků podzemní vody a hydrogeologicky významných struktur v PVP Bukov II

Téměř všechny významné přítoky do prostoru PVP Bukov II jsou vázané na průběžné kritické struktury. Z nich je z hydrogeologického hlediska nejvýznamnější zlom SG19 směru SSV–JJZ, který protíná chodby L5 až L8 (Obr. 15). Na tomto zlomu leží nejvydatnější přítoky v rámci PVP Bukov II – d. b. 150HCR0011 (chodba L8) a 296HCR0025 (chodba L6) zařazené do monitoringu a dále vydatnější průsak 296HCR0006 v chodbě L7. V chodbě L5 se zlom SG19 projevuje pouze jako slabé vlhnutí v bezprostředním okolí zlomu (d. b. 296HCR0022). Zlom SG19 současně dokumentuje nehomogenitu proudění podzemní vody podél struktur. K toku vody nedochází v celé ploše zlomu, převažují lokální cesty v místech s větší propustností.

V chodbách L4a a L4b jsou větší přítoky vázány na zlomy SG03 (Obr. 16) a SG04 (Obr. 17) směru SV–JZ (Obr. 15). Zlom SG03 působí jako izolátor, k proudění podzemní vody dochází v jeho blízkém okolí, na otevřených puklinách a foliacích (d. b. 296HCR0031, 296HCR0032, 296HCR0041). I zde se projevuje rozdílný rozsah proudění v různých částech zlomu. V chodbě L4a je dosah zvodnění od zlomu cca 5 m, v chodbě L4b pouze 1,5 m. Zlom SG04 má také funkci izolátoru, který v závislosti na pozici vůči chodbě a na křížení s dalšími izolátory odděluje část chodby L4a od dalších vodivých struktur nebo je naopak cestou nejvydatnějšího průsaku do chodby L4b (d. b. 296HCR0044). V chodbě L5 zlom SG04 odděluje průsaky d. b. 296HCR0017 a 296HCR0018.



Obr. 16 Intenzivní zvodnění v okolí zlomu SG03 v chodbě L4a – cca 28 až 32 m



Obr. 17 Průsaky v okolí zlomu SG04 v chodbě L4b – cca 22 až 26 m

Z hlediska proudění podzemních vod jsou významné také zóny reaktivovaných (SG02) nebo porušených alterovaných foliací (SG24). Tyto zóny působí jako komunikační cesty mezi zlomy a okolním horninovým prostředím a zvyšují míru hydraulického propojení průběžných struktur. Zdrojem všech průsaků/přítoků v chodbě L7 je pravděpodobně zlom SG19. V chodbě zlom SG19 kříží zóna porušených alterovaných foliací indikovaná geofyzikálním měřením (Obr. 15; Chabr et al. 2021). Zvodnění je vlivem této zóny patrné v úseku dlouhém 17 metrů.

2.5.2 Chemické složení podzemních vod

Analytické práce byly realizovány v laboratořích Aquatest, Praha a ALS Czech Republic, Praha, odběry a interpretace zajistili pracovníci České geologické služby.

PVP Bukov II se v rámci dolu Rožná nachází v zóně výskytu podzemních vod s převahou sodíku. Podzemní vody jsou zde typu Na-HCO₃ až Na-SO₄, převládají smíšené typy vod (Na-HCO₃-SO₄, Na-SO₄-HCO₃). Poměrné zastoupení sodíku přesahuje 85 meq% u všech odebraných vzorků (Obr. 18). V obsazích aniontů v podzemní vodě jsou rozdíly vyšší, u hydrogenuhličitanů se poměrné zastoupení pohybuje mezi 30 a 60 meq%, u síranů od 25 do 55 meq %. Výjimkou je pouze vzorek odebraný na chodbě BZ-XIIS z vrtu S-26 (d. b. 296HCR0039, mimo prostor PVP Bukov II) a vzorek odebraný čerpáním z vrtu L8-54DL (chodba L8, d. b. 296HCR0050) s výraznou převahou hydrogenuhličitanů mezi anionty (81 meq%). Poměrné zastoupení chloridů je u všech vzorků mezi 10 a 20 meq%.

Vzájemný podíl síranů a hydrogenuhličitanů postihuje míru ovlivnění podzemních vod odpovídající hloubkové úrovni (typ Na-HCO₃) a jejich posun k silně ovlivněným důlním vodám (typ Na-SO₄). V prostoru chodeb L7 a L8 je ovlivnění podzemních vod oxidačním prostředím dolu nižší. Vyšší zastoupení hydrogenuhličitanů je také u vzorků odebraných z vrtů, které dosahují do větší vzdálenosti od stěn chodeb do nasyceného nebo převážně nasyceného horninového prostředí.

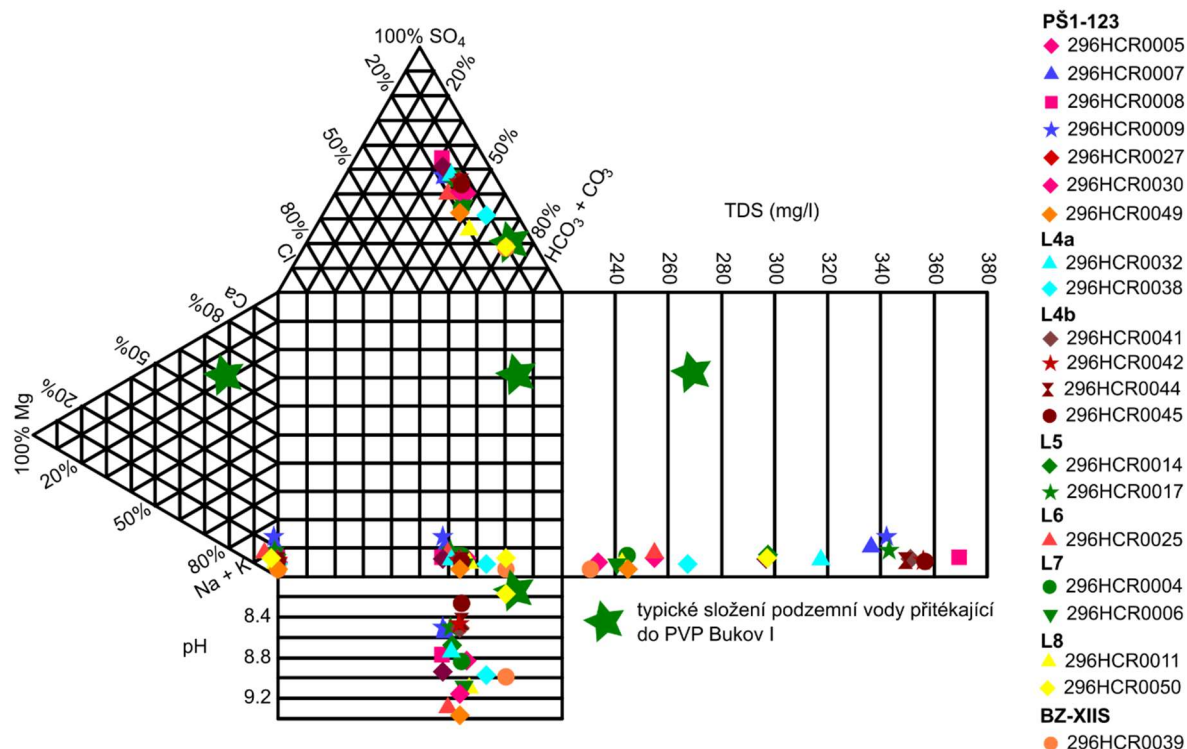
Celkový obsah rozpuštěných látek (TDS) je v rozmezí od 200 do 370 mg.l⁻¹. I přes poměrně vysokou hloubku výskytu pod terénem se jedná o slabě mineralizované vody. Podzemní vody mají zásaditý charakter, pH je v rozmezí 8,4 až 9,2. Obsahy SiO₂ se u vzorkovaných bodů pohybují v rozmezí od 11 do 16 mg.l⁻¹.

V odebraných vzorcích se nevyskytují žádné extrémní obsahy stopových prvků, organického uhlíku ani zvýšená radioaktivita vod. U přítoků vázaných na zlom SG19 byly zjištěny u některých odběrů zvýšené obsahy arzenu, železa, hliníku a chromu ve srovnání s ostatními vzorkovanými přítoky. Vyšší hodnoty barya (20 až 65 µg.l⁻¹) a stroncia (80 až 200 µg.l⁻¹) byly zaznamenány u výtoků z vrtů projektu Získání dat z hlubokých horizontů dolu Rožná (Bukovská et al. 2020) ústících na hlavní chodbě PŠ1-123 a také z průsaků na této chodbě. Zdroj těchto zvýšených obsahů je pravděpodobně mimo oblast PVP Bukov II. Ve vzorcích hornin a v analýzách žilných karbonátů PVP Bukov II byly lokálně zjištěny zvýšené obsahy těchto prvků.

Z vydatnějších průsaků/přítoků do PVP Bukov II byly vzorky podzemní vody odebírány opakovaně. Poměrné zastoupení hlavních iontů ve vzorkovaných vodách se v průběhu výstavby příliš nezměnilo. Pro vzorky odebírané s větším odstupem od primární dokumentace je typický vyšší obsah rozpuštěných látek, nejvyšší nárůsty se pohybovaly kolem 50 mg.l⁻¹. Nárůsty TDS jsou způsobeny vyššími obsahy zejména hydrogenuhličitanů, síranů, sodíku a SiO₂. V absolutních hodnotách se zvýšení obsahů jednotlivých iontů pohybuje do 10 mg.l⁻¹, u hydrogenuhličitanů je nárůst do 30 mg.l⁻¹.

V diagramu na Obr. 18 je zelenou hvězdičkou vyznačeno typické chemické složení podzemních vod prosakujících do PVP Bukov I. Z obrázku je zřejmé, že přestože obě PVP leží na 12. patře dolu, nacházejí se v rozdílných hydrochemických zónách. PVP Bukov I spadá do hydrochemické zóny Ca-HCO₃, PVP Bukov II do hydrochemické zóny Na-HCO₃. V PVP Bukov II tedy prosakují podzemní vody z hlubší zóny. Míra ovlivnění podzemních vody

prostorem dolu (posun k důlním vodám typu Na-SO₄) je vyšší v PVP Bukov II. Ovlivnění se projevuje zejména vyššími obsahy síranů, celkový obsah rozpuštěných látek zůstává poměrně nízký do 370 mg.l⁻¹. Antropogenně ovlivněné (důlní vody) dolu Rožná typu Na-SO₄ mají průměrnou hodnotu TDS 755 mg.l⁻¹, s maximem 2020 mg.l⁻¹ (Bukovská et al. 2017).



Obr. 18 Durovův diagram chemického složení podzemních vod v PVP Bukov I a II

2.5.3 Stáří a původ podzemních vod

Stáří a původ vod byly stanoveny v následujících laboratořích: Laboratoře ČGS, Praha-Barrandov (stabilní izotopy H, C, O, S), Přírodovědecká fakulta UK, Praha (tritium), Poznanské Laboratorium Radioweglove, Polsko (radiohlík) a H. Oster, Německo (freony), odběry a interpretace zajistili pracovníci České geologické služby.

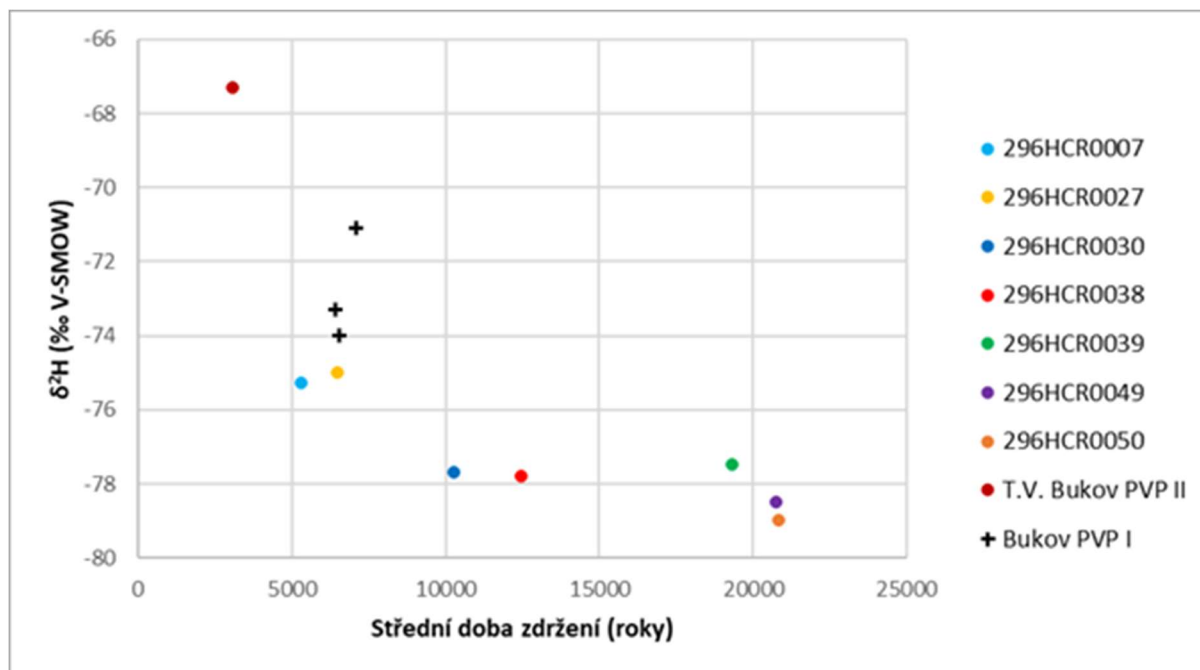
Stabilní izotopy H a O, vyjádřeny jako $\delta^2\text{H}$ (nebo δD) a $\delta^{18}\text{O}$, odrážejí teploty, při kterých byly precipitovány srážky, které byly následně infiltrovány a vstoupily do horninového prostředí. Hodnoty $\delta^2\text{H}$ a $\delta^{18}\text{O}$ se v grafu obvykle promítají na přímku GMWL (global mean water line). Pozice bodu na této přímce odpovídá teplotě, při které došlo v atmosféře k precipitaci a také izotopickému složení dané oblačnosti. Pro povrchové prameny na lokalitě Rožná je průměrná roční hodnota $\delta^{18}\text{O}$ kolem -10,4 ‰ (V-SMOW) (Bukovská et al. 2017). V PVP Bukov II byly zaznamenány podzemní vody s obsahy $\delta^{18}\text{O}$ nižšími (kromě T.V. Bukov II – vzorku technické vody odebraném z řadu v L6), dosahujícími až -11,2 ‰, což odpovídá teplotám cca o 1 °C nižším. Voda tedy byla součástí srážek v chladnějším klimatu. Zatímco v PVP Bukov I dosahuje $\delta^2\text{H}$ průměrné hodnoty -73,2 ‰ (V-SMOW) (Bukovská et al. 2017), v PVP Bukov II dosahuje -77,3 ‰ (V-SMOW). $\delta^2\text{H}$ v PVP Bukov II nabývá hodnot mezi -79 ‰ (V-SMOW) a -74,9 ‰ (V-SMOW). $\delta^{18}\text{O}$ v PVP Bukov II nabývá hodnot mezi -10,4 ‰ (V-SMOW) a -11,2 ‰ (V-SMOW) s průměrem -10,95 ‰ (V-SMOW). Hodnoty $\delta^2\text{H}$ a $\delta^{18}\text{O}$ se tedy mezi PVP Bukov I a PVP Bukov II liší (Graf 1 v Elektronická příloha 14).

Hodnoty $\delta^{34}\text{S}$ odpovídají izotopickému složení síranů v podzemní vodě. Toto složení závisí na izotopickém složení primárních sulfidů, které v přítomnosti kyslíku podléhají oxidaci, přičemž se do podzemní vody uvolňují sírany. Izotopické složení síranů ve vodách v PVP Bukov II přímo odpovídá střednímu izotopickému složení sulfidů, které byly identifikovány v prostoru PVP Bukov II. Ve sledovaných objektech na PVP Bukov II se hodnoty $\delta^{34}\text{S}$ pohybovaly v rozmezí -3,1 ‰ (CDT) a 2,6 ‰ (CDT) s průměrem -0,54 ‰ (CDT). Ve vodách lze vysledovat trend poklesu hodnoty $\delta^{34}\text{S}$ se vzrůstajícím obsahem SO_4^{2-} (Graf 2 v Elektronická příloha 14). Z opakovaných analýz je zjevné, že v rámci jednoho objektu se může obsah síranů a $\delta^{34}\text{S}$ lehce měnit. V monitorovaných objektech hodnota $\delta^{34}\text{S}$ slabě stoupá, zatímco obsah SO_4^{2-} může klesat (296HCR0027 a 296HCR0038), ale i vzrůstat (296HCR007). Tento různorodý vývoj může být způsoben rozdílným vývojem mikrobiomu v každém objektu, dostupností kyslíku v prostředí nesaturované zóny, složením primárních sulfidů či mísením s vodou z jiného zdroje.

Obsah $\delta^{13}\text{C}$ (DIC – dissolved inorganic carbon) v podzemní vodě nabývá hodnot -17,5 ‰ (V-PDB) až -13,2 ‰ (V-PDB), s průměrem -15,1 ‰ (V-PDB). Tyto obsahy odpovídají reakci mezi rozpuštěným půdním CO_2 (s dohodou obvykle nižší než -25 ‰ (V-PDB) a původně mořskými karbonáty s hodnotami kolem 0 ‰ (V-PDB). $\delta^{13}\text{C}$ karbonátů v PVP Bukov II dosahuje hodnot -3,58 až -14,1 ‰ (V-PDB), přičemž střední obsah se pohybuje kolem -5 ‰ (V-PDB). V rámci dolu Rožná byly zaznamenány nižší hodnoty $\delta^{13}\text{C}$ (V-PDB) spíše na nižších patrech (-22,3 ‰ na 24. patře), kde se vyskytují vody typu Na- HCO_3 až Na-Cl. Hodnoty $\delta^{13}\text{C}$ jsou nepřímo úměrné obsahu Na^+ (Graf 3 v Elektronická příloha 14), Cl^- a Li^+ a přímo úměrné obsahu HCO_3^- . Rozdílné hodnoty $\delta^{13}\text{C}$ ve vodách tedy mohou kromě mísení s antropogenně ovlivněnými vodami odrážet hloubkovou chemickou stratifikaci podzemních vod na lokalitě.

Z datování podzemní vody 4 objektů v PVP Bukov I podle ^{14}C vychází minimální střední doba zdržení $6\,410 \pm 40$ let a maximální střední doba zdržení $7\,100 \pm 50$ let (Bukovská et al. 2017). Oproti tomu byl v PVP Bukov II a okolí zjištěn větší rozptyl střední doby zdržení, kdy minimální střední doba zdržení je $5\,310 \pm 40$ let, maximální střední doba zdržení je $20\,870 \pm 130$ let. Obsah tritia (^3H) je nepřímo úměrný střední době zdržení vody (Graf 4 v Elektronická příloha 14) a naznačuje, že střední doba zdržení je ovlivněna mísením s moderní vodou, která byla infiltrována maximálně v 50. letech 20. století. Ze srovnání hodnot $\delta^2\text{H}$ (‰ V-SMOW) a střední doby zdržení vod v PVP Bukov II vyplývá nepřímá úměra, „starší“ vody dosahují nižších hodnot $\delta^2\text{H}$, voda z objektů 296HCR0030, 296HCR0038, 296HCR0039, 296HCR0049 a 296HCR0050 byla tedy zřejmě infiltrována v chladnějším klimatu, zatímco 296HCR0007 a 296HCR0027 spíše odpovídá mísení s moderní vodou (Obr. 19). Negativní korelace mezi střední dobou zdržení podle ^{14}C a obsahem SO_4^{2-} ukazuje, že voda s nižší dobou zdržení má vyšší obsah SO_4^{2-} (Graf 5 v Elektronická příloha 14). V případě objektů 296HCR0030 a 296HCR0038 a především 296HCR0007 a 296HCR0027 by se mohlo jednat o vliv mísení s technickou vodou využívanou při pracích v PVP Bukov II (T.V. Bukov II), nebo o mísení s vodou z vyšších pater dolu Rožná.

Vzorky vody na analýzu freonů a SF_6 byly odebrány z objektů 296HCR0027, 296HCR0038 a 296HCR0039. Zatímco v objektu 296HCR0039 byly obsahy freonů pod detekčním limitem, v objektech 296HCR0027 a 296HCR0038 byly obsahy freonů a SF_6 slabě zvýšeny. To může být způsobeno mísením s moderní vodou, což by také naznačovalo jejich nižší dobu zdržení podle ^{14}C (zvláště u objektu 296HCR0027).



Obr. 19 Závislost obsahu δ^2H na střední době zdržení dle ^{14}C . Data pro PVP Bukov I jsou převzata z Bukovská et al. (2017)

2.5.4 Hydraulické vlastnosti hornin

Vodní tlakové zkoušky (VTZ) charakterizovaly hydraulické parametry (především hydraulickou vodivost) porušené horniny v blízkosti chodeb PVP Bukov II i hydraulické parametry potenciálně neporušené horniny masivu. V roce 2022 byly provedeny vodní tlakové zkoušky na vrtech L7-35P (horizontální, 10,49 m), L7-50P (horizontální, 10,78 m), L7-87D (vertikální, 50,6 m) a L8-54DL (ukloněný pod úhlem 44°, 30,3 m). V roce 2023 byly provedeny vodní tlakové zkoušky na vrtech S-33 (horizontální; délka 75,5 m), L4-73D (vertikální; délka 50,5 m) a L8-54DL (ukloněný pod úhlem 44°; délka 30,3 m).

Při měření v nížce propustném prostředí PVP Bukov II byly využity 2 aparatury. První z nich využívá pro injektáž měřicího média laboratorní HPLC čerpadlo. Druhá aparatura je založena na patentovaném řešení ČGS, kdy je pro detekci injektovaného průtoku využito principu vážení hmotnostního úbytku injektované kapaliny ze zásobníku – expanzní nádoby, která zajišťuje konstantní tlakovou úroveň injektáže.

K měření byly využity dvě metody:

- Metoda s konstantním průtokem. U této metody bylo k injektování vody do měřeného intervalu využito HPLC čerpadlo, které vtláčelo vodu o konstantním průtoku do měřeného intervalu, zatímco byl monitorován nárůst tlaku.
- Metoda s konstantním tlakem. U této metody byla jako zdroj injektované vody využita expanzní nádoba naplněná vodou při známém tlaku. Hmotnost expanzní nádoby byla pravidelně měřena pro zjištění průtoku vody vtláčené do měřeného intervalu, nebo v případě, že byl v expanzní nádobě nižší tlak než v měřeném intervalu, pro zjištění průtoku vody proudící z měřeného intervalu. Zároveň byl monitorován tlak vody v expanzní nádobě. Konstrukce expanzní nádoby umožňuje vtláčování vody, která je provázena v určitém rozsahu průtoků zanedbatelným poklesem tlaku vody během

měření, a je tedy vhodná pro dlouhá měření v prostředí s minimální hydraulickou vodivostí.

Při měření hydraulické vodivosti byly sledovány a kontinuálně zaznamenávány dva parametry – průtok a injektážní tlak měřicího média (vody), přičemž jedna z těchto veličin byla udržována na konstantní úrovni.

Měření bylo prováděno s jedním pakrem s proměnlivou délkou měřeného úseku a následným postupem směrem dolů. Využití jednoduchého pakru je výhodné pro snazší manipulaci s výstrojí ve vrtu a snižuje se riziko problémů s netěsností pakru ve vrtu. Čím je celkově VTZ aparatura jednodušší a obsahuje méně součástí a spojů, tím je nižší riziko technických problémů při manipulaci s aparaturou i při měření.

Ze získaných dat průtoku a tlaku byla vyhodnocena transmisivita T metodou dle Moye (1967) pomocí rovnice

$$T = \frac{Q}{\Delta P} * \frac{1 + \ln(L/d)}{2\pi} \quad (1),$$

kde Q je ustálený průtok injektovaného média do testovaného intervalu vrtu nebo proudící z testovaného intervalu během VTZ, ΔP je rozdíl zvýšené ustálené tlakové úrovně během VTZ a přirozené hydrostatické úrovně tlaku v testovaném intervalu, L je délka měřeného intervalu a d je průměr vrtu.

V Tab. 2 jsou uvedeny transmisivity a odvozené hydraulické vodivosti intervalů v zájmových vrtech. Detailněji je metodika prací popsána ve zprávách Bukovská et al. (2023) a Soejono et al. (2024).

Tab. 2 Hydraulická transmisivita (T) a hydraulická vodivost (K) v měřených intervalech

Interval	$T \text{ (m}^2 \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$	$K \text{ (m} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$
S-33 (15–75,5)	$1,6 \cdot 10^{-8}$	$2,6 \cdot 10^{-10}$
S-33 (2–15)	$4,9 \cdot 10^{-8}$	$3,8 \cdot 10^{-9}$
L4-73D (33–50,5)	$6,5 \cdot 10^{-11}$	$3,7 \cdot 10^{-12}$
L4-73D (2–17)	$9,7 \cdot 10^{-10}$	$6,5 \cdot 10^{-11}$
L4-73D (17–33)	$1,2 \cdot 10^{-9}$	$7,8 \cdot 10^{-11}$
L8-54DL (11–20)	$4,6 \cdot 10^{-9}$	$5,1 \cdot 10^{-10}$
L8-54DL (1–11)	$3,0 \cdot 10^{-9}$	$3,0 \cdot 10^{-10}$
L8-54DL (20–30,3)	$2,0 \cdot 10^{-9}$	$2,0 \cdot 10^{-10}$
L7-35P (0,75–10,49)	$4,7 \cdot 10^{-10}$	$4,8 \cdot 10^{-11}$
L7-50P (1,26–10,78)	$4,9 \cdot 10^{-10}$	$5,1 \cdot 10^{-11}$
L7-87D (2–20)	$2,9 \cdot 10^{-11}$	$1,6 \cdot 10^{-12}$
L7-87D (20–35)	$5,3 \cdot 10^{-12}$	$3,5 \cdot 10^{-13}$
L7-87D (35–50,6)	$8,4 \cdot 10^{-12}$	$5,4 \cdot 10^{-13}$

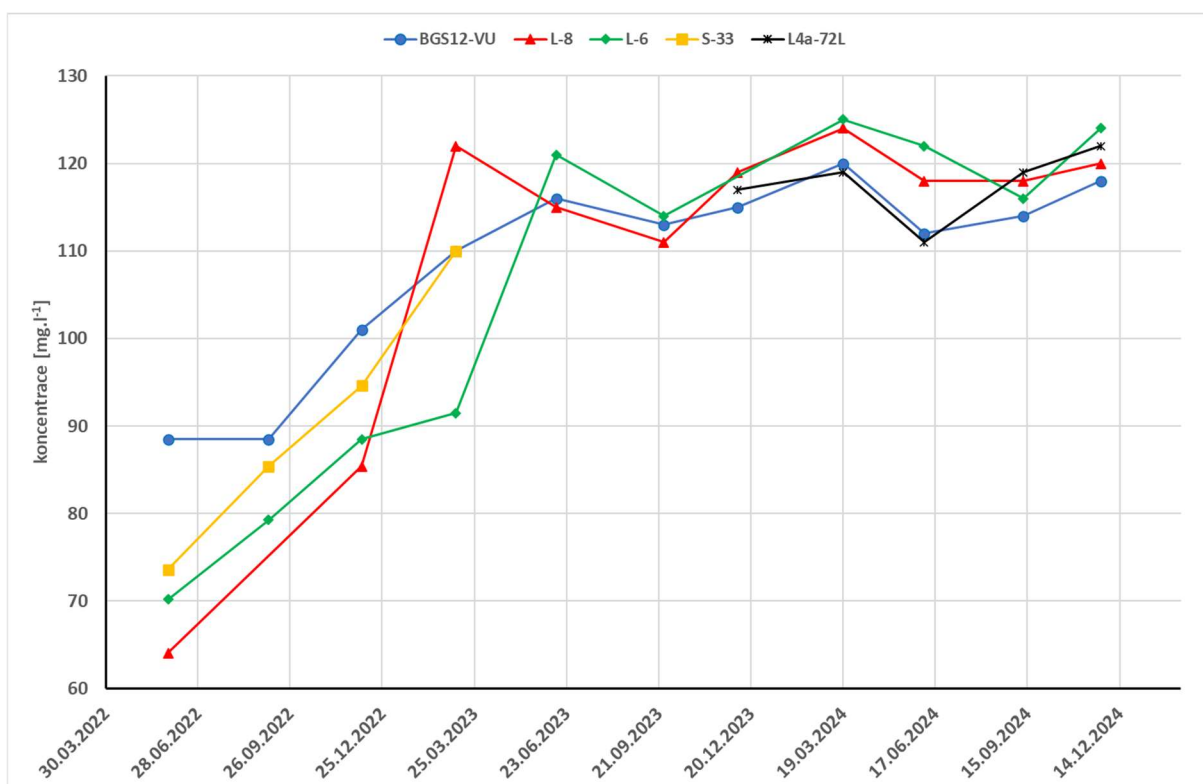
Naměřené hydraulické vodivosti ve vrtech v PVP Bukov II jsou v rozsahu od $3,5 \cdot 10^{-13} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ do $3,8 \cdot 10^{-11} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ s průměrem $3,9 \cdot 10^{-11} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Tyto hodnoty jsou výrazně nižší než hydraulické vodivosti změřené v rámci projektu Výzkum puklinové konektivity v PVP Bukov I v rozsahu od hodnot nižších než $8,8 \cdot 10^{-11} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ do $2,0 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ s průměrem

$1,9 \cdot 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, respektive $5,3 \cdot 10^{-9} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ v případě započítání hodnot nižších než spodní limita měření (Zuna et al. 2024). Hydraulická vodivost porušené horniny v PVP Bukov II je tedy přibližně o dva řády nižší než v PVP Bukov I.

2.5.5 Hydrogeologický monitoring

Hydrogeologický monitoring zajistili pracovníci SG Geotechnika, analytické práce probíhaly v laboratoři Aquatest a ALS Czech Republic v Praze. V rámci hydrogeologického mapování byly k pravidelnému čtvrtletnímu sledování vybrány celkem čtyři přítoky. Jedná se o přítoky z poruchových zón v chodbách L6 ve staničení 60 m a L8 ve staničení 57 m a přítoky z vrtů BGS12-VU a S-33, které jsou zachyceny v mapě na obrázku (Obr. 15). Hydrogeologický monitoring PVP Bukov II byl zahájen v první polovině roku 2022 měření přítoků z poruchových zón v chodbách L6 a L8. Z důvodu ražby chodby L4b byl v květnu 2023 vrt S-33 zrušen. V listopadu 2023 byl naopak do monitoringu přidán vrt L4a-72L.

Z výsledků měření průtoků je patrné, že v L6 se přítok (úkap) pohyboval mezi $0,1$ a $1,2 \text{ ml} \cdot \text{s}^{-1}$ a v L8 mezi $0,1$ a $1,6 \text{ ml} \cdot \text{s}^{-1}$. Přítok z vrtu BGS12-VU se pohyboval mezi $0,8$ a $3,9 \text{ ml} \cdot \text{s}^{-1}$, z vrtu S-33 mezi $1,8$ a $20,0 \text{ ml} \cdot \text{s}^{-1}$ a z L4a-72L $3,3$ a $5,2 \text{ ml} \cdot \text{s}^{-1}$. Ve vrtech S-33 a BGS12-VU byl patrný vliv ražby chodeb důlního díla, který se projevoval poklesem průtoku.



Obr. 20 Obsah hydrogenuhličitanů v monitorovaných vodách PVP Bukov II

Odběry vod byly realizovány pravidelně po čtvrt roce. Během odběrů byly měřeny fyzikálně-chemické vlastnosti vod. V rámci monitoringu probíhala komplexní chemická analýza, která se skládala ze základní dokumentační analýzy, stanovení stopových prvků a forem uhlíku. Stanovení radioaktivních látek probíhalo jednou ročně. Všechny analýzy jsou obsahem samostatné elektronické přílohy (Elektronická příloha 15). Z výsledků stanovení hlavních iontů a fyzikálně-chemických vlastností je patrné, že všech pět monitorovaných přítoků mělo

podobné vlastnosti a trend vývoje parametrů v čase. Nejmarkantnější byl průběžný pokles pH a nárůst hydrogenuhličitanů (Obr. 20).

2.6 Transportní vlastnosti

Transportní vlastnosti byly stanoveny ÚJV Řež, a.s. Na základě požadavku byly pro transportní parametry vybrány vzorky ze dvou rozdílných litologií: amfibolitu a biotitického migmatitu z chodby L5 z PVP Bukov II. Práce byly zaměřeny na difúzní experimenty pro stanovení difúzního efektivního koeficientu D_e (^3H , ^{36}Cl) a stanovení rozdělovacího (sorpčního) distribučního koeficientu K_d (^{137}Cs , ^{86}Sr) a na srovnání transportních charakteristik hornin vybraných vzorků amfibolitu a migmatitů. Metodika a detailní postupy jsou podrobněji popsány ve čtvrté průběžné zprávě (Bukovská et al. 2025).

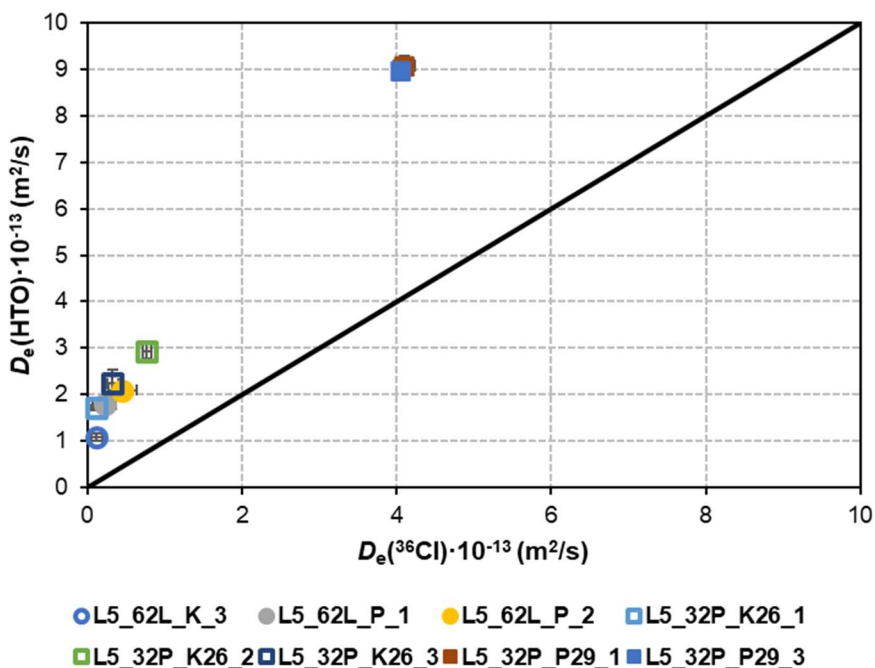
Studované horninové vzorky L5-32P-P29 a L5-32P-K26 je možné popsat jako amfibolity s masivní texturou, drobnozrnné až jemnozrnné. Základní hmota studovaných výbrusů je tvořena převážně amfibolem (46–55 hm. %), dále plagioklasem (36–43 hm. %) a menším množstvím křemene (8–10 hm.%). Amfibol bývá místy v asociaci s biotitem (0,2–0,6 hm. %), s minoritním zastoupením chloritu (~1,5 hm.%). Vzorky L5-62L-P-3 a L5-62L-K-3 jsou charakterizovány jako biotitický migmatit s páskovanou texturou, jemnozrnný až drobnozrnný. Základní hmota studovaných výbrusů je křemen-živcová (plagioklas 47–56 hm. %, křemen 29–32 hm. %) s paralelně uspořádanými pásy, které jsou tvořeny biotitem (11–28 hm.%). V této základní hmotě se vyskytují rozpadlá zrna granátu (0,5–1 hm. %), která jsou již z velké míry nahrazena biotitem, který místy podléhá přeměně na chlorit (~ 0,7 hm). Amfibolit je tvořen dominantním podílem amfibolu a plagioklasu, s efektivní pórovitostí (0,37–0,81 %) a hustotou přibližně 2941 kg/m³ (stanoveno gravimetricky, viz Havlová et al. 2018). Naproti tomu biotitický migmatit s páskovanou strukturou obsahuje vyšší podíly biotitu a křemene. Efektivní pórovitost migmatitu se pohybuje mezi 0,2–1,09 % a hustota kolem 2709 kg/m³. U vzorků studovaných hornin byly naměřeny velmi nízké hodnoty CEC, což je způsobeno jejich složením a výraznou absencí minerálů s vysokým obsahem vyměnitelných kationtů (např. sekundární jílové minerály). Mezi frakcemi C a D u obou materiálů jsou pozorovány pouze minimální rozdíly. Naměřené hodnoty CEC se pohybovaly mezi 0,25–0,30 meq/100 g (AAS-Cu). U všech vzorků je vápník dominantním uvolněným kationtem, následně Na⁺, K⁺ a Mg⁺. Nízké hodnoty byly naměřeny i v případě specifického povrchu stanoveného pomocí Kr (BET; 0,087–0,219 m²/g).

2.6.1 Difuzní experimenty

Difuzní efektivní koeficient (D_e) byl určen metodou difúzních experimentů pro konzervativní stopovač ^3H (HTO) a pro ^{36}Cl , který byl použit jako konzervativní nesorbující aniont. Hodnoty efektivních difuzních koeficientů D_e stanovené analytickým řešením a metodou time-lag se u studovaných vzorků pohybovaly mezi 1,08 a $9,07 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ (HTO) a 0,12 až $4,10 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ pro aniontovou formu (^{36}Cl). Stanovené hodnoty efektivních difuzních koeficientů D_e jsou uvedeny v Tab. 3 a graficky znázorněny na Obr. 21. U některých vzorků nebylo možné stanovit hodnoty D_e pro chlorid ^{36}Cl pomocí analytického řešení, ale pouze metodou time-lag.

Tab. 3 Hodnoty efektivních difuzních koeficientů D_e stanovené analytickým řešením a metodou time-lag spolu s jejich odchylkami, poměr difuzních koeficientů $D_e(^3\text{H})/D_e(^{36}\text{Cl})$

Vzorek	$D_e \cdot 10^{-13} \text{ (m}^2/\text{s)}$				$\frac{D_e(^3\text{H})}{D_e(^{36}\text{Cl})}$
	Analytické řešení		Time-lag metoda		
	HTO	^{36}Cl	HTO	^{36}Cl	
L5_62L_K_2	1,23±0,57	X	1,19±0,16	X	X
L5_62L_K_3	1,14±0,20	X	1,08±0,08	0,12±0,07	9
L5_62L_P_1	1,99±0,20	X	1,79±0,09	0,22±0,15	8
L5_62L_P_2	2,39±0,25	0,89	2,10±0,12	0,45±0,18	5
L5_32P_K26_1	1,69±0,25	0,26	1,71±0,06	0,12±0,09	14
L5_32P_K26_2	3,16±0,46	0,92	2,93±0,15	0,77±0,05	4
L5_32P_K26_3	2,33±0,32	X	2,24±0,29	0,33±0,07	7
L5_32P_P29_1	9,60±0,29	4.68±0,29	9,07±0,22	4,10±0,14	2
L5_32P_P29_3	9.14±0.32	4.24±0.32	8.96±0.16	4.04±0.09	2



Obr. 21 Poměry efektivních difuzních koeficientů (time-lag metoda) pro tritium (^3H) ve srovnání s chloridem (^{36}Cl); L5_62L – biotitický migmatit, L5_32P – amfibolit, P – paralelně k foliaci, K – kolmo k foliaci

Biotitický migmatit vykazuje nižší hodnoty efektivního difuzního koeficientu (D_e), s maximálními hodnotami $2,1 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ pro HTO a $0,45 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ pro ^{36}Cl u vzorků s paralelní orientací vůči směru usměrnění. Naopak amfibolit má hodnoty D_e v rozmezí $1,71\text{--}9,07 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ pro HTO a $0,12\text{--}4,10 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ pro ^{36}Cl , přičemž vzorky orientované paralelně k foliaci vykazují vyšší difuzivitu. Vzorky s kolmou orientací vůči foliaci mají nižší hodnoty D_e , což naznačuje významný vliv strukturní stavby horniny na difuzní vlastnosti. Nižší difuzivita chloridových iontů (^{36}Cl) je způsobena jevem aniontové exkluze, který je společný pro oba typy hornin. Tento efekt je však výraznější u amfibolitu, kde jsou hodnoty poměru D_e (HTO/ ^{36}Cl) nižší. Vyšší hodnoty D_e pozorované u amfibolitu mohou být důsledkem nehomogenní stavby vzorků, které

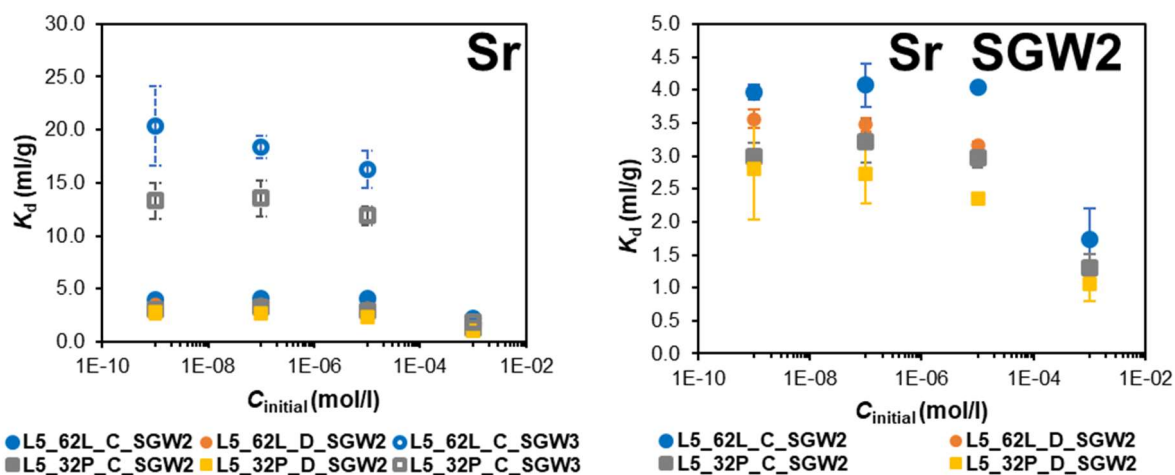
často obsahují pásy plagioklasu a křemene. Tyto minerální složky mohou přispívat ke zvýšené difuzivitě v rámci horniny.

2.6.2 Sorpční experimenty

Distribuční sorpční koeficient (K_d) byl stanoven pomocí vsádkových sorpčních experimentů pro screeningové radionuklidy ^{137}Cs a ^{86}Sr na základě sorpčních izoterm. Pro experimenty byla využita syntetická podzemní voda SGW2 a SGW3 (Červinka et al. 2016). Výsledky ve formě distribučních koeficientů K_d (Sr) pro jednotlivé kapalně fáze a horninové vzorky jsou v Tab. 4 a na Obr. 22. Pro každou koncentraci byl připraven triplikát.

Tab. 4 Průměrná hodnota K_d (Sr) pro dané horninové vzorky a kapalně fáze, uvedena spolu s 95% intervalem spolehlivosti

Vzorek	Ekvil. kapalná fáze	K_d (ml/g)			
		10 ⁻⁹ mol/l neak. SrCl ₂	10 ⁻⁷ mol/l neak. SrCl ₂	10 ⁻⁵ mol/l neak. SrCl ₂	10 ⁻³ mol/l neak. SrCl ₂
L5_62L_C, biot.mgm	SGW2	3,97±0,12	4,07±0,32	4,05±0,03	1,73±0,47
	SGW3	20,37±3,74	18,38±1,06	16,24±1,77	2,27±0,11
L5_62L_D, biot.mgm	SGW2	3,56±0,14	3,47±0,11	3,17±0,04	1,23±0,03
L5_32P_C, amf.	SGW2	3,00±0,19	3,22±0,33	2,98±0,15	1,31±0,20
	SGW3	13,30±1,73	13,53±1,68	11,88±0,90	1,85±0,13
L5_32P_D, amf.	SGW2	2,80±0,76	2,72±0,45	2,35±0,08	1,07±0,28



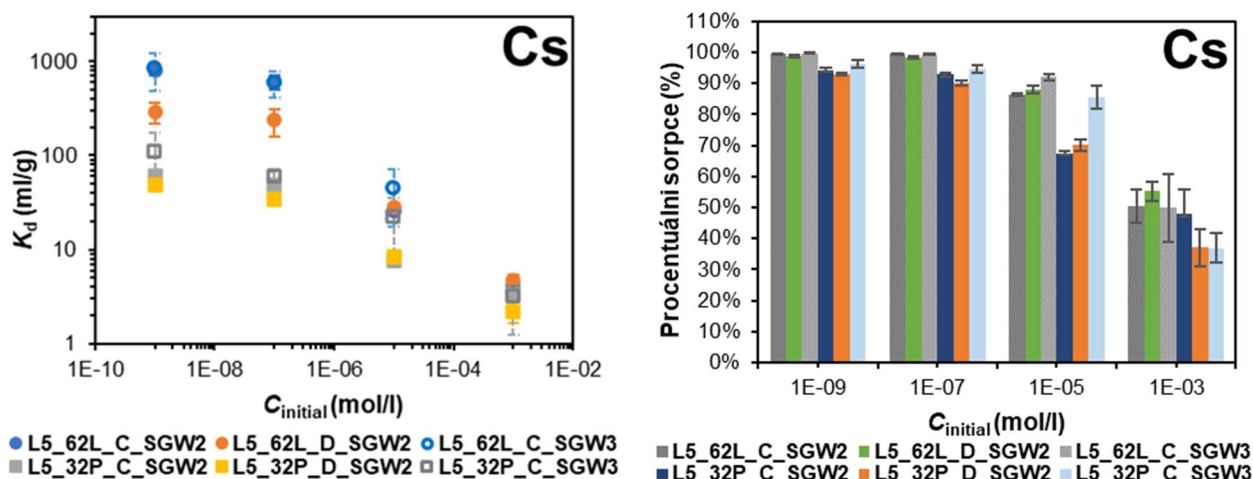
Obr. 22 Průměrná hodnota K_d (Sr) pro dané horninové vzorky a kapalně fáze (SGW2, SGW3), chybové úsečky vyjadřují 95% interval spolehlivosti

Výsledky ve formě distribučních koeficientů K_d (Cs) pro jednotlivé kapalně fáze a horninové vzorky jsou uvedeny v Tab. 5 a na Obr. 23. Pro každou koncentraci byl připraven triplikát.

Tab. 5 Průměrná hodnota K_d (Cs) pro dané horninové vzorky a kapalná fáze, uvedena spolu s 95% intervalem spolehlivosti.

Vzorek	Kapalná fáze	K_d (ml/g)			
		10 ⁻⁹ mol/l neak. CsCl	10 ⁻⁷ mol/l neak. CsCl	10 ⁻⁵ mol/l neak. CsCl	10 ⁻³ mol/l neak. CsCl
L5_62L_C, biot.mgm	SGW2	818±100	602±100	25±2	4±1
	SGW3	857±374	601±185	45±28	3±1
L5_62L_D, biot.mgm	SGW2	293±72	237±76	28±2	5±1
L5_32P_C, amf.	SGW2	61±6	48±5	8±1	3±1
	SGW3	109±67	60±8	22±13	3±2
L5_32P_D, amf	SGW2	48±3	34±2	9±1	2±1

Z výsledků distribučních koeficientů K_d a procentuální sorpce vyplývá, že sorpce Cs byla mírně nižší u frakce D (0,8-0,63 mm) ve srovnání s frakcí C (0,63 -0,125 mm), což koreluje s mírně vyšším specifickým povrhem (SSA BET) naměřené u frakce C, současně u frakce C byly naměřeny mírně vyšší hodnoty CEC.



Obr. 23 Průměrná hodnota K_d (Cs; vlevo) a procentuální sorpce Cs (vpravo) pro dané horninové vzorky a kapalná fáze, chybové úsečky vyjadřují 95% interval spolehlivosti

Amfibolit (L5_32P) vykazuje obecně nižší sorpční kapacitu, kdy se hodnoty K_d (Cs) pohybují mezi 2–109 ml/g a pro stroncium mezi 1,07–13,3 ml/g. Naproti tomu biotitický migmatit má výrazně vyšší sorpční kapacitu, což potvrzují hodnoty K_d pro cesium v rozsahu 3–857 ml/g a pro stroncium mezi 1,1–20,37 ml/g. Nejvyšší hodnoty K_d byly naměřeny při nízké koncentraci stopovače 1·10⁻⁹ mol/l, kdy pro cesium dosáhly 857±374 ml/g a pro stroncium 20,37±3,74 ml/g v prostředí SGW3. Při vyšší koncentraci neaktivního nosiče (1·10⁻³ mol/l) docházelo k nasycení sorpčních míst, což vedlo k poklesu hodnot K_d . Porovnáním hodnot sorpce Cs mezi prostředími s ekvilibrovanými SGW2 a SGW3 nebyly identifikovány statisticky významné rozdíly. Distribuční koeficienty pro všechny zkoumané materiály a koncentrace nosičů vykazují překryv 95 % intervalů spolehlivosti, což naznačuje, že pozorované rozdíly jsou minimální. V procentuálním vyjádření sorpce se rozdíly pohybují v rozmezí 2–3 %. Hlavním faktorem ovlivňujícím rozdíly v sorpci Sr mezi prostředím SGW2 a SGW3 je tedy především obsah

dvojmocných kationtů (hodnoty pH zůstávají po ekvilibraci téměř totožné). Vyšší sorpční kapacita migmatitu je přičítána přítomnosti biotitu, jehož vrstvená struktura poskytuje více vysoce afinitních sorpčních míst, zejména pro cesium. U stroncia jsou rozdíly v sorpci mezi oběma horninami méně výrazné, avšak v prostředí SGW3 byly hodnoty K_d mírně vyšší díky absenci konkurenčních kationtů, jako je vápník a hořčík.

2.7 Geomechanika

2.7.1 Stanovení fyzikálně mechanických a geotechnických vlastností hornin laboratorními testy

Laboratorní testování fyzikálně mechanických a geotechnických vlastností hornin probíhalo v laboratořích společnosti SG Geotechnika (SGG) a Ústavu geoniky AV ČR (ÚGN). U vybraných velkoobjemových vzorků bylo rovněž provedeno srovnávací měření pevnostních a deformačních vlastností v prostém tlaku, a to ve Zkušební laboratoři Výzkumného centra hornin Hornicko-geologické fakulty VŠB-TU Ostrava (ZLVCH HGF VŠB-TUO) a v laboratořích Oddělení aplikované mechaniky hornin Ústavu struktury a mechaniky hornin AV ČR (OAMH ÚSMH). Podrobné výsledky stanovení jsou prezentovány ve čtyřech dílčích zprávách za jednotlivé roky řešení (Bukovská et al. 2022, 2023, 2025; Soejono et al. 2024).

Na zkušebních tělesech, připravených z odebraných kusových vzorků hornin byly stanoveny následující materiálové vlastnosti (FMV; Tab. 6):

- měrná hmotnost (pyknometricky podle ČSN EN 1936),
- objemová hmotnost (na tělesech pravidelného tvaru podle ČSN 72 1154 a ČSN EN 1936),
- celková pórovitost (výpočtem z naměřených hodnot měrné a objemové hmotnosti),
- otevřená pórovitost (podle ČSN EN 1936),
- charakterizace pórového prostoru pomocí rtuťové porozimetrie,
- nasákavost do ustálení hmotnosti (podle ČSN EN 13755),
- koeficient hydraulické vodivosti horniny (podle interních metodických postupů Ústavu geoniky AV ČR, v. v. i. a podle ČSN CEN ISO/TS 17892-11),
- plynopropustnost při různých plášťových tlacích (podle interního metodického postupu Ústavu geoniky AV ČR, v. v. i.),
- součinitel tepelné vodivosti a měrná tepelná kapacita,
- součinitel teplotní roztažnosti (podle ČSN EN 14581),
- tepelná difuzivita (výpočtem ze stanovených hodnot tepelné vodivosti a měrné tepelné kapacity),
- pevnost v prostém tlaku při standardním zatěžování (podle ČSN EN 1926 a doporučeného postupu ISRM 1979),
- modul přetvárnosti a elasticity při cyklickém zatěžování (podle interních metodických postupů Ústavu geoniky AV ČR, v. v. i., a podle Zavorala et al. 1987),
- Poissonovo číslo horniny při standardním a cyklickém zatěžování,
- pevnost v příčném tahu tzv. brazilskou zkouškou (postupem podle Zavorala et al. 1987 resp. podle doporučeného postupu ISRM 1978b),
- pevnost v tlaku a modul pružnosti za trojosého stavu napjatosti (podle interních metodických postupů Ústavu geoniky AV ČR, v. v. i. a podle Zavorala et al. 1987),

- abrazivnost horniny metodou CERCHAR (podle ASTM D7625 – 10),
- magnetická susceptibilita a anizotropie magnetické susceptibility (podle Hanák et al. 2010),
- přirozená radioaktivita (stanovení obsahu U, eU(Ra), eTh a K) (podle Hanák et al. 2010),
- elektrické odporové vlastnosti (podle Hanák et al. 2010),
- rychlost průchodu podélných ultrazvukových vln (P-vln) a určení anizotropie P-vln (podle ČSN EN 14579 na přístroji Maruto CH-48S a podle ISRM 1978a a Zavoral et al. 1987 na přístroji Olympus 5072PR).

Na základě detailního výzkumu fyzikálních, mechanických i přetvárných vlastností (FMV) lze konstatovat, že stanovené hodnoty FMV hornin z prostoru PVP Bukov II jsou zcela v souladu s obecně známými a publikovanými materiálovými vlastnostmi krystalických hornin obdobného mineralogického složení a geneze a odpovídají poznatkům zjištěným v jiných partiích dolu Rožná (Bukovská et al. 2020, Souček et al. 2018). V intaktním stavu se tyto horniny obecně vyznačují velmi nízkou pórovitostí, nasákavostí a propustností pro vodu a plyny. Ve smyslu známých pevnostních klasifikací (např. Bieniawski 1989 nebo Hoek a Brown 1997) se pak jedná o horniny s vysokou až extrémně vysokou pevností. Charakteristickým rysem hodnocených hornin je často poměrně výrazná anizotropie, a to jak fyzikálních (např. rychlost šíření podélných ultrazvukových vln, tepelná vodivost a kapacita), tak také mechanických vlastností (pevnost v příčném tahu, pevnost v tlaku). Rovněž tato zjištění odpovídají předchozím poznatkům získaným v jiných částech dolu Rožná. Průměrné hodnoty FMV celkem šesti analyzovaných VO vzorků, odebraných v prostoru chodeb L4a, L5, L6, L7 a L8 jsou prezentovány v Tab. 6. Zjištěná variabilita naměřených hodnot těchto vlastností pak vyplývá z Listů FMV jednotlivých VO vzorků, které jsou obsaženy v samostatné elektronické příloze (Elektronická příloha 17).

Tab. 6 Průměrné hodnoty FMV jednotlivých studovaných VO vzorků (měření SGG a ÚGN)

Parametr	L4a-47R amfibolit	L5-32P amfibolit	L5-62L migmatit	L6 10,0m migmatit/ pararula	L7 85,8m amfibolit/ pararula	L8 43,2m amfibolit/ pararula
Měrná hmotnost [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	2949	2933	2841	2762	2960	2737
Objemová hmotnost [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	2911	2930	2744	2745	2897	2831
Celková pórovitost [%]	2,70	0,76	1,50	1,13	0,89	0,90
Otevřená pórovitost – stanovení pomocí vody [%]	0,36	0,45	0,27	0,62	0,32	0,39

Parametr	L4a-47R amfibolit	L5-32P amfibolit	L5-62L migmatit	L6 10,0m migmatit/ pararula	L7 85,8m amfibolit/ pararula	L8 43,2m amfibolit/ pararula
Otevřená pórovitost – stanovení pomocí MIP [%]	0,21	0,78	0,18	0,75	0,16	0,21
Nasákavost [%]	0,15	0,15	0,10	0,23	0,11	0,13
Plynopropustnost při okolním tlaku 15 MPa – K	$< 10^{-22}$	$< 10^{-22}$	$< 10^{-22}$	$1,3 \cdot 10^{-18}$	$3,8 \cdot 10^{-17}$	$< 10^{-22}$
Plynopropustnost při okolním tlaku 15 MPa – P	$< 10^{-22}$	$4,6 \cdot 10^{-20}$	$< 10^{-22}$	$1,7 \cdot 10^{-17}$	$1,4 \cdot 10^{-21}$	$7,0 \cdot 10^{-21}$
Koeficient hydraulické vodivosti – K [m.s ⁻¹]	$< 1,0 \times 10^{-14}$	$< 1,0 \times 10^{-14}$	$< 1,0 \times 10^{-14}$	$5,9 \times 10^{-13}$	$< 1,0 \times 10^{-14}$	$< 1,0 \times 10^{-14}$
Koeficient hydraulické vodivosti – P [m.s ⁻¹]	$< 1,0 \times 10^{-14}$	$< 1,0 \times 10^{-14}$	$< 1,0 \times 10^{-14}$	$1,2 \times 10^{-10}$	$< 1,0 \times 10^{-14}$	$< 1,0 \times 10^{-14}$
Rychlost průchodu UZ vln – K [km.s ⁻¹]	6,00	5,11	4,86	4,59	5,29	4,57
Rychlost průchodu UZ vln – P [km.s ⁻¹]	6,42	5,90	5,78	5,35	6,47	5,87
Tepelná vodivost – K [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	2,08	2,30	2,08	2,40	2,20	2,54
Tepelná vodivost – P [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	2,09	2,96	2,47	2,78	2,38	2,68
Objemová tepelná kapacita – K [MJ.m ⁻³ .K ⁻¹]	2,11	1,86	2,02	1,80	1,94	2,15
Objemová tepelná kapacita – P [MJ.m ⁻³ .K ⁻¹]	2,10	1,96	2,16	1,89	2,00	2,14
Tepelná difuzivita – K [mm ² .s ⁻¹]	0,99	1,19	1,03	1,33	1,13	1,18
Tepelná difuzivita – P [mm ² .s ⁻¹]	1,00	1,48	1,14	1,47	1,19	1,25
Teplotní roztažnost (20– 150 °C) – K [K ⁻¹]	$5 \cdot 10^{-6*}$	$4,5 \cdot 10^{-6}$	$9 \cdot 10^{-6*}$	$4,9 \cdot 10^{-6}$	$6,9 \cdot 10^{-6}$	$9 \cdot 10^{-6*}$
Teplotní roztažnost (20– 150 °C) – P [K ⁻¹]	$6 \cdot 10^{-6*}$	$4,6 \cdot 10^{-6}$	$9 \cdot 10^{-6*}$	$3,6 \cdot 10^{-6}$	$6,2 \cdot 10^{-6}$	$10 \cdot 10^{-6*}$
Magnetická susceptibilita [10 ⁻⁶ j. SI]	1405	508	2719	260	3026	2487
Radioaktivita – obsah K [ppm]	0,61	0,81	1,62	2,73	0,75	1,35

Parametr	L4a-47R amfibolit	L5-32P amfibolit	L5-62L migmatit	L6 10,0m migmatit/ pararula	L7 85,8m amfibolit/ pararula	L8 43,2m amfibolit/ pararula
Radioaktivita – obsah U [ppm]	3,22	1,49	1,89	2,70	0,99	2,55
Radioaktivita – obsah eU [ppm]	4,16	2,46	2,20	2,60	1,10	2,90
Radioaktivita – obsah eTh [ppm]	9,12	1,88	7,01	13,0	1,73	4,85
Tepelná produkce [$\mu\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$]	1,92	0,92	1,28	2,07	0,52	1,33
Abrazivita – K [–]	4,0	4,58	4,3	4,64	3,22	3,3
Abrazivita – P [–]	4,2	3,46	4,4	4,55	3,14	3,5
Pevnost v prostém tlaku – K [MPa]	183	215	136	97	231	165
Pevnost v prostém tlaku – P [MPa]	166	190	144	145	224	140
Modul přetvárnosti – K [GPa]	83	71	71	39	59	62
Modul přetvárnosti – P [GPa]	69	79	86	62	72	76
Poissonovo číslo – K [–]	0,23	0,18	0,23	0,24	0,19	0,25
Poissonovo číslo – P [–]	0,26	0,21	0,24	0,22	0,20	0,21
Triaxiální pevnost při okolním tlaku 15 MPa – K	291	303	248	177	190	292
Triaxiální pevnost při okolním tlaku 15 MPa – P	334	272	241	195	311	271
Pevnost v příčném tahu – K [MPa]	17	15	16	12	14	16
Pevnost v příčném tahu – P [MPa]	15	11	10	9	9	13

Pozn.: K – tlaková síla působící kolmo k foliaci, P – tlaková síla působící rovnoběžně s foliací, MIP – vysokotlaková rtuťová porozimetrie

*v rozsahu 20-80 °C

V případě srovnávacích měření pevnostních a deformačních vlastností v prostém tlaku byla dosažena velmi dobrá shoda výsledků ÚGN a ZLVCH HGF VŠB-TUO. Případné drobné rozdíly jsou způsobeny přirozenou variabilitou hornin, v případě modulu přetvárnosti a Poissonova čísla i rozdílným způsobem měření deformací (LVDT snímače na ÚGN versus lepené tenzometry na ZLVCH HGF VŠB-TUO). Z výsledků uvedených v tabulce (Tab. 7) je dále patrné, že v laboratoři OAMH ÚSMH byly naměřeny nižší hodnoty přetvárných modulů i pevností v prostém tlaku. Důvodem může být heterogenita dodaného materiálu. Podrobně jsou srovnávací měření prezentována v průběžné zprávě za rok 2024 (Bukovská et al. 2025).

Tab. 7 Porovnání pevnostních a přetvárných charakteristik

Vzorek	Laboratoř	Pevnost v prostém tlaku [MPa]	Modul přetvárnosti [GPa]	Poissonovo číslo [-]
L5-32P směr K	ÚGN AV ČR	215	71,0	0,18
L5-32P směr P		190	78,7	0,21
L5-32P směr K	VŠB-TUO	221	71,3	0,23
L5-32P směr P		194	81,6	0,23
L5/62L/K	SGG	136	71,1	0,23
L5/62L/P		144	85,8	0,24
L5/62L/K	ÚSMH AV ČR	87	42,0	0,12
L5/62L/P		88	71,4	0,25

2.7.2 Petrofyzikální vlastnosti hornin

Petrofyzikální parametry byly studovány RNDr. J. Hanákem a kol. na velkoobjemových vzorcích reprezentující hlavní horninové typy na PVP Bukov II, měření proběhla ve stejných laboratořích jako stanovení petrofyzikálních vlastností na předchozích projektech v prostorech PVP Bukov I a bývalého dolu Rožná (Bukovská et al. 2017, 2020). Na těchto vzorcích byly stanoveny hustotní parametry (objemová a mineralogická hustota a pórovitost), dále magnetická susceptibilita, elektrická konduktivita, radioaktivita a anizotropie magnetické susceptibility (Elektronická příloha 17). Postup úpravy vzorků, metodiky měření, zpracování dat a podrobný popis výsledků jsou popsány ve zprávě Bukovská et al. (2025).

Průměrné hodnoty mineralogických hustot migmatitizovaných rul jsou od 2,719 g.cm⁻³ až po 2,877 g.cm⁻³ v závislosti na stupni migmatitizace. Magnetická susceptibilita má u více „leukokratních“ vzorků průměrnou hodnotu 2438,42 (10⁻⁶ j. SI), zatímco u méně tavených typů má řádově nižší průměrnou hodnotu 372,46 (10⁻⁶ j. SI). U migmatitizovaných rul je obsah K 0,61 %, obsah U 3,2 resp. 4,2 ppm a obsah eTh 9,1 ppm. Hustota migmatitů je relativně uniformní (průměrná hodnota 2,792 g.cm⁻³), ale jejich susceptibilita řádově kolísá od 534,30 do 8233,91 (10⁻⁶ j. SI). Migmatity mají obsah K 1,62 %, obsah U 1,9 resp. 2,2 ppm a obsah eTh

7,0 ppm. Amfibolity až amfibolické ruly mají hodnoty mineralogických hustot v relativně stabilním trendu (průměr $2,903 \text{ g.cm}^{-3}$) a jejich průměrná magnetická susceptibilita je 507,68 (10^{-6} J.SI). Amfibolity mají nejnižší obsahy radioaktivních prvků, obsah K je 0,81 %, obsah U 1,5, resp. 2,5 ppm a obsah eTh 1,9 ppm. Hodnoty elektrické konduktivity studovaných vzorků jsou obecně nízké. Migmatizované pararuly vykazují vyšší elektrickou vodivost kolmo na foliaci, zatímco ostatní vzorky mají vyšší hodnoty vodivosti rovnoběžně s foliací. Magnetická stavba migmatitů je lineárně planární, u amfibolitů a pararul je středně planární. Stupeň anizotropie (P) je střední ($P = 1,08$, $P = 1,12$ a $P = 1,34$). Magnetická lineace je podle definice AMS elipsoidu kolmá na pól magnetické foliace a u všech vzorků je blízka ploše magnetické foliace.

Z výsledků stanovení petrofyzikálních parametrů je zjevné, že jednotlivé horninové typy jsou vzájemně fyzikálně rozdílné (Elektronická příloha 17). Odlišné petrografické složení hornin je již z principu obrazem odlišných fyzikálních vlastností. Jednotlivé horninové typy se liší jak v látkových parametrech (hustotní parametry, magnetická susceptibilita, radioaktivita), tak i v hodnotách elektrické konduktivity. Variabilita petrofyzikálních vlastností horninového prostředí je však zřejmá i v rámci jednotlivých horninových typů.

2.7.3 Stanovení fyzikálně mechanických a geotechnických vlastností hornin in-situ testy

Pro orientaci v oblasti PVP Bukov II je na Obr. 24 znázorněna lokalizace dvou geotechnických stanic GS-L7 a GS-L4a s vyznačením jejich vrtů, ve kterých byla realizována měření napětí HM pomocí hydroštěpení, měření přetvárných vlastností HM pomocí metody Goodman Jack, analýza parametru RQD, měření pomocí optické a akustické televize a dále lokalizace měření Schmidtovým kladívkem v místech odběru VO vzorků. O výše uvedených měřeních pojednávají následující podkapitoly.

2.7.3.1 Schmidtovo kladívko

Postup měření pomocí Schmidtova kladívka a způsob zpracování výsledků měření odrazivosti Schmidtovým kladívkem pracovníky ÚGN je detailně uveden ve čtvrté průběžné zprávě (Bukovská et al. 2025). Byly provedeny dva způsoby vyhodnocení získaných hodnot odrazivosti. Jednalo se jak o korelaci naměřených průměrných hodnot odrazivosti „ R_{N_AVG} “ a „ $R_{N_25\%}$ “ a přijatých laboratorních hodnot pevnosti hornin v jednoosém tlaku, tak o vyhodnocení naměřených hodnot odrazivosti ve vztahu k pevnostním vlastnostem podle nomogramu uvedeného v návrhu certifikované metodiky (Hudeček et al. 2019; Ulusay et al. 2007).

Na základě výsledků korelace hodnot odrazivosti je zřejmé, že míra korelace mezi hodnotami odrazivosti ze všech odběrných míst a laboratorními hodnotami pevností v jednoosém tlaku byla velice nízká a z praktického hlediska nevypovídající. Míra korelace se zvýšila v případě vyloučení VO L6_10 a L8_43,2 z celého souboru analyzovaných dat (viz Elektronická příloha 18). Vyloučení VO vzorku bylo provedeno na základě výskytu jejich vysoké hodnoty koeficientu variability u laboratorních pevností v jednoosém tlaku (Bukovská et al. 2025).

Vyhodnocení naměřených hodnot odrazivosti podle nomogramu ukázalo, že v případě měření odrazivosti na neupravovaných stěnách chodeb PVP Bukov II, ve vztahu k hodnotám laboratorních pevností, je výhodnější použití průměrné hodnoty „ $R_{L_25\%}$ “ stanovené z hodnot odrazivosti nacházejících se nad vyšším kvantilem. Jim odpovídající hodnoty tlakové pevnosti

„UCS_R_L_25%“ lépe korespondují s hodnotami naměřených pevností v laboratoři, ale přesto nabývají nižších hodnot. Hodnoty pevností stanovených na základě hodnot „R_L_AVG“ se nacházejí převážně pod laboratorními hodnotami pevností (viz Soejono et al. 2025; Elektronická příloha 18).



Obr. 24 Lokalizace geotechnických stanic GS-L7 a GS-L4a s označením geotechnických vrtů včetně znázornění míst měření Schmidovým kladívkem

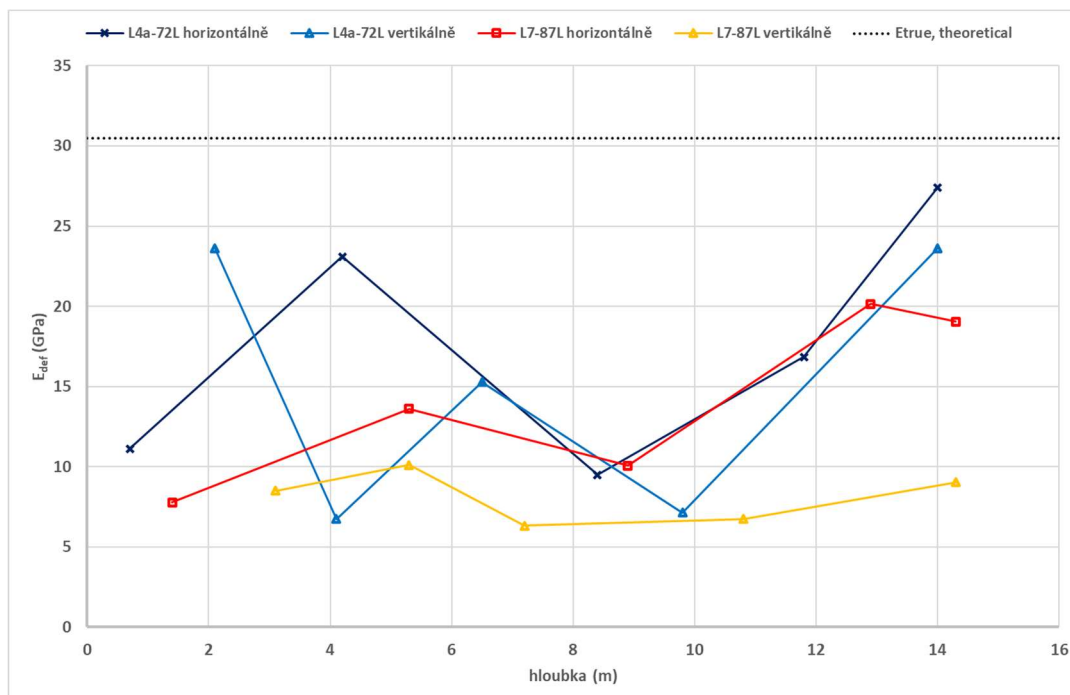
Metodu měření odrazivosti pomocí Schmidova kladívka in situ na stěnách chodeb PVP Bukov II lze doporučit pouze pro velice orientační stanovení pevnosti v prostém tlaku. Uvedené

výsledky a poznatky nejsou plně přenositelné na jiné geotechnické podmínky (lokality). Použití této metody pro stanovování pevnosti na každé jiné lokalitě bude muset předcházet validace hodnot odrazivosti v závislosti na místních geotechnických vlastnostech (litologický druh horniny, výskyt foliace a směr měření odrazivosti vzhledem k jejímu průběhu, strukturní stavba a míra primárního porušení HM, způsob ražení chodeb apod.). Musí být stanovena přesná metodika použití Schmidtova kladívka in situ. Pro co nejlépe vypovídající korelaci hodnot odrazivosti s laboratorními výsledky musí být dodržen stejný způsob odběru horniny, nejlépe velkopřůměrovým jádrovým vrtáním. Kvalita a vypovídající schopnost měření Schmidtovým kladívkem budou rovněž odvislé od lidského faktoru (výběr místa úderu, orientace kladiva, osobní míra zkušenosti atd.). Pro eliminaci lidského faktoru by měření na lokalitě mělo být prováděno nejlépe omezeným počtem pracovníků, ideálně dvěma až třemi.

2.7.3.2 Goodman Jack

Pomocí lisu Goodman Jack byly v nově budovaném PVP Bukov II testovány horizontální vrty L4a-72L a L7-87L pracovníky SG Geotechnika. Před tímto stanovením byla realizována měření akustické televize. Na základě jejích výsledků byly vybrány etáže vrtu, které neobsahovaly viditelné diskontinuity, které by negativně ovlivnily samotná měření. Zatěžování bylo zvoleno stupňovité s krokem 2 MPa až do 10 MPa, odlehčení se stejným krokem na hodnotu 2 MPa a poté zatěžování v druhém cyklu se stejným krokem až na maximální hodnotu 20 MPa.

Výsledky stanovení deformačních modulů jsou přehledně zaznamenány na následujícím grafu (Obr. 25), kde E_{def} odpovídá deformačnímu modulu z druhé zatěžovací větve zkoušky, tj. z 10 na 20 MPa v [GPa]. Druhý zatěžovací stupeň byl vybrán proto, že v tomto oboru napětí má křivka napětí – přetvoření lineární průběh a neobsahuje parazitní vlivy jako dosednutí čelistí na horninu. Z grafu vyplývá, že v testovaných etážích nebyla zjištěna žádná korelace měřených hodnot s hloubkou. Korelace se směrem zatěžování je patrná, moduly získané ve směru horizontálním jsou vyšší než ve směru vertikálním.



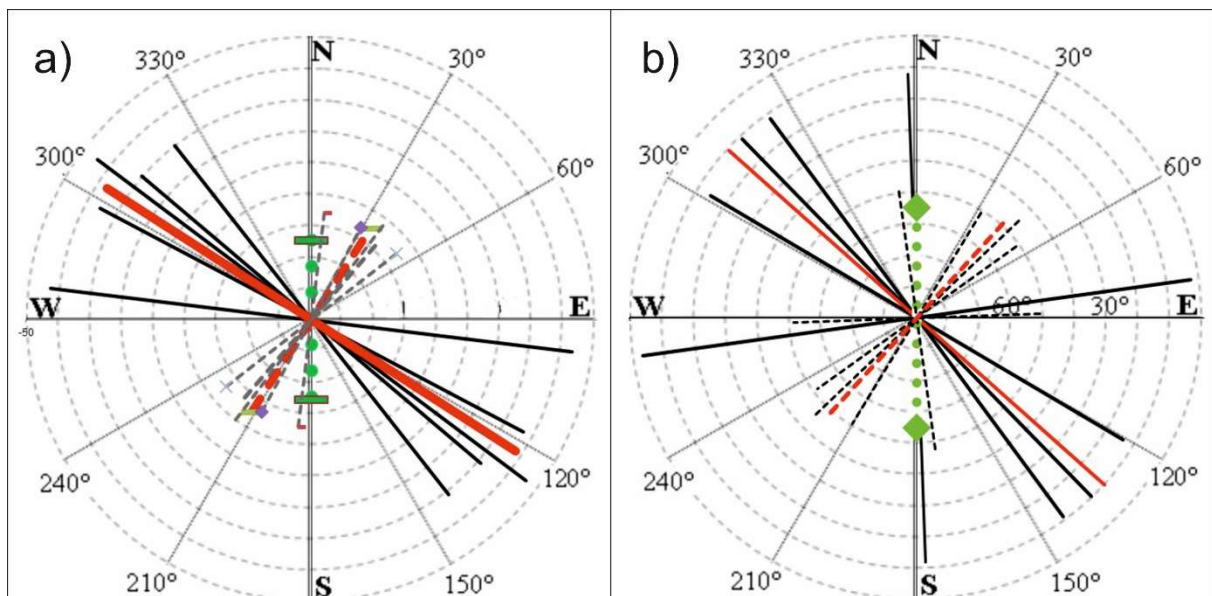
Obr. 25 Průběh deformačních modulů z druhé zatěžovací větve s hloubkou

2.7.3.3 Hydrofracturing

Měření napětového stavu HM metodou hydraulického štěpení stěn vrtů a následné vyhodnocení těchto měření bylo prováděno pracovníky ÚGN. Napětový stav HM byl stanovován ve vertikálních úpadních geotechnických vrtech L7-87D a L4a-72D (délka vrtů 50 m, vrt L4a-72D mohl být proměřen jen do hloubky 40 m z důvodu jeho neprůchodnosti), které byly součástí geotechnických stanic GS-L7 a GS-L4a. Měření napětí HM bylo prováděno pomocí přímé metody měření, tzv. hydraulického štěpení stěn vrtu (hydrofracturing). Podmínkou pro nasazení metody je dostatečně nepropustné prostředí HM, schopné křehkého lomu pro vytvoření jednotlivé trhliny. Detailnější informace k použité metodě a použitému zařízení pro hydroštěpení stěn vrtu jsou uvedeny v realizačním projektu (Bukovská et al. 2021).

Před vlastním měřením napětí horninového masivu byly použity doprovodné metody pro stanovení vhodných poloh pro vlastní měření. Pro tento účel byly využity karotážní sondy ABI, resp. HiRAT (Acoustic Borehole Imager, resp. High-resolution Acoustic Televiewer) a OBI, resp. OPTV (Optical Borehole Imager, resp. Optical Televiewer) zobrazující stav stěn geotechnických vrtů. Metody ABI a OBI jsou detailněji popsány v kap. 2.7.2.4 realizačního projektu (Bukovská et al. 2021).

V každém vertikálním vrtu bylo realizováno cca 5 měřicích poloh ve vybraných hloubkových úrovních, u kterých bylo možné vyhodnotit hodnoty hlavních složek horizontálního napětí HM a jejich orientaci k magnetickému severu. Výsledky těchto napětových měření byly zpracovány jak tabelární formou (udávající velikost maximální a minimální složky horizontálního napětí HM, „SH“ (maximální); „Sh“ (minimální) a orientaci SH „ Φ_{SH} “ k magnetickému severu, tak grafickou formou, která zobrazuje orientaci hlavních složek horizontálního napětí (viz Obr. 26). Tabelárně zpracované výsledky jsou uvedeny v Elektronická příloha 20.



Obr. 26 Grafické znázornění výsledků určení horizontálního napětí horninového masivu včetně orientací na geotechnických stanicích (a) GS-L7 a (b) GS-L4: černě – dílčí výsledky na jednotlivých hloubkových úrovních; červeně – přijaté sumární výsledky; zeleně – vypočtené vertikální napětí

Na základě hodnot napětí HM, naměřených pomocí hydroštěpení stěn vrtu, byl pro zájmovou oblast PVP Bukov II přijat tento napěťový stav HM:

- maximální horizontální napětí $SH = 38 \text{ MPa}$ (GS-L7 – 42 MPa; GS-L4a – 34 MPa);
- menší hlavní horizontální napětí $Sh = 16 \text{ MPa}$, (GS-L7 – 19 MPa; GS-L4a – 16 MPa);
- vertikální geostatická složka napětí $Sv = 14 \text{ MPa}$ (stanoveno výpočtem z hloubky uložení a objemové hmotnosti hornin);
- poměr hodnot naměřených a přijatých vertikálních a horizontálních složek napětí HM $Sv : SH : Sh$ vychází $1,0 : 2,7 : 1,3$, (GS-L7 – $1,0 : 3,0 : 1,4$; GS-L4a – $1,0 : 2,4 : 1,2$);
- poměr horizontálních složek napětí HM $SH : Sh$ byl stanoven na $\sim 2,15$ (GS-L7 – $\sim 2,2$; GS-L4a – $\sim 2,1$);
- azimut hlavního horizontálního napětí SH je cca 128° (GS-L7 – $123^\circ \pm 15^\circ$; GS-L4a – $132^\circ \pm 10^\circ$).

Z tabulek s výsledky (Elektronická příloha 20) je zřejmá zajímavost, že v hloubkové úrovni cca 24 m jak u měřicího vrtu na GS-L7, tak vrtu na GS-L4a je maximální složka horizontálního napětí HM orientována souhlasně ve směru cca V–Z, což je odlišná hodnota směru SH od přijaté hodnoty směru maximální složky horizontálního napětí HM na lokalitě cca 128° . Na tuto skutečnost může mít vliv například strukturní stavba HM, geomechanické podmínky na lokalitě apod.

Za zmínku stojí i porovnání naměřených výsledků s výsledky některých dřívějších měření v jiných částech dolu Rožná, kdy např. Hájek et al. (2000) uvádějí pro úpadní vrtu v podloží 1. zóny na úrovni 22. patra hodnoty $SH = 55\text{--}65 \text{ MPa}$ s orientací $115\text{--}124^\circ$ a $Sh = 12\text{--}22 \text{ MPa}$ a na úrovni 18. patra pak hodnoty $SH = 42\text{--}65 \text{ MPa}$ s orientací $152\text{--}157^\circ$ a $Sh = 21\text{--}26 \text{ MPa}$, což jsou hodnoty generelně srovnatelné výsledky naměřenými na PVP Bukov II.

Pro nezávislou kontrolu určení orientace maximální složky horizontálního napětí byla rovněž provedena analýza ovalizace vrtu z výsledků měření geofyzikální sondou HiRAT. Analýza je založena na skutečnosti, že kruhový tvar vrtu po odvrtání je následkem působení napěťové anizotropie HM deformován na eliptický tvar, kde větší poloosa je sblížena se směrem minimální napěťové složky horizontálního napětí a menší poloosa se směrem maximální napěťové složky HM. Na geotechnické stanici GS-L4a byla zjištěna orientace hlavních složek horizontálního napětí HM, určených pomocí hydraulického štěpení stěn vrtu a orientace maximálního horizontálního napětí z analýzy ovalizace měřicího vrtu méně souhlasná, než tomu bylo u stanice GS-L7, kde směr maximální složky horizontálního napětí víceméně odpovídá naměřeným směrům z hydroštěpení stěn vrtu. Směr stanovený z ovalizace u GS-L4a osciluje kolem směru cca S–J a odklání se od výsledků z hydroštěpení stěn vrtu cca o 50° . Deformace vrtu v tomto případě byla pravděpodobně spíše vyvolána interakcí vrtného náradí s materiálovou strukturní anizotropií materiálu v místě vrtu a napěťový příspěvek k deformaci byl pod hranicí rozlišitelnosti.

2.7.3.4 Optická televize a akustická televize

Studium porušenosti horninového masivu (HM) bylo realizováno v celkem pěti vrtech pracovníky ÚGN. Tři z těchto vrtů (L7-87D, L7-87L a L7-90F) byly součástí geotechnické stanice situované ve staničení 87–90 m chodby L7 (GS-L7). Dva zbývající vrty (L4a-72D, L4a-72L) pak byly situovány v rámci druhé geotechnické stanice, která byla umístěna ve staničení 72 m chodby L4a (GS-L4a). Měření akustické televize bylo rovněž provedeno ve vrtech L4a-72L, L7-87L a L8-54DL. Cílem těchto prací bylo vymezení zón ve vrtech, které neobsahují viditelné pukliny a jsou proto vhodné ke stanovení elastických mechanických konstant neporušené horniny (viz kapitola 2.7.3.2). Naopak místa, která obsahují viditelné pukliny, jsou cílem vodních tlakových zkoušek (kapitola 2.5.4), které hodnotí hydraulickou vodivost těchto puklin.

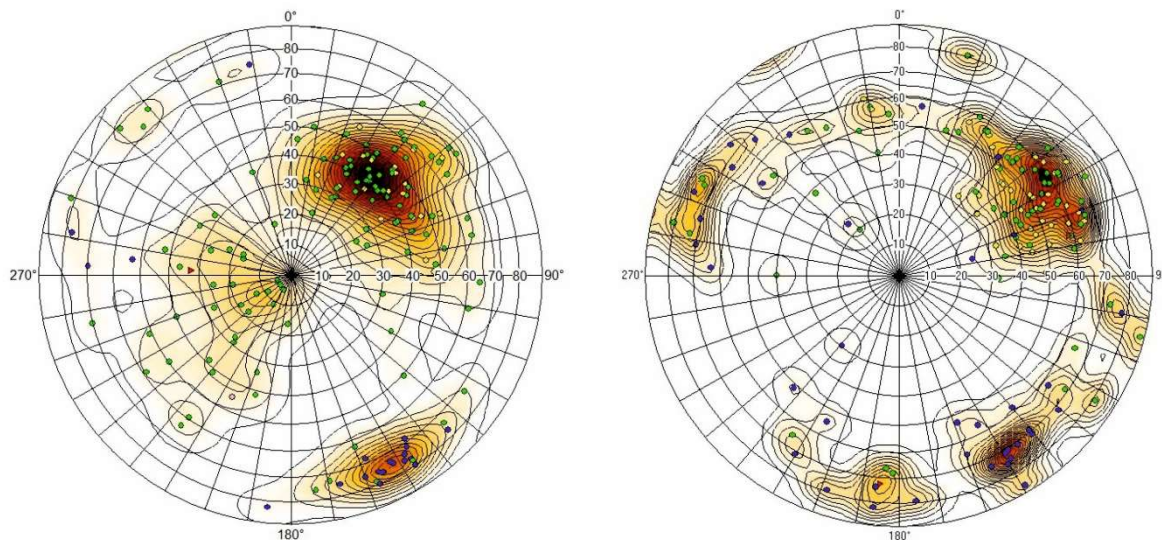
Ve výše uvedených vrtech byl proveden orientovaný záznam stěn pomocí optického televizoru (metoda OBI, sonda OPTV – Optical TeleViewer), který byl doplněn akustickým televizorem (metoda ABI, sonda HiRAT – High Resolution Acoustic Televiewer). Sondy OPTV a HiRAT jsou součástí karotážní aparatury fy. Robertson Geologging. Jednotlivé interpretované strukturní prvky v záznamech stěn vrtů byly zařazeny dle nové jednotné metodiky, která je detailně popsána v průběžných zprávách o řešení projektu (Bukovská et al. 2023, Soejono et al. 2024). Jednotlivé interpretované strukturní prvky v záznamech stěn vrtů byly zařazeny dle nové použité metodiky pro účely projektu následovně:

- PO – puklina otevřená, veškeré pukliny viditelné v záznamu ABI,
- PU – puklina uzavřená, pukliny vyplněné mineralizací,
- N – nerozlišeno, jakýkoliv nejistý záznam zejména z ABI, který bude třeba ověřit na vrtném jádře,
- PZ – porušená zóna, výrazné zóny porušení viditelné v záznamech OBI a ABI,
- S – stavba horninového masivu, foliace, kompoziční páskování, popř. zvrstvení (v případě analyzované lokality se jedná především o metamorfní foliace),
- BB – borehole breakout,
- MA – magnetická anomálie.

Na základě analýz stěn geotechnických vrtů na GS-L7, které byly provedeny pomocí metod OBI a ABI, byly generelně identifikovány tři hlavní puklinové systémy. Nejvýraznější puklinový systém, dominantně zahrnující otevřené pukliny, je prostorově shodný s metamorfní foliací s generelním směrem úklonu k JZ a úklony 20° až 80°. Druhý systém puklin s generelním směrem úklonu k VSV až SV je také tvořen zejména otevřenými puklinami s proměnlivým úklonem od velmi plochých struktur s úklony kolem 5° až po strmější pukliny s úklonem až 80°. Třetí systém je tvořen hlavně uzavřenými puklinami vyplněnými mineralizací s úklony k SSZ, případně k JV a poměrně strmými úklony 70° až 85°. Vysokou kvalitu HM dokumentuje také minimální výskyt porušených zón, byla identifikována pouze jedna porušená zóna s mocností porušení pouze 25 mm.

Ve vrtech na GS-L4a byly rovněž zachyceny tři výraznější puklinové systémy. Stejně jako je tomu v případě GS-L7, většina otevřených puklin je predisponována metamorfní foliací. V úpadním vrtu L4a-72D byly lokalizovány dvě výraznější porušené zóny v hloubce 28,7 a 30,45 m s mocností až 359 mm, zatímco ve vrtu L4a-72L byla zachycena pouze jedna výraznější porušená zóna v hloubce 7,34 m s mocností porušení 51 mm.

Příklady interpretace strukturních prvků ve vrtech jsou prezentovány na Obr. 27. Podrobné výsledky měření a jejich interpretace jsou pak uvedeny v příslušných dílčích zprávách o řešení projektu (Bukovská et al. 2023, Soejono et al. 2024).



Obr. 27 Příklady stereogramů interpretovaných struktur v úpadních vrtech (vlevo – vrt L7-87D, vpravo – vrt L4a-72D): projekce pólů ploch na dolní hemisféru ve Schmidově projekci

2.7.3.5 Stanovení kvality hornin vrtného jádra pomocí parametru RQD

Kvalita hornin tvořících zájmový horninový masiv (HM) byla hodnocena pomocí parametru RQD pracovníky ÚGN, stanovovaném na vrtném jádře na dvou místech PVP Bukov II. Prvním byla geotechnická stanice GS-L7, lokalizovaná ve staničení 87–90 m chodby L7, která byla tvořena celkem pěti geotechnickými vrty různé prostorové orientace a o délkách 10–50 m. Druhé místo pak reprezentovala geotechnická stanice GS-L4a, situovaná ve staničení 72 m chodby L4a a představovaná různě orientovanými vrty s délkami 15–50 m. Na obou hodnocených lokalitách byla prokázána velmi vysoká kvalita HM. Konkrétně v případě stanice GS-L7 dosahoval index RQD pro celé hodnocené délky vrtů hodnot v rozmezí 72–91 %, u GS-L4a se pak RQD pohybovalo v intervalu 75–84 % (Tab. 8). To je přibližně o 10–20 % více než hodnoty RQD známé z jiných částí dolu Rožná (Bukovská et al. 2020, Souček et al. 2018, Vavro et al. 2015). Vyšší kvalitu HM potvrzují také menší rozdíly mezi hodnotami RQD stanovenými na vrtném jádře a stanovené na základě záznamů metodami OBI a ABI (viz kap. 2.6.2.4), kde průměrný rozdíl činí pouze 10 %. V jiných částech dolu Rožná (Bukovská et al. 2020, Vavro et al. 2015) dosahoval tento rozdíl průměrně 25 %, lokálně však až 40 %.

Tab. 8 Procentuální rozdělení kvality hornin vrtného jádra analyzovaných geotechnických vrtů na geotechnických stanicích GS-L7 a GS-L4a do jednotlivých tříd kvality podle indexu RQD

Označení vrtu	Velmi nízká kvalita [%]	Nízká kvalita [%]	Střední kvalita [%]	Dobrá kvalita [%]	Výborná kvalita [%]	Průměrná hodnota RQD pro celý vrt [%]
L7-87D	4	0	26	14	56	83
L7-87L	0	0	13	13	74	91
L7-87UL	7	13	20	27	33	72
L7-87U	0	13	27	47	13	75
L7-90F	10	10	10	40	30	72
L4a-72D	2	8	16	16	58	84
L4a-72L	7	13	40	27	13	68
L4a-72UL	7	7	13	53	20	75
L4a-72U	0	7	20	40	33	81

Pozn.: velmi nízká kvalita = RQD 0–25 %, nízká kvalita = RQD 25–50 %, střední kvalita = RQD 50–75 %, dobrá kvalita = RQD 75–90 %, výborná kvalita = RQD 90–100 %

2.7.4 Geofyzikální měření ve vrtech geotechnických stanic

Průzkumné vrty zhotovené v rámci dvou realizovaných geotechnických stanic GS7 a GS4 byly využity pro realizaci seismických tomografických měření, pro měření vrtním georadarem a pro realizaci seismokarotážních měření. Ta byla provedena společností INSET, stejně tak jejich vyhodnocení a interpretace. Podrobný popis přístrojového vybavení a postupů zpracování je uveden v druhé průběžné zprávě (Bukovská et al. 2023).

Blízké okolí GS bylo sledováno pomocí seismické refrakční tomografie měřené na krátkých profilech vedených klenbou laboratorních chodeb. Použité přístrojové vybavení a metodika zpracování naměřených dat byla podrobně uvedena v druhé průběžné zprávě projektu (Bukovská et al. 2023), zde jsou také podrobné výsledky měření ve vrtech GS7. Měření na GS4 je součástí třetí průběžné zprávy (Soejono et al. 2024).

Výsledkem zpracování seismické tomografie jsou rychlostní řezy, které postihují prostor (2D plošný řez) vymezený použitými vrty. Výsledky georadarových měření jsou zpracovány do formy časových radarových řezů, ve kterých jsou sdruženou formou zobrazeny radarové odrazy z celého prostoru (4π) v okolí vrtného stvolu. Seismokarotáž je zpracována do formy vrstevního rychlostního modelu (závislost rychlosti šíření seismických vln na hloubce vrtu). Výsledkem měření na krátkých profilech metodou seismické refrakční tomografie jsou profilové rychlostní řezy. Na každé GS bylo provedeno tomografické měření s využitím čtveřice vrtů, kterými byly vymezeny tři tomografické řezy. V prostoru GS-L7 byl využit také blízký vrt vedený do čelby (L7-90F) Další řez mimo rovinu vrtů byl na GS-L4 doplněn v tomografické konfiguraci vrt – stěna chodby. Georadarová měření byla provedena ve všech čtyřech vrtech na každé stanici, stejně tak seismokarotáž. Profily vedené přes klenbu chodby v okolí GS byly realizovány celkem na třech pozicích při GS7-87 a na čtyřech lokacích v okolí GS4-72.

Distribuce rychlostí šíření seismických vln, zobrazená v rychlostních řezech, charakterizuje především geomechanický stav horninového prostředí, tj. intenzitu rozpukání, případně míru degradace. Tyto anomální jevy se projevují lokálním snížením rychlosti šíření seismických vln a deformací rychlostního pole v kontrastu s monotónním rychlostním polem v neporušených částech HM.

2.7.4.1 Seismická tomografie

Na základě získaných rychlostních řezů a údajů z popisu vrtných jader byly sestaveny schematické interpretační řezy, které zhodnocují tomografická měření provedená na obou GS. Zachycená část HM je rozdělena podle hodnoty zjištěných seismických rychlostí na slabě porušenou horninu s průměrnou vzdáleností diskontinuit 200–600 mm a mírně porušenou horninu se vzdáleností diskontinuit 60–200 mm.

GS-L7

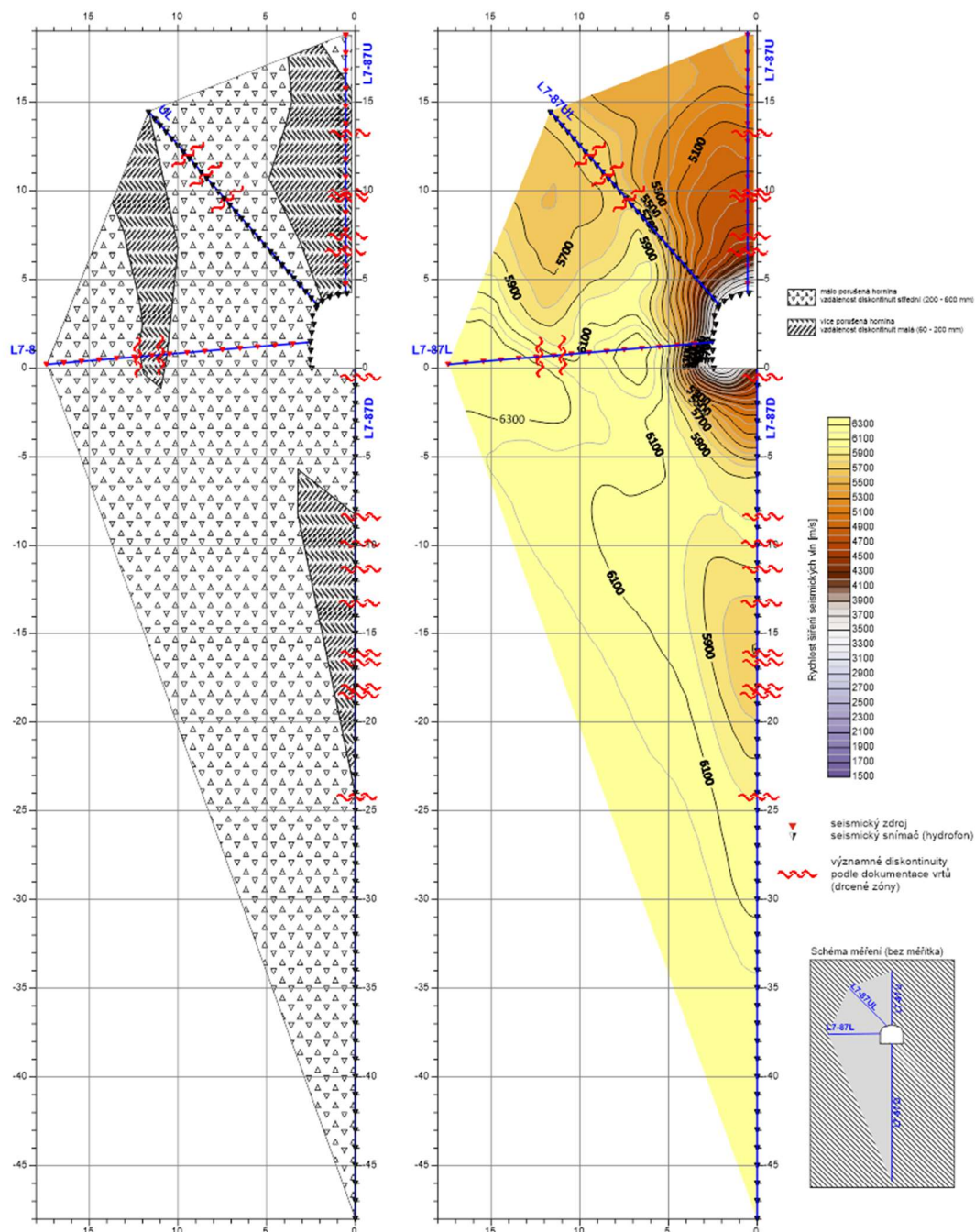
Rozložení rychlostí v řezu ukazuje na pokles jejich hodnot v nadloží klenby, tedy v řezu mezi vrty L7-87U a L7-87UL (Obr. 28, Elektronická příloha 21). Ve srovnání s dalšími dvěma řezy jsou rychlosti nižší o cca 10–15 %. Pokles seismických rychlostí v nadloží stropu podzemních chodeb či tunelů je obvyklý a je způsoben změnami v rozložení napětí HM v nadloží a jeho sekundárním porušením vlivem ražby. Ve vrtu L7-87U byly dokumentovány na několika místech výraznější rozpukané úseky.

V rychlostním řezu mezi vrty L7-87UL a L7-87L (Obr. 28, Elektronická příloha 21) je zachycena oblast snížených rychlostí (pod 5 700 m/s) v oblasti 9–10,5 hod ve vzdálenosti 9–13 m od líce levého boku stěny chodby L7. Ve schematické interpretaci (Obr. 28, Elektronická příloha 21) je tato oblast nízkých rychlostí propojena s pozicemi výraznějších diskontinuit (drcených zón) zachycených ve vrtu L7-87L v hloubce 8,5 a 9,8 m. Další oblast relativně více porušeného HM je interpretována v podloží chodby L7 v okolí vrtu L7-87D a je vázaná na indikaci snížených rychlostí v hloubce 11–24 m. V tomto úseku uvádí popis vrtného jádra několik výraznějších poruch.

Rychlostní tomografický řez získaný mezi vrty L7-87U a L7-90F (Obr. 28) ukazuje stav HM analogicky s řezem mezi vrty L7-87U a L7-87UL. Rychlostní pole v nadloží klenby vykazuje nižší úroveň, v blízkosti stropu chodby se pohybují hodnoty rychlostí kolem 5 000 m/s. Ještě výraznější snížení rychlostí ukazuje řez v prostoru čelby, který je patrný do vzdálenosti cca 3 m od stěny čelby. Jednoznačně se jedná o porušení indukované trhacími pracemi. Směrem do masivu se rychlosti zvyšují k obvyklým hodnotám nad 6 000 m/s.

GS-L4

Získaný rychlostní řez (Obr. 29) ukazuje na významný pokles seismických rychlostí v části HM mezi vrty L4-72L a L4-72UL. Minimum rychlostí lze pozorovat ve vzdálenosti – 9 m od líce levé stěny chodby, prostorově je lokalizováno mezi zmíněnými vrty v pozici 9–10 hodin. Výpočtové rychlosti klesají v místě největšího oslabení pod 5 000 m/s, což ukazuje na přítomnost intenzivně rozpukané horniny a lokálních tektonických poruch. Popis vrtných jader obou zmíněných vrtů uvádí na několika místech přítomnost drcených zón, RQD pak kolem 50 %. Výraznější diskontinuity – drcené zóny – prochází oblastí minima seismických rychlostí nebo v jeho blízkosti.

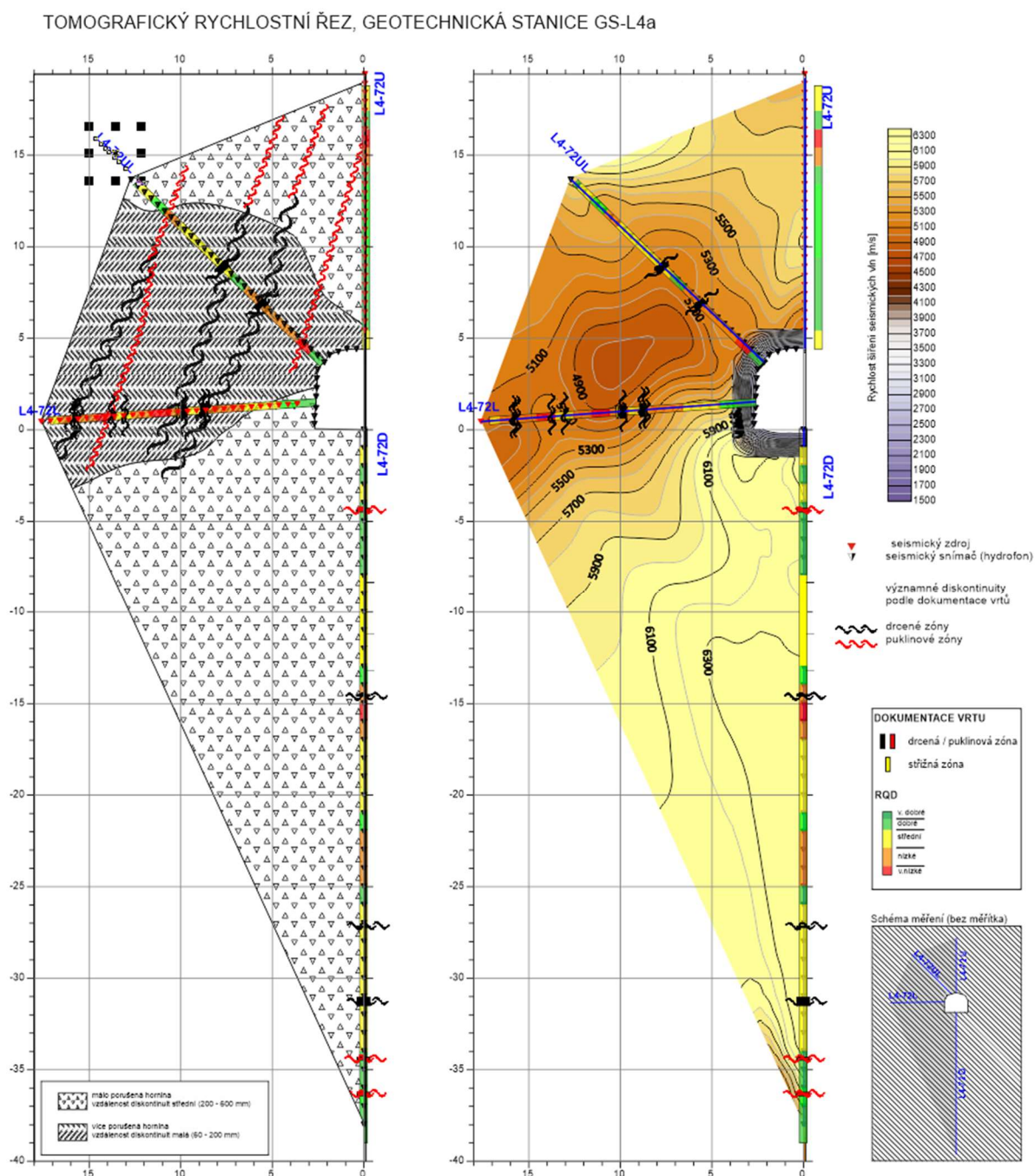


Obr. 28 Seismická tomografie mezi vrtů GS-L7: rychlostní tomografický řez a schematická interpretace

Směrem k nadloží klenby seismické rychlosti zobrazené v rámci řezu mezi vrtů L4-72UL a L4-72U narůstají (Obr. 29), HM je v tomto prostoru méně porušený než v řezu L4-72L a L4-72UL. Geologická dokumentace obou vrtů (RQD) toto potvrzuje. V okolí vrtu L4-72 jsou v rozmezí jeho metráží 2–11 m zastíženy vyšší seismické rychlosti (5 400–5 800 m/s), od staničení vrtu 11 m je patrný pokles rychlostí. Hlavní diskontinuity vedené z části mezi L4-72L a L4-72UL pokračují do nadloží chodby směrem k L4-72U, intenzita porušení v rámci interpretace klesá – drcené zóny se mění v puklinové zóny.

V rychlostním řezu mezi vrtů L4-72L a L4-72D (Obr. 29) jsou zjištěné seismické rychlosti nejvyšší v rámci získaných řezů. Od úrovně vrtu L4-72L směrem do hloubky rychle rychlosti

narůstají k hodnotám kolem 5 500 m/s (dosaženy v úrovni cca 3 m pod počvou chodby) a dále se zvyšují až k úrovni 6 300 m/s. Masiv v prostoru sledovaném tímto řezem je málo porušený, oslabení (rozpukání) popisované v dokumentaci vrtu L4-72D není tak četné jako u vrtů L4-72L a L4-72UL, větší část indikací je lokalizována v hloubce pod 30 m.



Obr. 29 Seismická tomografie mezi vrtů GS-L4a: rychlostní tomografický řez a schematická interpretace

2.7.4.2 Seismokarotáž

Seismokarotážní měření provedené ve všech vrtech obou GS je graficky prezentováno ve formě vrstevních rychlostních modelů, ty jsou součástí Elektronická příloha 21.

Získané modely zobrazují nárůst hodnot rychlostí šíření seismických vln s hloubkou – tedy vzdáleností od líce chodby. U vrtů pro GS-L7 je nejpozdvolnější gradient rychlosti v případě vrtu L7-87U, naopak velmi strmý je nárůst rychlostí v případě vrtu L7-87L. U dovrchního vrtu lze pozorovat ustálení hodnot rychlostí až za hloubkou 10 m, u ostatních k tomuto dochází dříve, obvykle mezi 4–6 m od ústí vrtů.

V prostoru GS-L4 nejnižší hodnoty modelových rychlostí vykazují výsledky pro vrt L4-72UL, pohybují se kolem 5 000–5 200 m/s, to odpovídá poznatkům tomografického řezu mezi vrtu L4-72UL a L4-72L. Horninové prostředí v okolí tohoto vrtu je intenzivně porušené a oslabené. Ve vrtu L4-72L jsou hodnoty rychlostí výrazně vyšší oproti L4-72UL díky přítomnosti málo porušených hornin v prostoru mezi L4-72L a L4-72D (které indikuje tomografický řez), tyto zasahují do blízkosti vrtu L4-72L. HM v okolí dovrchního vrtu L4-72U vychází jako málo oslabený (rychlosti mezi 5 600–6 000 m/s), což je v souladu s geologickou dokumentací. Vysoké hodnoty seismických rychlostí výrazně nad 6 000 m/s prezentuje modelový výsledek pro vrt L4-72D.

2.7.4.3 Vrtný georadar

Výsledky georadarového měření ve vrtech jsou zobrazeny graficky formou časových řezů s hloubkovým měřítkem. V řezech jsou vyznačeny oblasti výrazných odrazů, které reflektují přítomnost puklin, foliačních ploch nebo lokálních poruch (diskontinuit) v blízkosti vrtného stvolu. Měřicí systém je nestíněný a nefokusovaný (Obr. 30). Signál z vysílače tedy zahrnuje celý prostor v okolí vrtu – 4π geometrie. Zdroj anomálie nelze prostorově přesně lokalizovat, stanovit je možné pouze hloubku „centra“ anomálie (ve smyslu hloubka ve vrtu), úhlová souřadnice je neurčena.

Příklad georadarového řezu z vrtu je uveden na Obr. 30, všechny radarové řezy z jednotlivých vrtů se zakreslením interpretovaných nehomogenit jsou součástí Elektronická příloha 21.

Radarové indikace z měření ve vrtech geotechnické stanice ukazují zejména na přítomnost nehomogenit typu puklin či foliačních ploch. Lokalizace anomálií je vztažena k jejich středu (odpovídajícímu vrcholu difrakční hyperboly), i když jejich zvýraznění v časovém řezu je mnohdy formou širšího obdélníku. Převažují indikace objektů, které protínají vrtný stvol nebo jsou lokalizovány do jeho těsné blízkosti, patrné jsou ovšem i indikace, jejichž zdroj leží mimo blízké okolí vrtu. U takových indikací je vzdálenost od osy vrtu uvedena za lomítkem s prefixem „r“. K radarovým řezům jsou připojeny graficky některé výstupy z dokumentace vrtných jader příslušných vrtů, které obsahují pozice významných nehomogenit (drcených a puklinových zón), hodnotu RQD. Pro významné nehomogenity typu drcená zóna je vysoká korelace s georadarovými indikacemi.

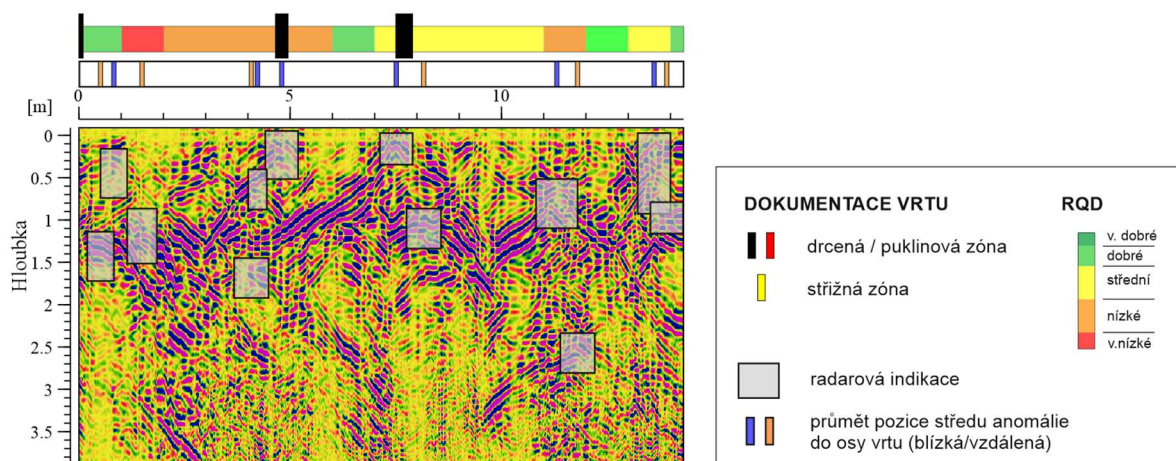
Výrazné nehomogenity charakteru puklin nebo případně i drcených zón ve vrtu L7-87D jsou interpretované ve staničeních (indikace přímo ve stěně vrtu) 0,4 m (drcená zóna), 4,7 m, 6,5 m, 8,7 m (drcená zóna), 10,0 m, 11,1 m (puklinová zóna), 13,2 m (puklinová zóna), 14,8 m, 16,2 m (puklinová zóna), 16,6 m (drcená zóna), 18,5 m (drcená zóna), 19,3 m, 21,1 m, 22,2 m, 24,6 m (širší drcená zóna), 25,6 m, 26,5 m, 27,3 m, 28,1 m, 34,1 m, 35,1 m, 36,7 m, 37,7 m, 39,7 m, 41,4 m, 43,6 m, 45,0 m. Vzdálenější anomálie jsou pak v pozicích: 5,5 m/r 1,1 m,

18,0 m/r 2,1 m, 24,2 m/r 1,8 m (v blízkosti širší drcené zóny), 25,7 m/r 2,25 m, 34,3 m/r 1,8 m, 35,0 m/r 3,2 m, 39,2 m/r 2,1 m, 43,5 m/r 2,4 m.

Indikace puklin v těsném okolí vrtu L7-87L jsou interpretovány ve staničeních 2,1 m, 2,8 m, 5,6 m, 8,6 m, 9,9 m (puklinová zóna), 10,8 m, 13,5 m. Vzdálenější indikace jsou zachyceny v pozicích 2,9 m/r 1,7 m, 7,3 m/r 3,0 m, 8,7 m/r 1,1 m, 12,7 m/r 0,6 m, 14,0 m/r 1,8 m.

Měření ve vrtu L7-87UL zachytilo indikace puklin v oblasti blízké stvolu vrtu ve staničeních 1,4 m, 5,9 m, 8,0 m (puklinová zóna). Další anomálie, více vzdálené, leží v pozicích 3,1 m/r 1,8 m, 4,2 m/r 0,7 m, 8,7 m/r 1,35 m, 9,6 m/r 1,2 m (indikuje blízkou puklinovou zónu), 9,3 m/r 2,2 m, 11,7 m/r 3,0 m, 13,6 m/r 1,0 m, 14,0 m/r 3,5 m.

Největší počet indikací je interpretován ve vertikálním dovrchním vrtu L7-87U. Porušení HM v okolí vrtu koreluje s výsledky ostatních geofyzikálních metod. V blízkosti vrtného stvolu leží indikace v pozicích 0,8 m, 2,0 m, 3,2 m (detekuje puklinovou zónu), 5,8 m (drcená zóna), 7,0 m, 9,2 m (puklinová zóna), 9,7 m, 10,7 m (puklinová zóna), 11,9 m, 13,9 m (puklinová zóna). Anomálie lokalizované mimo bezprostřední okolí vrtu jsou pak následující: 3,7 m/r 2,35 m, 4,2 m/r 1,3 m, 5,7 m/r 1,7 m, 6,4 m/r 3,1 m, 7,4 m/r 3,6 m, 8,8 m/r 0,8 m, 10,2 m/r 1,1 m, 11,2 m/r 2,2 m, 11,4 m/r 1,25 m, 12,2 m/r 2,8 m, 12,9 m/r 0,75 m.



Obr. 30 Georadarové měření ve vrtu L7-87U: časový radarový řez s interpretací

Výrazné nehomogenity charakteru puklin nebo případně i drcených zón ve vrtu L4-72D jsou interpretovány ve staničeních 0,4 m, 4,0 m (v blízkosti puklinové zóny), 7,0 m, 8,7 m (úzká drcená zóna), 10,0 m, 11,3 m (úzká drcená zóna), 13,6 m (úzká drcená zóna), 14,9 m (drcená zóna), 15,7 m, 16,1 m, 17,1 m, 19,7 m, 22,8 m, 24,6 m, 25,5 m, 27,8 m, 29,0 m, 31,3 m, 35,8 m, 36,7 m, 37,7 m, 39,7 m, 41,4 m, 43,6 m, 45,0 m. Výše uvedené indikace jsou lokalizovány přímo ve stěně vrtu nebo v její těsné blízkosti. Vzdálenější anomálie jsou pak v následujících pozicích: 5,3 m/r 1,6 m, 12,2/r 1,3 m, 13,6 m/r 2,4 m, 14,0 m/r 1,4 m, 18,4 m/r 1,9 m, 21,9 m/r 2,4 m, 26,0 m/r 2,2 m, 26,4 m/r 2,7 m, 28,2 m/r 1,8 m, 35,0 m/r 2,4 m, 37,0 m/r 2,4 m, 37,3 m/r 1,6 m.

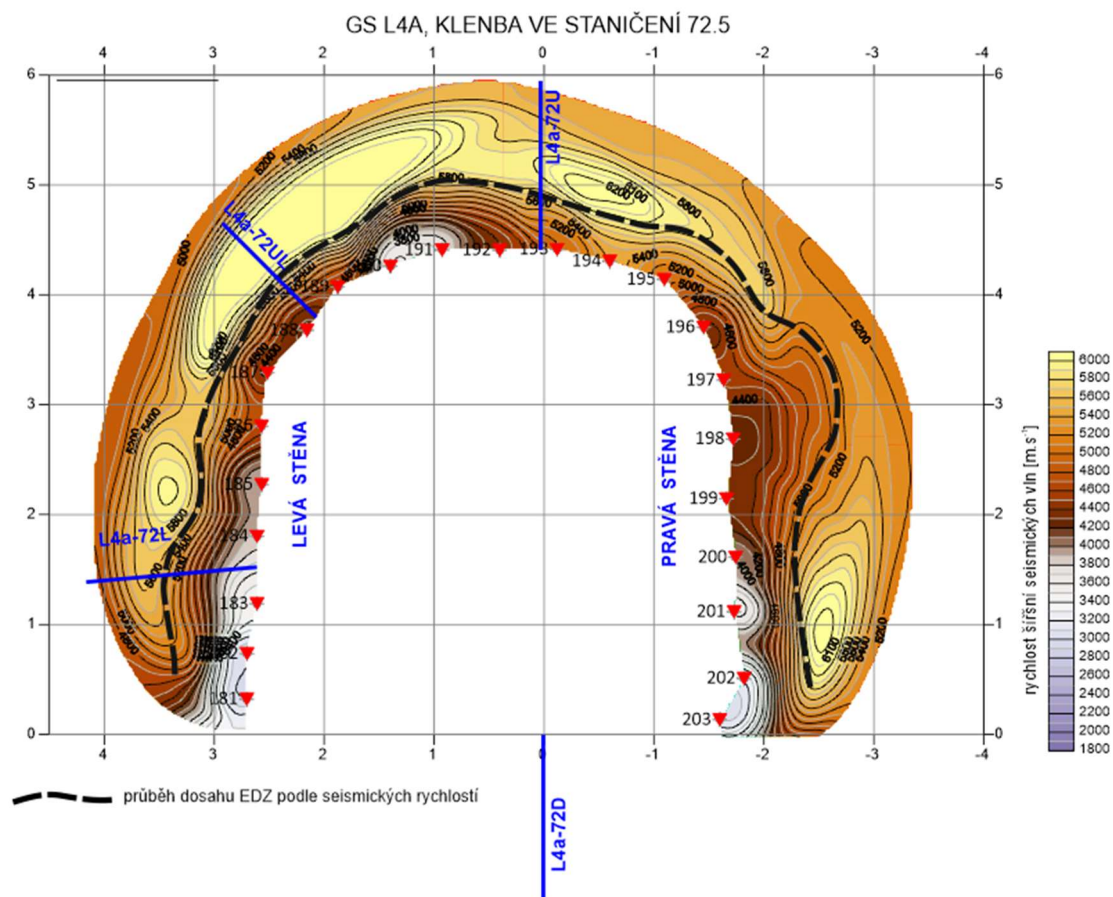
Indikace puklin v těsném okolí vrtu L4-72L jsou podle radarového řezu interpretovány ve staničeních 5,2 m, 6,2 m (odpovídá drcené zóně), 7,0 m (drcená zóna dle dokumentace), 8,6 m, 11,0 m, 12,8 m, 13,4 m. Vzdálenější indikace jsou pak zachyceny v pozicích 1,0 m/r 1,7 m, 8,4 m/r 2,7 m, 9,6 m/r 3,1 m.

Měření ve vrtu L4-72UL zachytilo indikace puklin v oblasti blízké stvolu vrtu v následujících staničích: 0,8 m, 4,2 m, 4,8 m (projev drčené zóny), 7,5 m (v pozici drčené zóny), 11,3 m, 13,6 m. Anomálie ležící ve větších vzdálenostech od osy vrtu jsou indikovány v pozicích: 0,5 m/r 1,4 m, 1,5 m/r 1,2 m, 4,1 m/r 1,7 m, 8,2 m/r 1,1 m, 11,8 m/r 2,6 m, 13,9 m/r 1,3 m.

Zjištěné indikace ve vertikálním dovrchním vrtu L4-72U v blízké oblasti do 0,5 m od osy vrtu jsou lokalizovány ve staničích: 0,8 m, 3,1 m, 4,6 m, 5,1 m, 8,4 m, 9,0 m, 11,6 m, 12,0 m, 12,5 m, 14,1 m. Anomálie lokalizované mimo nejbližší okolí vrtu jsou pak následující: 1,0 m/r 1,9 m, 2,9 m/r 1,9 m, 5,5 m/r 2,5 m, 8,1 m/r 2,1 m, 10,8 m/r 1,4 m, 11,5 m/r 2,3 m.

2.7.4.4 Lehká úderová seismika

Detailní seismická měření na stěnách laboratorní chodby v okolí vrtů geotechnických stanic GS-L7 a GS-L4 ukázala na stav HM v těsné blízkosti stěny důlního díla. Jednalo se o tři krátké průzkumné profily, dva z nich vedené kolmo na osu chodby přes její boky a klenbu, třetí profil pak sledoval části obou stěn v úseku 87,5–90 m společně s čelbou chodby.



Obr. 31 Lehká úderová seismika: rychlostní řez profilu vedeného klenbou chodby L4a ve staničích 72,5 m

Výsledky seismického měření jsou zpracovány do formy profilových řezů, ty jsou součástí Elektronická příloha 21, příklad seismického rychlostního řezu je prezentován na Obr. 31.

Rozložení seismických rychlostí podél klenby přináší představu u oslabení HM v blízkosti stěny do hloubky prvních několika decimetrů. Větší hloubkový dosah takto krátký profil (obvod klenby je kolem 11 m) nemůže dosáhnout. Jeho přínos je zejména v relativním srovnání porušení prostředí podél profilu. V rychlostním řezu na Obr. 31, a také v ostatních řezech v Elektronická příloha 21, je vyznačena čárkovaně hranice předpokládaného dosahu EDZ, která je stanovena podle rozložení rychlostního pole. Podrobnější popis a interpretace jsou uvedeny v ročních zprávách za rok 2022 (Bukovská et al. 2023) a za rok 2023 (Soejono et al. 2024).

V okolí GS-L7 na profilu klenbou ve staničení 87,5 m je patrné nejvyšší oslabení při patách obou boků a také v horní levé i pravé části. U profilu vedeného ve staničení 89,5 m lze sledovat hlubší dosah rozvolnění HM v pravém horním boku v přechodu stěna/klenba. U horizontálního řezu vedeného přes čelbu je patrná oblast nízkých seismických rychlostí v levé části čelby mezi přechodem levá stěna/čelba a vrtem L7-90F.

V místě GS-L4 na profilu klenbou ve staničení 72,5 m je patrné výraznější oslabení HM v pozici střední a vyšší části pravé stěny v pozici 2–3 h (intenzivně porušená hornina), podobně také v okolí vrtu L4-72L v pozici 8–9 h (cca 0,9 m). Oblasti málo porušené horniny ($v_p > 6\,000$ m/s) jsou patrné v pozicích 9–9,5 h (levá stěna), 10–12 h (levá část klenby) a navazující pravá část klenby v pozici 12–1,5 h.

Profil ve staničení 71,0 m je v hlavních rysech analogický výše popsanému blízkému profilu 72,5 m. Snížené rychlosti jsou zachycené ve větší vzdálenosti od líce stěny v pozici 1,5–2 h (pokles na úroveň 5 200 m/s) a v lokalizaci 11 h, zde je vyšší i mocnost EDZ. Slabě rozpukaný HM je vymezen v rozmezích pozic 3–4 h, 7,5–10 h a 11–1,5 h.

Rychlostní řez na profilu ve staničení 63,5 m ukazuje na vyšší oslabení horniny v prostoru klenby výrubu (pozice 11–1 h), a to i dále od stěny. V dílčí části 12–1 h oblast nižších rychlostí mizí a dále od líce výrubu hodnoty rychlostí přesahují 6 000 m.s. Vyšší hodnoty seismických rychlostí ukazují na málo porušený HM v úsecích 1–4 h, 8–11 h.

Profil na staničení 62,0 m ukazuje na oslabené úseky většího hloubkového dosahu v obou bocích chodby (v pozici 2–4 h vpravo a v pozici 8–10 h vlevo, lokálně v_p klesá až k 4 500 m/s). Mimo uvedené oslabené úseky je horninový masiv jen málo porušený, oblast vysokých seismických rychlostí zahrnuje prostor mezi 9,5–2,5 h.

2.8 Geofyzikální charakterizace

Charakterizace prostředí v okolí stěn nově vyražených chodeb s využitím geofyzikálních metod byla prováděna spolu se strukturněgeologickým a hydrogeologickým mapováním prakticky ihned po dokončení díla a zpřístupnění pracoviště. Výsledky komplexního průzkumu byly využity pro plánování pozice zkušebních komor. Zvolená škála geofyzikálních metod (seismická refrakční tomografie, odporová elektrická měření ERT a georadar) sledovala charakter a stav HM v blízkém okolí stěn sledovaných chodeb. Společnost INSET obstarala měření metodou seismické refrakční tomografie a georadarová měření, a to včetně jejich zpracování. Odporová elektrická měření metodou ERT zajistila firma SG Geotechnika, která zajistila také jejich zpracování. Společnou interpretaci geofyzikální charakterizace provedla firma INSET.

Přístrojové vybavení pro jednotlivé metody průzkumu a postupy zpracování jsou detailně popsány v první průběžné zprávě projektu (Bukovská et al. 2022). V průběhu projektu nebyly měřicí postupy ani zpracování významně modifikovány, menší úpravy reflektovaly aktuální situaci v jednotlivých laboratorních chodbách. V rámci provedených prací byly sledovány stěny všech realizovaných laboratorních chodeb, měření proběhlo také na stěnách pěti zkušebních komor ZK7 v laboratorní chodbě L7.

2.8.1 Georadar

Profilová měření georadarem jako součást setu průzkumných metod detekovala značné množství odrazů. To odpovídá vysoké heterogenitě prostředí, pro které je charakteristická střední nebo malá vzdálenost diskontinuit (puklin, foliačních ploch). Elektromagnetický signál reaguje na každou z těchto nehomogenit a vzniká tak velké množství reflexů. Zvýšená vlhkost na některých foliačních plochách nebo přítomnost elektricky vodivých minerálů (pyrit, pyrotin) jsou příčinou intenzivních reflexů, mnohdy s úplným odrazem energie, případně se vznikem násobných reflexů. Vysoký počet odrazů způsobuje komplikované registrované záznamy, které je nesnadné zbavit neužitečné části registrovaného signálu. Handicapem pro radarová měření na stěnách výrubu je jejich členitý povrch. To způsobuje změnu vzdálenosti mezi dipólem radarové antény a horninou, čímž se mění intenzita signálu, který reálně proniká do masivu. Získané radarové záznamy velmi dobře reagují na měrný elektrický odpor HM, v úsecích s vysokými elektrickými odpory jsou detekované reflexy četnější a odražený signál má vyšší amplitudy. Intenzivnější odezvu způsobily v některých případech lokální poruchové struktury.

2.8.2 Elektrická odporová měření

Elektrická odporová měření (ERT) byla prováděna s hloubkovým dosahem kolem 4–6 m, ten je určen maximální vzdáleností proudových elektrod A a B, takže pro délku profilu 90 m je možné teoreticky měřit s hloubkovým dosahem až 15–17 m ($AB/5$), ovšem ve větších hloubkách se objevují nestandardní měřené hodnoty elektrických odporů. To je způsobeno přítomností elektricky výrazně vodivější počvy tvořené zvodnělou rubaninou o mocnosti 0,5 m i více. Při větších vzdálenostech proudových elektrod jsou proudové linie stahovány do počvy a deformují významně měřené hodnoty. Nepříznivě působí také kolejnice na počvě chodby.

Rozčlenění HM podle velikosti měřeného měrného elektrického odporu se ukázalo jako velmi užitečné pro komplexní hodnocení a interpretaci. Zjištěný odporový obraz v kombinaci s rychlostním profilovým řezem (viz dále) umožnil dobře interpretovat stav HM v konkrétním úseku a rozhodnout o charakteru porušení. Pro identifikaci případného zvodnění v diskontinuitách jsou výsledky ERT zcela zásadní.

2.8.3 Mělká refrakční seismika

Hloubkový dosah měření je v případě seismických refrakčních profilových metod v daném prostředí kolem 4 m. Určující je pro něj zejména rychlostní gradient v prostředí a maximální použitá vzdálenost mezi zdrojem a přijímačem. Zvýšit hloubkový dosah je možné přidáním snímačů do několika horizontálních vrtů umístěných v rámci sledovaného profilu, při vhodné vzdálenosti mezi vrtů se pak maximální hloubkový dosah blíží hloubce vrtů.

Závislost rychlosti šíření podélných seismických vln na vzdálenosti mezi diskontinuitami v HM byla využita jako základní princip interpretace (menší vzdálenost mezi puklinami způsobuje pokles seismických rychlostí). Charakter průběhu seismické rychlosti se vzdáleností od stěny chodby byl využit k popisu rozsahu mocnosti EDZ (podrobně k tomuto v průběžné zprávě Bukovská et al. 2025 a také v podkapitole 3.3 této zprávy). Zjištěné hodnoty seismických rychlostí v okolí sledovaných laboratorních chodeb jsou jedním ze vstupních parametrů pro klasifikaci horninového bloku.

2.8.4 Výsledky geofyzikální charakterizace

Společná interpretace výsledků geofyzikálních měření je shrnuta graficky do formy interpretačního profilového řezu (Obr. 34), a to pro každou stěnu sledovaných chodeb. V řezu je vyznačen průběh hranice EDZ, který byl sestaven zejména podle gradientu rychlostního pole. Horninové prostředí je rozděleno na relativně kompaktní, slabě porušené úseky, ve kterých je vzdálenost diskontinuit v HM střední (600–200 mm) a na úseky mírně až středně porušené, kde je vzdálenost diskontinuit malá (200–60 mm). Ojediněle se objevuje HM s velkou vzdáleností diskontinuit (600–2000 mm), které charakterizují prakticky neporušené horninové prostředí. Členění horninového masivu bylo provedeno s využitím výsledků seismických refrakčních měření (rychlostní řez, Obr. 32), výsledků geoelektrického odporového profilového řezu získaného měřením metodou ERT (odporový řez, Obr. 33) a v souladu s výsledky georadarového měření. Výsledky odporových měření byly také vodítkem pro interpretaci oblastí s přítomností zvodnělých puklin, charakterizovaných snížením elektrického odporu, a to i v úsecích mimo zvodnění popsané v rámci hydrogeologického monitoringu (vyznačeno v řezech také pomocí modrého šrafování). Na pozadí interpretačních řezů je zobrazen petrografický popis formou barevné výplně a jsou také zakresleny pozice a označení významných struktur tak, jak jsou uvedeny ve strukturním 3D modelu (obojí převzato z výsledků strukturněgeologické dokumentace a výsledného modelu). Některé struktury, vymezené na základě geofyzikální charakterizace, nejsou v 3D modelu uvedeny, jedná se většinou o lokální poruchy s malým prostorovým dosahem a bez návaznosti na sousední chodby.

Nejdůležitější poznatky z jednotlivých etap geofyzikální charakterizace jsou shrnuty v následujících odstavcích. Pořadí popisovaných chodeb je voleno podle jejich názvu

vzestupně, což neodpovídá časové ose průzkumu jednotlivých děl. Všechny profilové a interpretační řezy získané v průběhu geofyzikálního průzkumu okolí laboratorních chodeb jsou uvedeny v Elektronická příloha 22.

Laboratorní chodba L4a

Úseky s interpretovanou přítomností slabě porušené horniny charakterizované střední vzdáleností diskontinuit (200–600 mm) jsou ve stěnách chodby vymezeny v následujících intervalech:

- levá stěna: 8–25 m, 34–49 m;
- pravá stěna: 11–19 m, 45–61 m, 66–75 m.

Velmi kompaktně se projevuje úsek ve staničení 45–61 m na pravé straně chodby, a to z hlediska výsledků odporového i seismického měření. Jeho protějškem na levé straně chodby je úsek staničení 34–49 m, kde jsou zachyceny vyšší seismické rychlosti a elektrické odpory. Kompaktně se také v levém boku chodby projevuje interval mezi metrážemi 8–25 m.

Oslabení masivu, které je podmíněno malou vzdáleností diskontinuit (60–200 mm), je naopak patrné v částech:

- levá stěna: 0–8 m, 25–34 m, 49–75 m;
- pravá stěna: 0–11 m, 19–45 m, 61–66 m.

Významné poruchy, některé se známkami zvodnění v diskontinuitách (dle odporového řezu), jsou interpretovány v levém boku na metrážích 8 m (SG2, indikace zvodnění), 29,5 m (SG3, indikace zvodnění), 32,5 m (SG7, indikace zvodnění), 40 m (SG8), 44 m (SG4, indikace zvodnění), 52 m (SG6), 53,5 m (SG9), 57 m (SG5), 65,4 m (SG12). V případě pravého boku se pak jedná o indikace ve staničení 8 m (SG2, indikace zvodnění), 24 m (SG3, indikace zvodnění), 33,5 m (SG7, indikace zvodnění), 38 m (SG8, indikace zvodnění), 39 m (SG4, indikace zvodnění), 39 m (SG9), 65,5 m (SG12). Pro struktury vymezené geologickým mapováním na pozicích 48,5 m (SG6), 49 m (SG5) jsou geofyzikální indikace slabé jak v elektrickém odporovém, tak v seismickém rychlostním řezu.

Laboratorní chodba L4b

Podle geofyzikálního měření na stěnách chodby je mírně porušený HM (vzdálenosti diskontinuit 200–600 mm) zastižen na stěnách chodby v následujících intervalech:

- levá stěna: 36–61 m;
- pravá stěna: 12–23 m, 40–61 m.

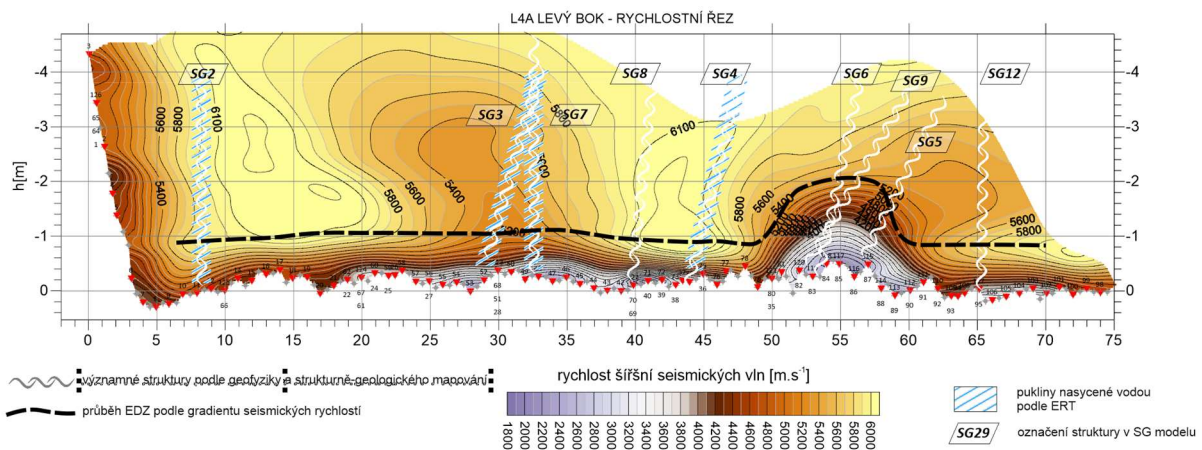
Jako málo porušený se jeví zejména úsek ve staničení 40–60 m v obou bocích, a to z hlediska výsledků odporového i seismického měření.

Oslabení masivu je naopak patrné zejména v úseku mezi metrážemi 23–36 m na obou bocích, kde jsou indikovány snížené seismické rychlosti a elektrické odpory. Detailněji jsou úseky s malou vzdáleností diskontinuit (60–200 mm), vyznačené jako středně porušené, lokalizovány do intervalů metráží:

- levá stěna: 0–36 m, 61–75 m;
- pravá stěna: 0–12 m, 23–40 m, 60–75 m.

Projevy hlavních poruchových struktur jsou v profilových řezech interpretovány v levém boku chodby ve staničeních 6 m (SG3, indikace zvodnění 3), 8 m (SG2, indikace zvodnění), 20 m

(není v modelu), 25,5 m (SG4, indikace zvodnění), 34 m (SG6), 35 m (SG7, indikace zvodnění), 58 m (SG11), 64 m (SG12, indikace zvodnění), 72,5 m (SG10). Na pravé stěně chodby se jedná o struktury v pozicích 1–3 m (několik struktur, nejsou v 3D modelu, indikace zvodnění), 8 m (patrně doprovodné porušení v blízkosti SG2), 9 m (SG2, indikace zvodnění), 22 m (SG4, indikace zvodnění), 30 m (SG6, indikace zvodnění), 36,5 m (SG7, indikace zvodnění), 55 m (SG11, bez indikace v odporovém a rychlostním řezu), 64 m (SG12), 72 m (SG35).



Obr. 32 Laboratorní chodba L4a, levý bok: výsledky refrakční seismiky ve variantě povrchové refrakční tomografie, profilový rychlostní řez s interpretací

Laboratorní chodba L4c

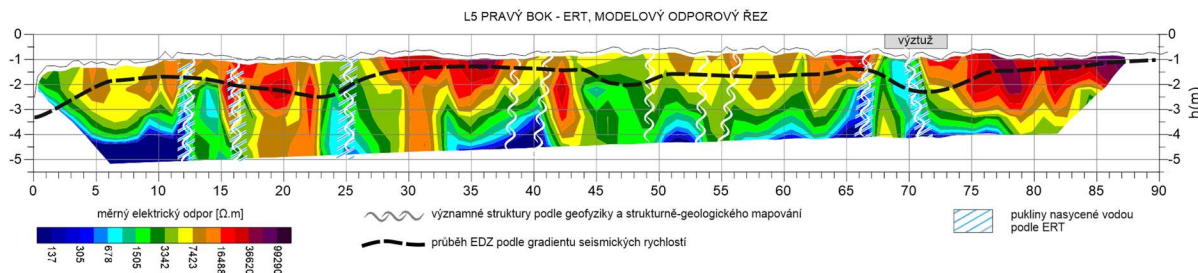
Celkově je okolí chodby jen slabě porušené, kompaktní HM (se střední a velkou vzdáleností diskontinuit) podél stěny chodby byl zachycen v úsecích:

- levá stěna: 0–12 m;
- pravá stěna: 4–12 m.

Oslabení horniny je indikováno v pravé stěně v rozmezí 0–4 m, navazuje na porušený úsek chodby L4a ve staničení 19–45 m jejího pravého boku. V tomto úseku jsou také patrné lokální poruchy SG6 a SG5, další pak v levé stěně při metráži 2 m (SG10).

Laboratorní chodba L4d

Okolí této krátké chodby je převážně jen mírně porušené (seismické rychlosti převyšující 7 000 m/s). Kompaktní masiv se střední či velkou vzdáleností puklin (200–600 mm a 600–2 000 mm) je interpretován v obou bocích v celé délce 0–12 m. Projevy lokálních poruch jsou patrné v metrážích 3,5 m (SG11) a 6 m (SG10) na levém boku, v pravém boku pak indikace na staničení 5 m (SG10), částečně také v prostoru staničení 9–12 m struktura SG11.



Obr. 33 Laboratorní chodba L5, pravý bok: výsledky odporového měření metodou ERT, profilový odporový řez s interpretací

Laboratorní chodba L5

Podle výsledků získaných geofyzikálními metodami byly vymezeny intervaly s výskytem mírně porušené horniny charakterizované střední vzdáleností diskontinuit (200–600 mm). Jedná se o následující intervaly:

- levá stěna: 23–44 m, 51–60 m, 71–90 m;
- pravá stěna: 23–44 m, 51–65 m, 76–90 m.

Velmi kompaktně se projevuje úsek ve staničení 23–44 m na obou stranách, a to z hlediska výsledků odporového i seismického měření.

Oslabení masivu je naopak patrné zejména v úseku mezi metrážemi 65–71 m, ve kterém také došlo ke ztížení podmínek pro ražbu. Úseky hodnocené jako středně porušené s malou vzdáleností diskontinuit (60–200 mm) jsou tyto:

- levá stěna: 0–23 m, 44–51 m, 60–71 m;
- pravá stěna: 0–23 m, 44–51 m, 65–76 m.

Významnější poruchy s indikacemi zvodnění v levém boku jsou patrné na metrážích 10 m (nezahrnuta do 3D modelu), 13,5 m (SG4, indikace zvodnění), 17,5 m (SG6), 23 m (SG36, indikace zvodnění), 40 m (SG13, indikace zvodnění, v rychlostním řezu bez indikace), 45,5 m (SG15, indikace zvodnění), 49 m (není v modelu), 58 m (není v modelu), 66 m (SG7, indikace zvodnění), 68 m (SG19, indikace zvodnění). V případě pravého boku se jedná o staničení 12,5 m (SG4, indikace zvodnění), 16 m (SG6, indikace zvodnění), 25 m (SG36, indikace zvodnění, v rychlostním řezu bez indikace), 38,5 m (SG13, v rychlostním řezu bez indikace), 41,5 m (SG15, v rychlostním řezu bez indikace), 67,5 m (SG19, indikace zvodnění), 70 m (SG7, indikace zvodnění).

Laboratorní chodba L6

Na základě získaných rychlostních, odporových a georadarových profilových řezů byly vymezeny intervaly s výskytem slabě porušené horniny v okolí stěny chodby charakterizované střední vzdáleností diskontinuit (200–600 mm). Jedná se o následující intervaly:

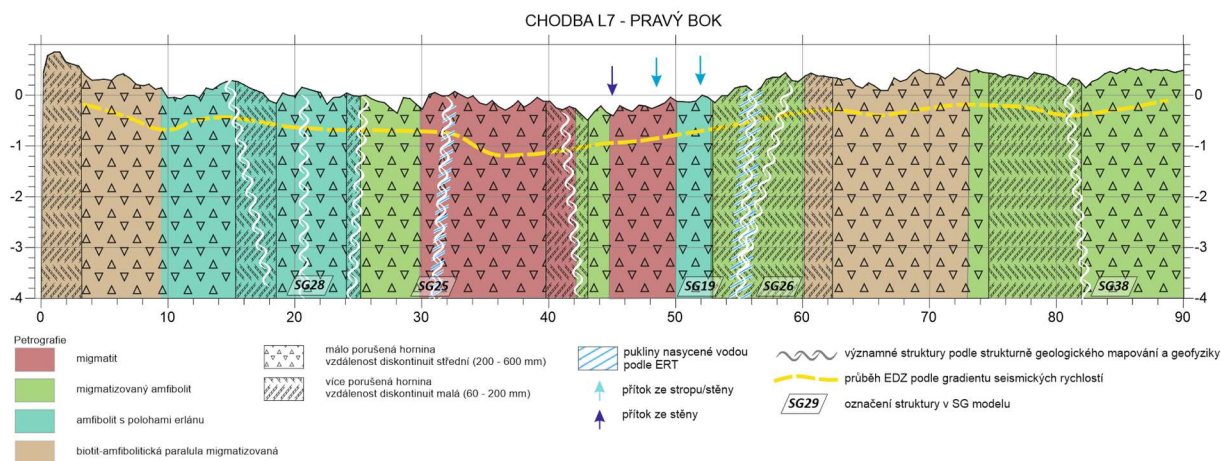
- levá stěna: 18–24 m, 60–90 m;
- pravá stěna: 10–16 m, 23–29 m, 35–39 m, 48–55 m, 65–90 m.

Zejména úsek v rozmezí staničení 65–90 m se jeví jako velmi kompaktní, a to z hlediska výsledků odporového i seismického měření.

Výraznější oslabení je patrné v úseku 50–60 m v levém boku, jeho obdobou je v pravém boku úsek 55–65 m. Přítomnost středně porušeného HM, který lze charakterizovat malou vzdáleností diskontinuit, je vymezena do úseků:

- levá stěna: 0–18 m, 24–60 m;
- pravá stěna: 0–10 m, 16–23 m, 29–35 m, 39–48 m, 55–65 m.

Přítomnost poruchových struktur, v některých případech se známkami zvodnění, je na profilových řezech patrná v levém boku v metrážích 4,5 m (není v 3D modelu), 18 m (není v 3D modelu), 31,2 m (SG23-1), 38,5 m (SG23-2, indikace zvodnění) 46 m (není v 3D modelu), 59 m (SG19, indikace zvodnění), 59,2 m (SG38, indikace zvodnění), 79 m (SG26). V rámci sledování pravého boku se jedná o struktury ve staničeních 21,2 m (SG23, indikace zvodnění) 46 m (není v 3D modelu), 59 m (SG19, indikace zvodnění), 61 m (SG38, indikace zvodnění), 71,7 m (SG26).



Obr. 34 Laboratorní chodba L7, pravý bok: svodný interpretační řez sestavený podle výsledků geofyzikální charakterizace, strukturněgeologického mapování a hydrogeologického monitoringu

Laboratorní chodba L7

Rozdělení HM podle intenzity porušení stanovilo přítomnost slabě porušené horniny charakterizované střední vzdáleností diskontinuit (200–600 mm) v následujících intervalech:

- levá stěna: 5–14 m, 18–23 m, 25–42 m, 49–53 m, 59–65 m, 68–75 m, 78–90 m;
- pravá stěna: 3–15 m, 19–24 m, 25–40 m, 43–53 m, 62–75 m, 82–90 m.

Ostatní úseky sledovaných stěn laboratorní chodby jsou pak narušené více, vzdálenost diskontinuit je v těchto částech malá (60–200 mm). Výčet úseků podle staničení chodby je následující:

- levá stěna: 0–5 m, 14–18 m, 23–25 m, 42–49 m, 53–59 m, 65–68 m, 75–78 m;
- pravá stěna: 0–3 m, 15–19 m, 24–25 m, 40–43 m, 53–62 m, 75–82 m.

Projevy významnějších struktur v profilových řezech jsou zachyceny v prostoru levého boku chodby ve staničeních 16 m (není v 3D modelu), 21 m (SG28), 31 m (SG25), 42 (není v 3D modelu), 47 m (není v 3D modelu, indikace zvodnění), 54–56 m (SG19, indikace zvodnění), 62 m (SG26), 68 m (není v 3D modelu), 79 m (SG38), 83 m (SG29). V pravém boku chodby jsou indikace struktur patrné na metrážích 15 m (není v 3D modelu), 21 m (SG28), 25,5 m

(není v 3D modelu), 32 m (SG25, indikace zvodnění), 41 m (není v 3D modelu), 56 m (SG19, indikace zvodnění), 59 m (SG26), 81 m (SG38).

Laboratorní chodba L8

Výskyt slabě porušené horniny charakterizované střední vzdáleností diskontinuit (200–600 mm) byl lokalizován na základě profilových řezů získaných geofyzikálními metodami v následujících úsecích staničení:

- levá stěna: 3–10 m, 15–38 m, 41–48 m, 57–68 m, 71–80 m;
- pravá stěna: 15–21 m, 26–54 m, 60–66 m, 72–90 m.

Úseky, ve kterých je vzdálenost diskontinuit malá (60–200 mm) a hornina je zde mírně oslabená, jsou na základě geofyzikální charakterizace vymezeny v úsecích:

- levá stěna: 0–3 m, 10–15 m, 38–41 m, 48–57 m, 68–71 m, 80–90 m;
- pravá stěna 0–15 m, 21–26 m, 42–45 m, 54–60 m, 66–72 m.

Projevy tektonických struktur zanesených do 3D strukturněgeologického modelu a dalších poruch jsou s ohledem na výsledky odporových i seismických měření interpretovány v levém boku ve staničeních 13 m (SG28), 20 m (SG32), 22,5 m (SG25, indikace zvodnění), 33 m (SG26), 38 m (není v 3D modelu), 55 m (SG19, indikace zvodnění), 72 m (SG30), 88 m (SG34). Na pravé stěně chodby ukazují výsledky průzkumu na indikace v metrážích 12,5 m (SG28), 13,5 m (SG32), 21,5 m (SG25, indikace zvodnění), 29,5 m (SG26), 44 m (není v 3D modelu), 56 m (SG19, indikace zvodnění), 70,5 m (SG30), 88,5 m (SG34).

Chodba V5-6

Chodba V5-6 prochází převážně slabě porušenou horninou s převládající vzdáleností diskontinuit 200–600 mm. Intenzivněji porušené horniny jsou zachycené v okolí významnějších struktury SG7, a to v levém boku v úseku 11–18 m, v pravém boku v části 0–12 m. Ostatní struktury zmiňované 3D strukturněgeologickým modelem jsou indikovány slabě pouze v odporových řezech, v levém boku se jedná o staničení 24 m (SG23-1), 29,5 m (SG23-2), v pravém boku pak v metrážích 26 m (SG23-1) a 31 m (SG23-2).

Chodba V7-8

V pravém boku větrací chodby V7-8 je HM hodnocený jako slabě narušený se střední vzdáleností diskontinuit (200–600 mm) v celé délce úseku v rozmezí 0–34 m. Nižší rychlosti jsou patrné pouze ve větší vzdálenosti od stěny větrací chodby (cca 6–8 m) v prostoru mezi chodbami L7 a L8. Indikace významnějších struktur jsou v rychlostním i odporovém řezu slabé (SG31 na 16,5 m, SG30 na 25 m). Levý bok sledované větrací chodby V7-8 je podle získaného rychlostního řezu více porušený. Bloky slabě porušeného HM v úsecích 2–15 m a 20–34 m jsou přerušeny oslabenou zónou ve staničení 15–20 m (SG30 a SG31). SG31 vede ve směru od stěny do masivu a směrem k L8, SG 30 směřuje ke konci L7. Rovněž v rozmezí staničení 0–2 m je HM oslabený, porušení pokračuje podél pravého boku chodby L7 (SG38), stáčí se směrem k L8.

Zkušební komory v laboratorní chodbě L7

Po vyražení všech 5 zkušebních komor v prostoru laboratorní chodby L7 byla provedena geofyzikální charakterizace na stěnách těchto komor. Cílem bylo sledovat porušení HM v blízkosti stěn komor způsobené ražbou, vymežit jeho dosah a porovnat je pro jednotlivé ZK (při ražbě jednotlivých ZK byly použity různé postupy provádění trhacích prací). Zjištěný rozsah

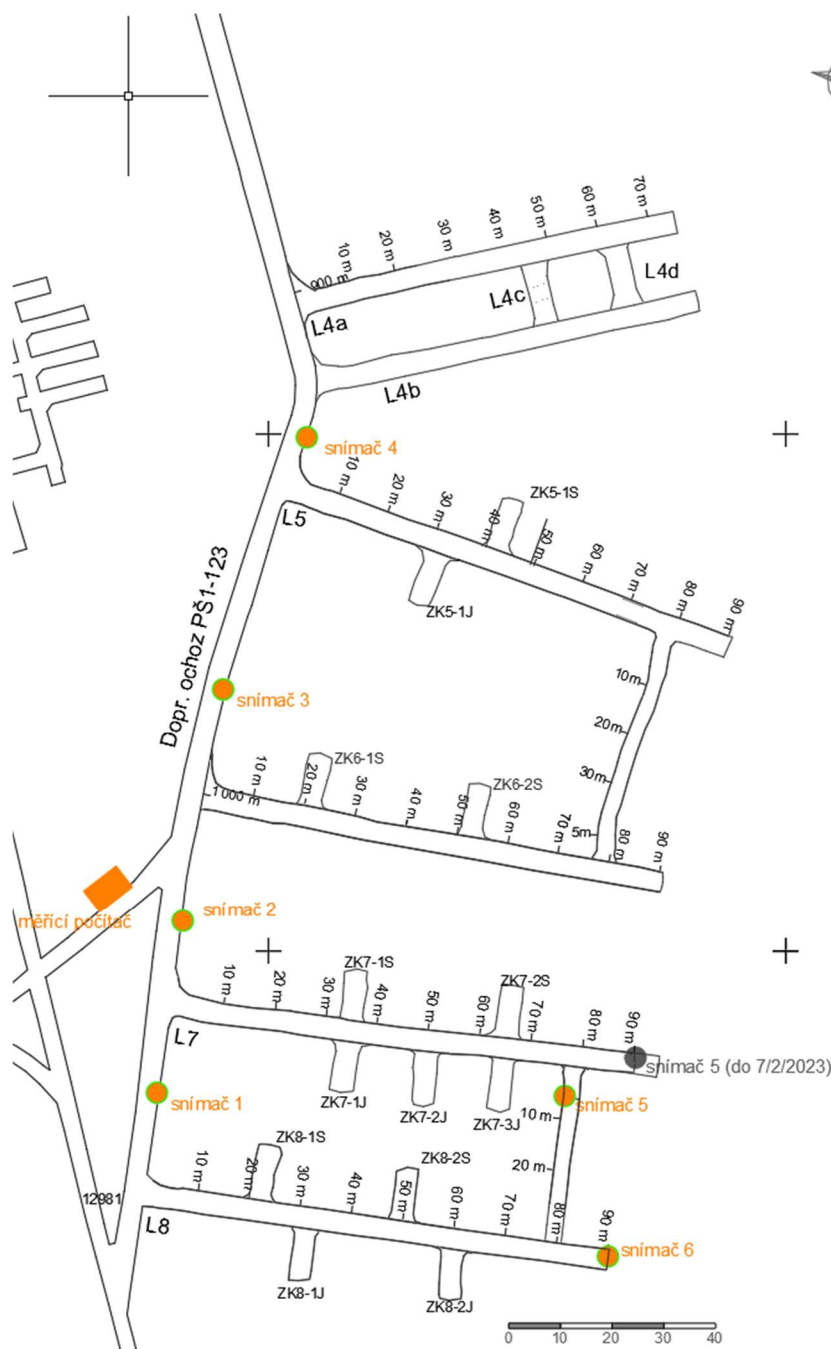
zóny EDZ byl stanoven podle průběhu seismických rychlostí a jejich gradientu ve sledovaných částech HM (postup zpracování je podrobně popsán ve třetí průběžné zprávě projektu – Soejono et al. 2024). Výsledky charakterizace rozsahu EDZ v jednotlivých komorách shrnuje Tab. 9, podrobně je pak zpracování úlohy včetně profilových řezů jednotlivých průzkumných metod a souhrnného interpretačního řezu uvedeno v Elektronická příloha 23.

Tab. 9 Souhrn statistického zhodnocení mocnosti EDZ ve stěnách jednotlivých zkušebních komor

	N	min	max	rozpětí	průměr	medián	1.kvartil	3.kvartil	SD
ZK7-1S	148	0,31	1,80	1,49	1,13	1,14	0,84	1,36	0,34
ZK7-2S	150	0,26	2,07	1,81	0,93	0,90	0,56	1,24	0,45
ZK7-1J	170	0,89	1,96	1,07	1,38	1,39	1,16	1,63	0,28
ZK7-2J	199	0,84	1,97	1,13	1,31	1,23	1,05	1,45	0,31
ZK7-3J	193	0,60	1,96	1,36	1,16	1,12	0,87	1,43	0,36

2.9 Seismické účinky trhacích prací

Trhací práce produkují seismické vlny s vysokou amplitudou a se širokým spektrem frekvencí, které je závislé na vlastnostech rozpojovaného materiálu, vlastnostech trhaviny a především na technologii trhacích prací. Měření účinků trhacích prací probíhá formou sledování rychlosti kmitání pomocí třísložkových snímačů – geofonů. Výstupem měření je časový záznam této veličiny pro všechny složky použitých geofonů. S rostoucí vzdáleností mezi snímačem a místem odstřelu klesají registrované amplitudy, dochází ke změnám ve frekvenčním spektru záznamu – maxima frekvenčního spektra se posunují do nižších frekvencí. Znalost závislosti útlumu rychlosti kmitání na vzdálenosti umožňuje stanovit bezpečný odstup mezi zdrojem energie a stavební konstrukcí a vyhnout se tak škodám.



Obr. 35 Umístění snímačů pro monitorování seismických účinků trhacích prací

2.9.1 Měření seismických účinků trhacích prací

Sledování seismických účinků trhacích probíhalo během provádění ražeb v období od března 2021 do dubna 2024, nejprve s registrací na 4 místech (do konce srpna 2021), dále na 6 pozicích. Pozice všech třísložkových seismických snímačů je zřejmá z Obr. 35.

2.9.2 Vyhodnocení záznamů seismických účinků trhacích prací

Zpracování záznamů v první fázi představuje určení maximální hodnoty rychlosti kmitání s odpovídající frekvencí maximálního kmitu. Tyto hodnoty jsou vyčísleny pro:

- každou zaznamenanou složku snímače,
- pro vybraný časový stupeň jednotlivého odstřelu v každé složce,
- pro každou zaznamenanou složku snímače s omezením horní frekvence 2 000 Hz,
- pro vybraný časový stupeň jednotlivého odstřelu v každé složce s omezením horní frekvence 2 000 Hz.

Filtrace záznamů rychlostí kmitání mírně mění hodnoty maximálních kmitů – může tyto snížit i zvýšit. To závisí na tom, v jakém fázovém posunu jsou vůči sobě jednotlivé frekvenční složky záznamu. V rámci sledovaného balíku záznamu byly tyto změny ovšem obvykle velmi malé, méně než 1 mm.s⁻¹ při amplitudách v desítkách až stovkách mm.s⁻¹. Při větších rozdílech mezi maximálními hodnotami podle filtrovaných a nefiltrovaných záznamů je zohlednění vyšší maximální hodnoty bezpečnější. Vyhodnocené hodnoty jsou spolu s pozicí TP (staničením příslušné čelby) zaznamenány do přehledu (tabulky). Grafické výstupy zpracování seismických záznamů představují souhrnný seismogram pro všechny registrované kanály, časové průběhy rychlosti kmitání pro každý snímač na jeho třech složkách (vertikální, podélná, příčná; Obr. 37.), grafy závislosti rychlosti kmitání na vzdálenosti od odstřelu pro jednotlivé chodby, zpracování dle ČSN 73 0040, plošné mapy distribuce rychlosti kmitání (Obr. 38). Vyhodnocené záznamy, grafy a plošné mapy jsou součástí Elektronická příloha 24.

Hodnocením účinků trhacích prací se zabývá technická norma ČSN 73 0040 – Zatížení stavebních objektů technickou seizmicitou a jejich odezva. P vibračním prostředím vychází ze stanovení konstanty přenosu K . Její hodnoty jsou závislé na typu prostředí a vzdálenosti od zdroje (místa odstřelu). Znalost konstanty přenosu K a závislosti rychlosti kmitání na vzdálenosti umožňuje predikovat seismické zatížení prostředí, konstrukcí či objektů v různých vzdálenostech od zdroje energie s využitím zákona útlumu seismických vln.

Zákon útlumu seismických vln lze popsat vztahem:

$$v_{max} = K \cdot \frac{\sqrt{Q}}{l} \quad (2)$$

kde:

K	konstanta přenosu [kg ^{-1/2} m ² s ⁻¹]
v_{max}	maximální rychlost kmitání [mm.s ⁻¹]
Q	hmotnost nálože resp. ekvivalentní normová hmotnost [kg]
l	vzdálenost od těžiště odstřelu [m]

Používána je někdy tzv. redukováná vzdálenost L_R [$\text{m.kg}^{-1/2}$], definovaná jako:

$$L_R = \frac{l}{\sqrt{Q}} \quad (3)$$

Redukovaná vzdálenost tedy zohledňuje kromě vzdálenosti také hmotnost použité trhaviny. To může být výhodné, pokud bychom srovnávali odstřely s různými hmotnostmi nálože. Pak je tedy možné psát:

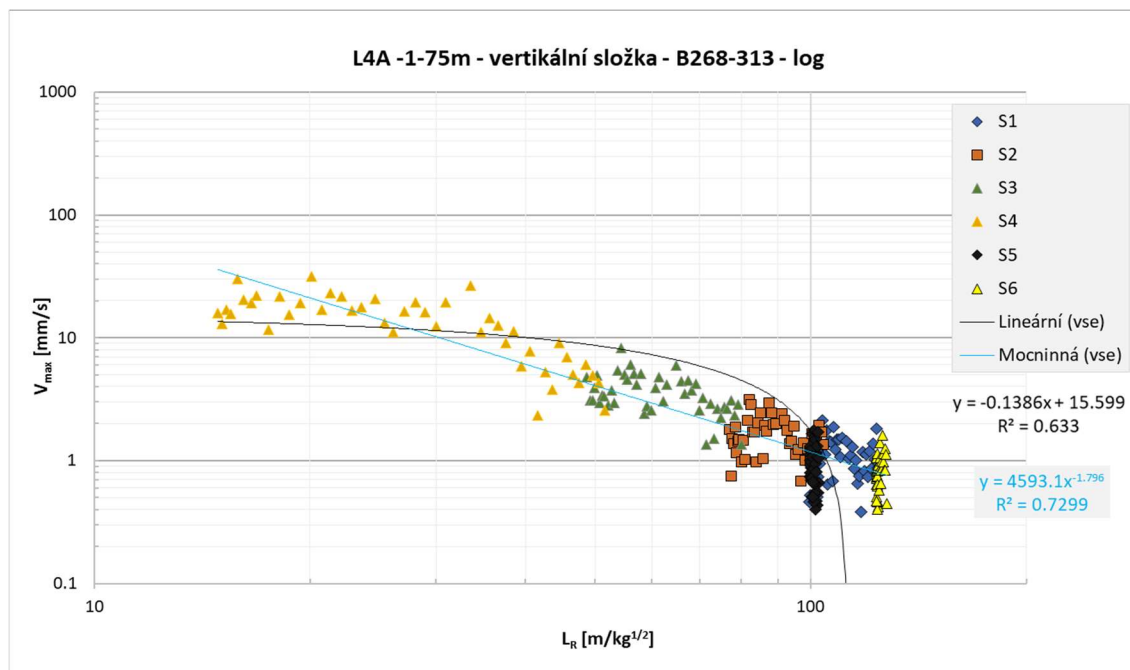
$$v_{\max} = \frac{K}{L_R} \quad (4)$$

Poslední rovnici je možné prezentovat graficky jako závislost rychlosti kmitání $v_{\max}$ na redukové vzdálenosti L_R případně jako graf závislosti koeficientu K na redukové vzdálenosti L_R . Znalost této závislosti umožňuje upravit hmotnost nálože tak, aby seismické zatížení prostředí, konstrukcí či objektů v dané vzdálenosti od zdroje energie (výbuchu) nepřesáhlo stanovené limity (Kaláb 2007). Tento vztah může být velmi dobře definovaný, ale ve složitých geologických poměrech může mít velmi nízkou korelaci (Kaláb 2011).

Příkladem dobré korelace vztahu mezi rychlostí a redukovanou vzdáleností je sledování účinků trhacích prací při ražbě laboratorní chodby L4a (Obr. 36). Lépe je zde závislost určena při použití mocninné regrese, u lineární regrese je těsnost o něco slabší. Mocninná regrese je těsnější v případě většiny sledovaných souborů odstřelů pro celky typu chodeb a komor, v některých případech je ale výhodnější lineární regrese. Výčet zjištěných koeficientů determinace je uveden v tabulce 8. Poměrně vysoké hodnoty R^2 byly zjištěny pro chodby L4c, L4d. To může souviset s relativně stabilním prostředím z hlediska geologie v celé délce chodeb, roli hraje také větší vzdálenost snímačů od místa odstřelu. Ovšem i blízké laboratorní chodby L4a a L4b mají dobře definovanou závislost při použití mocninné regrese. Zejména u chodby L4b je to významné, protože zde byly použity odstřely s malou hodnotou L_R , tedy s malou vzdáleností mezi zdrojem energie a snímačem, vztah mezi $v_{\max}$ a L_R může být volnější (Kaláb 2011). V některých případech je ovšem závislost určena velmi volně, v případě laboratorních chodby L7 (graf v Elektronická příloha 24) může být příčina právě v absenci malých vzdáleností mezi odstřelem a snímačem (sledování u této chodby začalo od staničení 50 m). Nejslabší korelace pak vykazují závislosti u chodby L8, kde jsou patrné velké rozptyly hodnot rychlostí kmitání v relativně malém rozmezí vzdáleností, to může ukazovat na variabilitu jednotlivých odstřelů.

Příklad vypočtených hodnot konstanty přenosu K je uveden v Elektronická příloha 24.

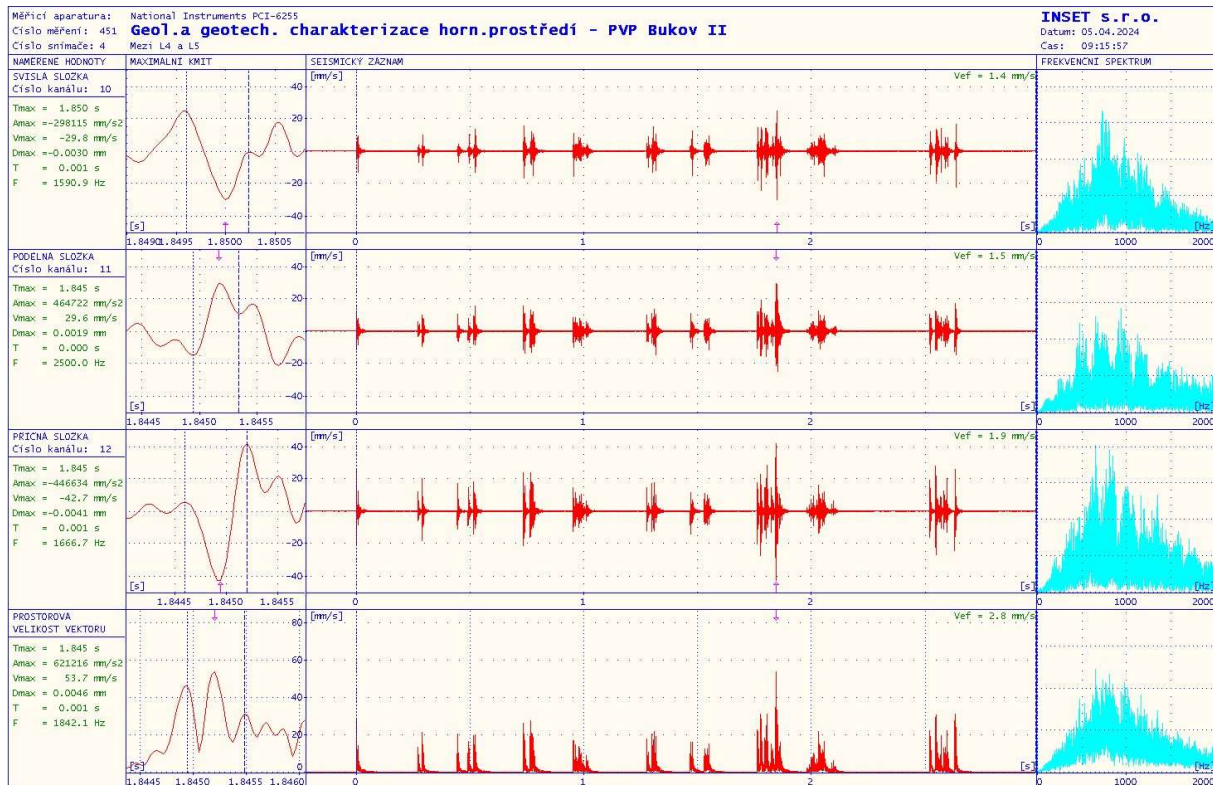
Sledování a zpracování velkého počtu měření rychlostí kmitání od mnoha odstřelů přináší dobré podklady pro predikci šíření seismických vln způsobených trhacími pracemi a umožňuje odhad maximální rychlosti kmitání v dané vzdálenosti od zdroje. Velký soubor naměřených dat je méně citlivý k nahodilým anomálním jevům, které mohou vzniknout na straně odstřelu či snímače. Je také přínosné, že hledaná závislost mezi maximální rychlostí kmitání $v_{\max}$ a vzdáleností L (či redukovanou vzdáleností L_R) je stanovena v širokém rozmezí hodnot L .



Obr. 36 Závislost maximální rychlosti kmitání v_{max} na redukované vzdálenosti L_R (logaritmická škála) pro snímače 1–6, metráž 1–75 m. Vertikální složka, nálož s časovým stupněm 0 (4 ks, 2400 g), chodba L4a

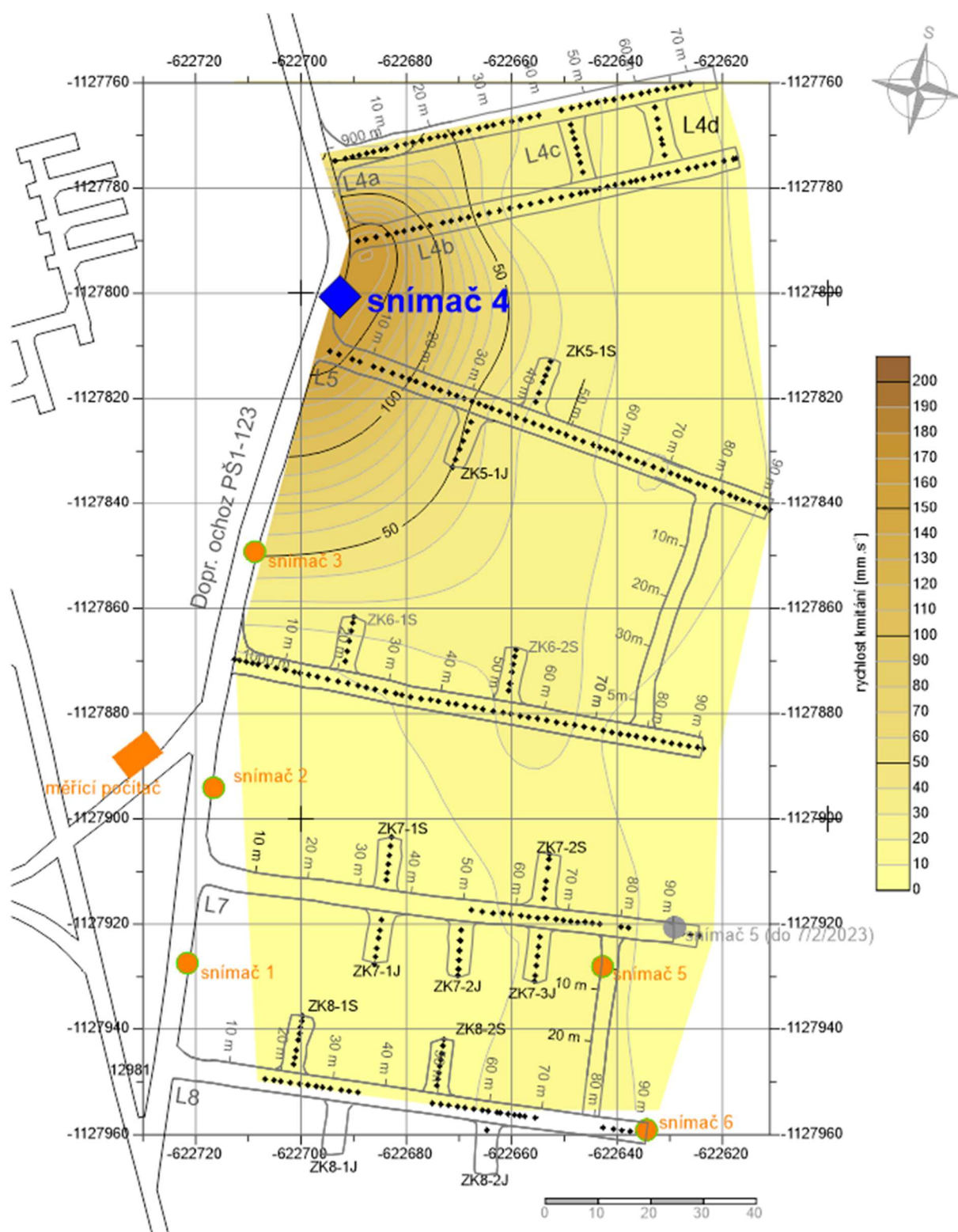
Tab. 10 Srovnání těsnosti závislosti maximální rychlosti kmitání v_{max} na redukované vzdálenosti L_R pro sledované laboratorní chodby a zkušební komory. Míra kvality regresního vztahu je určena koeficientem determinace R^2 ($R^2 = 1$ odpovídá dokonalé predikci hodnot závislé proměnné v_{max})

objekt	úsek	R^2 , lineární regrese	R^2 , mocnná regrese	L_{RMIN} [m.kg ^{-1/2}]	L_{RMAX} [m.kg ^{-1/2}]
L4a	0–75	0,633	0,730	14,9	127,6
L4b	0–75	0,395	0,796	5,6	129,4
L4c	0–12	0,807	0,863	32,1	124,4
L4d	0–12	0,798	0,835	42	126
L5	0–90	0,405	0,236	6,9	90,9
ZK5-1S	0–10	0,662	0,808	28,2	95,1
ZK5-1J	0–10	0,494	0,406	22,9	89,5
L6	0–90	0,492	0,555	13,8	76,4
ZK6-1S	0–10	0,546	0,874	14,5	72,2
ZK6-2S	0–10	0,489	0,685	34,0	61,0
L7	51–90	0,282	0,284	35,1	85,2
L8	17–90	0,031	0,036	17,1	109,3
ZK8-1S	0–10	0,567	0,837	15,5	63,0
ZK8-2S	0–10	0,567	0,124	26,0	69,2
ZK8-2J	0–10	0,501	0,591	19,0	74,9



Obr. 37 Ukázka vyhodnoceného seismogramu pro číslo měření 451 na snímači 4 pro odstřel na čelbě zkušební komory ZK5-1J ve staničení 7,2–9,3 m. V oknech pod sebou jsou uvedeny hodnoty rychlosti kmitání pro vertikální složku rychlosti V, podélnou složku H1, příčnou složku H2 a prostorovou velikost rychlosti (vektorový součet $V1 \times H1 \times H2$). V levé části jsou odečtené hodnoty maximálního zámitu, ve střední části je okno s časovým průběhem rychlosti a vpravo frekvenční spektrum

Přehledná prezentace výsledků byla provedena formou plošného zobrazení izoliní registrovaných rychlostí. Naměřené rychlosti kmitání jsou v mapě zobrazeny v pozici odpovídající místu odstřelu, naopak odstřel je fiktivně uvažován v pozici snímače, společně jsou zpracována data vždy jen pro jeden snímač. Celkem tak byly sestaveny 4 mapy pro hypotetické odstřely v pozicích snímačů 1–4, (snímače 5 a 6 byl osazen až po dokončení chodeb L7 a L8 v srpnu 2021). Mapy zobrazené pro pozice odpovídající snímačům 3 a 4, které mají dostatek údajů pro menší vzdálenosti odstřel – snímač (Obr. 38), ukazují, jak jsou izolinie deformovány, což může ukazovat na rozdílný útlum ve směru šíření přibližně S–J oproti směru V–Z. Tato anizotropie odráží geologickou stavbu, směr S–J odpovídá generelně směru paralelně s foliací, směr V–Z pak ukazuje zhruba kolmo k průběhu foliace. Maximální zachycené rychlosti kmitání se pro malé vzdálenosti zdroj přijímač pohybují v rozmezí 160–170 mm/s. Registrovaný signál je (s ohledem na obdobná měření na povrchu) relativně vysokofrekvenční (vyšší stovky až první tisíce Hz), s vyšší vzdáleností zdroj – přijímač lze očekávat rychlý posun spektra směrem k nízkým hodnotám.

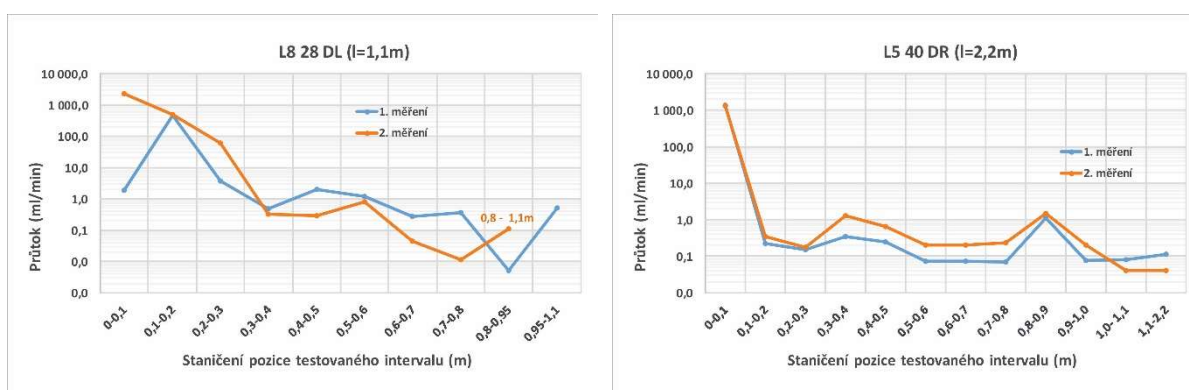


Obr. 38 Mapa izolinií maximálních rychlostí kmitání (prostorová složka) pro fiktivní pozici odstřelu v pozici snimače 4

2.10 Vodní tlakové zkoušky pro charakterizaci EDZ

Vodní tlakové zkoušky pro charakterizaci EDZ byly prováděny pracovníky SG Geotechnika a Ústavu geoniky AV ČR.

V průběhu řešení projektu byla dokončena jak první, tak druhá etapa měření ve všech 27 naplánovaných EDZ vrtech na chodbách L8, L7, L5 a L4a-d (viz schéma v Elektronická příloha 25). Popis měřicích zařízení, návrh rozmístění a způsobu zhotovení vrtů pro monitorování EDZ, popis způsobu měření a vlastní způsob zpracování výsledků měření pomocí VTZ pro EDZ jsou uvedeny ve třetí a čtvrté průběžné zprávě (Soejono et al. 2024; Bukovská et al. 2025). V poslední uváděné průběžné zprávě jsou rovněž zpracovány graficky naměřené hodnoty průtoků v EDZ vrtech v jednotlivých testovaných etážích (viz Obr. 39).

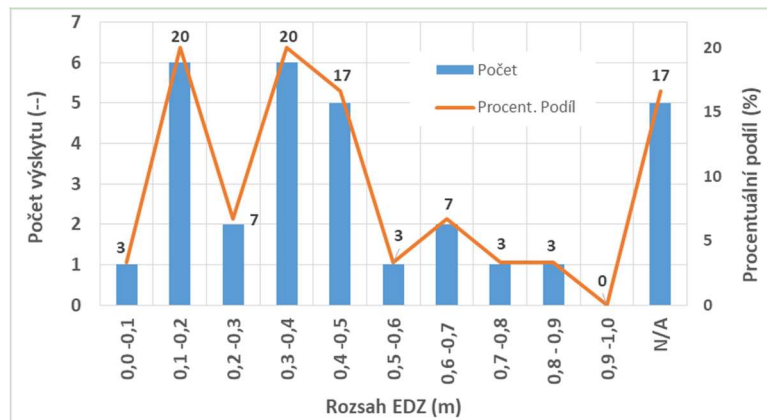


Obr. 39 Názorný příklad průběhu naměřených hodnot průtoků v etážích EDZ vrtů L8-28DL a L5-40DR

Na základě vývoje a zastoupení hodnot průtoků v proměřovaných etážích u všech EDZ vrtů byla určena charakteristická prahová hodnota průtoků. Hodnoty průtoků pod touto hranicí, dle našeho názoru, charakterizují hydraulické vlastnosti neovlivněného HM trhací prací a odrážejí jeho přirozený stav (pozadí), odvislý od jeho nepříliš homogenní strukturní stavby. Z histogramu uvedeného v Elektronická příloha 25 je zřejmé, že tuto srovnávací (prahovou) úroveň reprezentuje hodnota průtoků cca $1 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$, hodnoty pod a na této úrovni reprezentují cca 80 % všech naměřených dat. Oblasti HM rozprostírající se od líce výrubu směrem do masivu, ve kterých byly naměřeny vyšší hodnoty průtoků (cca 20 % naměřených dat), jsme z pohledu hydraulických vlastností HM označili jako masiv, ve kterém se projevuje přímý vliv EDZ.

V mnoha případech naměřené hodnoty průtoků ve druhém měření nebyly zcela konzistentní s hodnotami naměřenými během prvního měření. Ve většině případů se jedná o výskyt nižších hodnot průtoků při druhém měření. Na tuto skutečnost může mít vliv například uzavírání hydraulicky vodivých trhlin (zvyšující se hydraulický odpor), což může být například způsobeno přítomností jílových minerálů v diskontinuitách HM, výskytem nečistot na stěnách vrtů způsobující jejich ucpávání, zvláště v případech, kdy se jedná o rozdíly průtoků v řádech jednotek, popř. desetin $\text{ml} \cdot \text{min}^{-1}$. V případě naměřených vyšších hodnot průtoků v etážích během druhého měření pak naopak mohlo docházet k vyplavování a pročišťování vodivých trhlin v zájmovém horninovém masivu (viz grafy ve čtvrté průběžné zprávě – Bukovská et al. 2025 – kapitola Způsob zpracování výsledků měření pomocí VTZ pro EDZ).

Přijaté hodnoty rozsahu EDZ jsou zpracovány tabelárně v Elektronická příloha 25 společně s poznámkami k vlastnímu měření a naměřeným hodnotám průtoku, pro přehlednost byly rovněž zpracovány graficky, viz Obr. 40. Maximální hodnota dosahu EDZ – 0,9 m byla naměřena pouze u jednoho vrtu. Rozsah zóny EDZ od 0,5 do 0,9 m byl zjištěn pouze u cca 16 % vrtů. Závěrem lze konstatovat, že majoritní zastoupení rozsahu zóny EDZ na základě naměřených hodnot se nachází v intervalu cca 0,1–0,5 m (tj. cca 63 % z proměřovaných vrtů), z čehož nejvyšší zastoupení náleželo intervalům 0,1–0,2 m, 0,3–0,4 m a 0,4–0,5 m (viz Obr. 40).



Obr. 40 Grafické znázornění rozsahu zóny EDZ v proměřovaných vrtech

2.10.1 Srovnání výsledků charakterizace EDZ podle seismické refrakční tomografie a VTZ

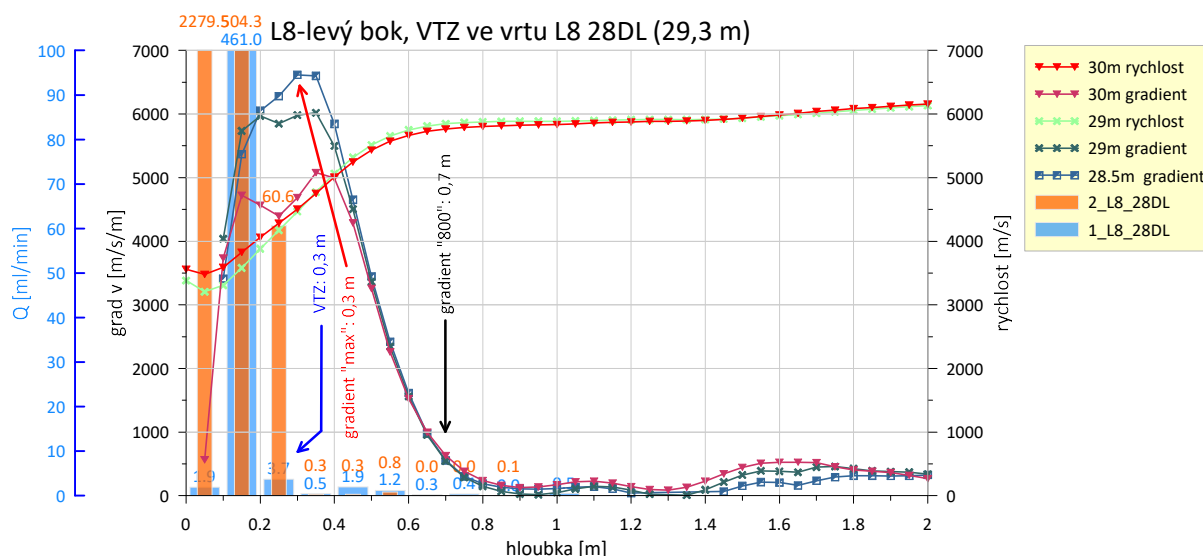
Odlíšný způsob kvantitativního popisu a charakterizace části horninového masivu (HM) ovlivněného ražbou byl učiněn již během vyhodnocení geofyzikálních měření, která byla realizována prakticky bezprostředně po dokončení hornických prací v jednotlivých laboratorních chodbách. V této etapě se závěry opíraly především o vyhodnocení seismické refrakční tomografie provedené na stěnách sledovaných chodeb v celé jejich délce. Vztah mezi četností, resp. vzdáleností diskontinuit a rychlostí šíření elastických vln v horninovém prostředí je známý a využíváný. Zvyšování vzdálenosti mezi puklinami obecně vede k vyšším hodnotám seismických rychlostí v HM, např. Budetta et al. (2001), Guadagno et al. (1993), Barton (2007) atd. Stanovení mocnosti ražbou porušené oblasti, tzv. EDZ zóny, na základě charakteru rychlostního profilového řezu bylo rozšířeno o stanovení gradientu rychlostního pole ve směru kolmo na stěnu chodby. Cílem bylo co nejvíce eliminovat subjektivitu hodnocení dle rychlostního obrazu a pokusit se stanovit „mezní“ hodnotu gradientu, který by pomohl určit hranici dosahu indukovaného porušení. Detailně jsou postupy zpracovány ve čtvrté průběžné zprávě v kapitole 2.7 věnované geofyzikální charakterizaci (Bukovská et al. 2025).

Vzájemné srovnání výsledků získaných těmito odlišnými postupy je provedeno graficky. Pro každý zkoušený vrt jsou vyneseny formou sloupcového grafu hodnoty průtoků v intervalech mocnosti 0,1 m (první měření modře, druhé měření oranžově), ve stejném grafu je znázorněn také průběh seismických rychlostí v HM ve směru kolmo na stěnu chodby, a to ve třech pozicích (v místě podélné osy vrtu a vždy 0,5 m na každou stranu od osy vrtu). Podobně je zobrazen také průběh gradientu seismických rychlostí, který je počítán ve směru kolmo na stěnu chodby. Ten indikuje dynamiku změny rychlosti v závislosti na rostoucí vzdálenosti od líce stěny chodby. Jednotlivé zkoušky jsou vyhodnoceny podle uvedených kritérií. VTZ

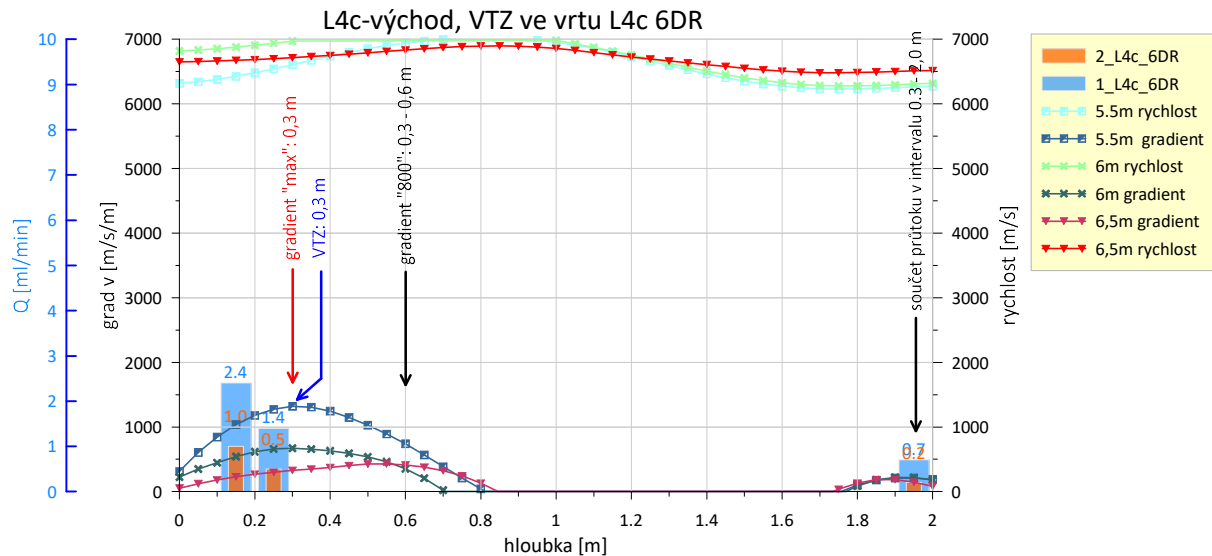
omezuje dosah EDZ mezním množstvím detekovaného průtoku 1 ml/min. Seismické metody v předchozích měřeních charakterizovaly dosah EDZ hodnotou hloubky, ve které gradient rychlosti klesá pod úroveň 800 m/s/m (v Tab. 11 a Elektronická příloha 25 je označena tato hodnota jako „gradient 800“). Takto byla vyhodnocena měření ve všech laboratorních chodbách a také v okolí ZK v chodbě L7 (viz Bukovská et al. 2022, 2023, 2025). Srovnáním vyhodnocení na základě změn gradientu rychlosti a poklesu průtoku s hloubkou se ukázalo, že stanovení mocnosti EDZ podle seismických měření přináší vyšší hodnoty u většiny sledovaných vrtů (odečtené mocnosti jsou uvedeny v Elektronická příloha 25). Proto by mohlo být přínosné upravit kritéria pro posuzování dosahu porušení podle průběhu gradientu. Jednou z možností je sledovat maximální hodnotu gradientu (v Tab. 11 a Elektronická příloha 25 označeno jako „gradient max“). Stanovení rozsahu EDZ podle těchto tří ukazatelů (hydraulický rozsah dle VTZ, rozsah dle hodnoty 800 m/s/m rychlostního gradientu a dle pozice maxima rychlostního gradientu) je uveden v následující tabulce Tab. 11 a Elektronická příloha 25. Příklad sdruženého grafu se zobrazením intervalových průtoků, průběhu seismických rychlostí a gradientu seismické rychlosti ve směru kolmo na stěnu chodby je na Obr. 41 a Obr. 42.

Na Obr. 41 jsou prezentovány výsledky VTZ ve vrtu L8-28DL. Průběh seismických rychlostí a gradientu v závislosti na hloubce vrtu je z hlediska vyhodnocení velmi příznivý. Poměrně strmý nárůst rychlostí v hloubkovém intervalu mezi 0–0,7 m určuje oblast porušení HM v blízkosti stěny, kterou lze omezit poklesem gradientu rychlosti pod hodnotu 800 m/s/m. Pozice maxima na křivce gradientu pak odpovídá hloubce 0,3 m a shoduje se dobře s výsledky VTZ v tomto vrtu.

Obr. 42 zobrazuje výsledky VTZ a průběhy seismických rychlostí v netypickém úseku velmi kvalitní, málo porušené horniny. Průběh rychlostí v závislosti na hloubce (vzdálenosti od líce stěny) ukazuje pouze velmi malý nárůst hodnot s rostoucí hloubkou, patrné jsou vysoké rychlosti již od počátku křivky (výrazně nad 6 000 m/s). Odpovídající gradienty vykazují nízké hodnoty maximálních hodnot, použití kritéria poklesu pod hodnotu 800 m/s/m je obtížné. Pozice maximálního gradientu odpovídá výsledku získaného pomocí VTZ. Průběh křivek gradientu seismických rychlostí je v okolí vrtu L4c-6DR proměnlivý, ilustruje to heterogenitu HM, která navíc bývá umocněna v okolí stěn vlivem ražby.



Obr. 41 Grafické srovnání výsledků stanovení rozsahu EDZ ve vrtu L8-28DL podle VTZ a seismické refrakční tomografie



Obr. 42 Grafické srovnání výsledků stanovení rozsahu EDZ ve vrtu L4c-6DR podle VTZ a seismické refrakční tomografie

Celkem 17 vrtů bylo možné vyhodnotit podle všech tří zmíněných postupů a vzájemně porovnat stanovené hodnoty. U zbylých vrtů nebylo buď možné stanovit rozsah podle VTZ (celkem 5 vrtů) nebo chyběla data z měření refrakční seismiky (vrty do čelby a v okrajích sledovaných chodeb, kde nemělo seismické měření dostatečný hloubkový dosah). Dobrá shoda mezi výsledky stanovení rozsahu EDZ podle VTZ a maxima gradientu rychlosti se ukázala u celkem 11 vrtů ze 17 hodnocených. Tato významnější shoda výsledků obou metod byla pravděpodobně způsobena výskytem výrazných hydraulicky vodivých trhlin v HM, které ve většině případů komunikovaly se stěnou chodeb. Tyto výrazné diskontinuity pak měly za následek i výraznější pokles rychlosti projevující se maximálními hodnotami gradientu rychlosti nacházející se především v oblastech HM cca od 0,1–0,4 m.

Pouze ve třech případech se shodovaly výsledky stanovené s využitím hodnot gradientu 800 m/s/m a VTZ. Lze konstatovat, že výsledky stanovení dosahu EDZ podle námi zvoleného „gradientu 800“ nejsou v rozporu s výsledky publikovanými v práci Huang et al. (2016) zabývající se použitím metody ultrazvukové tomografie pro charakterizaci EDZ na lokalitě Onkalo v obdobném typu HM. Ultrazvuková měření byla realizována ve frekvenčním rozsahu 20 kHz až 120 kHz a byla provedena v zóně poškození výrubu (EDZ) v oblasti počvy výklenku ONK-TKU-3620, který byl vyražen pomocí vrtání a trhacích prací za účelem získání P-vlnového tomografického obrazu. Výsledky ukázaly, že rychlost vln P se pohybuje mezi 4,8 km/s a 6,5 km/s. Byl pozorován obecný trend zvyšování rychlostí s hloubkou, přičemž nižší rychlosti jsou omezeny na horních 0,5 m, což souvisí s vyšším stupněm porušení HM. Byly pozorovány výrazné a konzistentní nízké rychlosti P vlny na prvních 0,15 m, což podle autorů lze přičíst vyšší intenzitě poškození podél povrchu v měřeném bloku HM. Na základě příčného tomografického řezu s přenosem rychlostí P vln bylo zjištěno, že poškození je omezeno na cca prvních 0,6 m od povrchu výrubu. Námi zjištěná oblast EDZ na základě analýzy parametru „gradient 800“ se pohybuje generelně v intervalu cca 0,3–0,7 m, v několika málo případech byla zjištěna až do vzdálenosti cca 0,8–1 m (viz Tab. 11 a Elektronická příloha 25).

Charakterizace rozsahu EDZ s využitím kombinace výsledků seismické refrakční tomografie provedené na stěnách chodeb a stanovení propustnosti HM v krátkých vrtech pomocí VTZ může být perspektivním způsobem hodnocení integrity geologického prostředí. Výsledky obou

metodik nejsou ve významném rozporu, určité neshody ve výsledcích je možné využít ke stanovení bezpečné hranice maximálního dosahu oblasti EDZ.

Tab. 11 Přehled výsledků stanovení dosahu EDZ

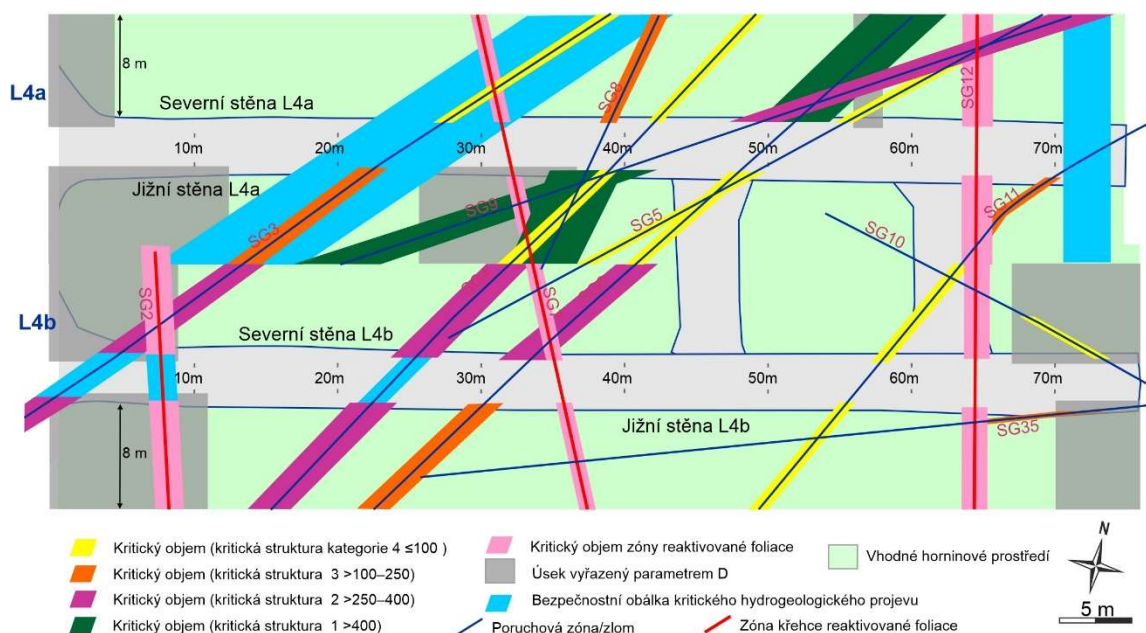
Označení vrtu	Délka vrtu (m)	Dosah EDZ dle VTZ (m)	Dosah EDZ dle seis. rychlosti „gradient800“ (m)	Dosah EDZ dle seis. rychlosti „gradientmax“ (m)	Poznámka
L8-6DR	2,2	0,1–0,2	0,5–0,8	0,15–0,25	--
L8-12DR	1,2	0,4–0,5	0,5–0,6	0,2	--
L8-29DL	1,2	0,3–0,4	0,7	0,35	--
L8-32DL	2,2	nelze stanovit	0,6	0,15	Hodnoty průtoků po celé délce vrtu oscilují okolo 1 ml.min ⁻¹ , mírně nad tuto hodnotu se hodnota průtoků (3–5 ml.min ⁻¹) dostává v oblasti 1,3–1,8 m; viz Obr. 40 (pravděpodobně vliv primárního porušení HM).
L8-48DR	2,2	0,1–0,2	0,5	0,15	--
L8-52DR	1,1	0,1–0,2	0,65	0,2	--
L8-76DR	10,5	0,3–0,4	0,55	0,15–0,2	--
L7-28DL	2,1	0,2–0,3	0,7–0,75	0,45–0,55	Hodnota průtoků zvýšena nad 1 ml.min ⁻¹ (cca 10 ml.min ⁻¹) v oblasti vrtu cca 1,8–2,2 m; viz Obr. 40 (pravděpodobně vliv primárního porušení HM).
L7-42DL	2,2	nelze stanovit	nelze	0,1? (1,2–1,4)	Hodnoty průtoků po celé délce vrtu se nacházejí pod zvolenou hodnotou průtoků 1 ml.min ⁻¹ ; viz Obr. 43.
L7-50 L	10,5	nelze stanovit	0,25–0,45	0,1–0,25	Hodnoty průtoků po celé délce vrtu se nacházejí pod zvolenou hodnotou průtoků 1 ml.min ⁻¹ viz Obr. 43.
L7 58DL	2,2	0,6–0,8	0,5–0,8	0,15–0,35	--
L7 72DL	2,2	0,3–0,4	0,65	0,4	--
L7 58 DR	2,2	nelze stanovit	0,8–0,95	0,45–0,6	Hodnoty průtoků v úvodní části vrtu (do cca 0,4–0,5 m) oscilují okolo 1 ml.min ⁻¹ , v navazující části vrtu se hodnoty průtoků nacházejí nad touto hranicí; viz Obr. 43. (pravděpodobně vliv primárního porušení HM).
L7 71 DR	2,2	0,1–0,2 0,4	0,65 (1,25)	0,45–0,5 (0,8),	--
L7 77 DR	2,2	0,6–0,7	nevyhodnoceno	nevyhodnoceno	křížení L7 a V7-8
L7 87 L	15,5	0,4–0,5	nevyhodnoceno	nevyhodnoceno	okraj chodby, L7, malý hloubkový dosah seismických měření
L7 90 F	10,3	0,4–0,5*	nevyhodnoceno	nevyhodnoceno	*... hodnoceno vzhledem k průběhu hodnot u druhého

Označení vrtu	Délka vrtu (m)	Dosah EDZ dle VTZ (m)	Dosah EDZ dle seis. rychlosti „gradient800“ (m)	Dosah EDZ dle seis. rychlosti „gradientmax“ (m)	Poznámka
					měření, první měření ukázalo vyšší průtoky téměř po celé délce vrtu (viz Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.)
L7 42 DR	2,2	0,3–0,4	0,75–0,9	0,45	--
L5 12 DR	2,2	nelze stanovit	0,8	0,1; 0,5 (2 maxima)	Vyšší hodnoty průtoku nad stanovenou mez až ve vzdálenosti cca 0,5 m od ústi vrtu (pravděpodobně vliv primárního porušení HM; viz Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.)
L5 40 DR	2,2	0,1–0,2 (0,4)	0,5–0,6	0,3–0,4	--
L4a 53 R	2,0	0,3–0,4	0,6	0,15	--
L4a 63 L	2,0	0,2–0,4	0,6	0,3	--
L4a 72 L	15,2	0,4–0,6	nevyhodnoceno	nevyhodnoceno	Ve vzdálenosti cca 1,6 – 15 m dochází ke komunikaci s blízkým vrtem L4a 72 UL; viz Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.
L4a 75 F	2,1	0,4–0,5	nevyhodnoceno	nevyhodnoceno	--
L4b 54 L	2,0	0,0–0,1 (0,4?)	0,5	0,15	Ve vzdálenosti 0,4 m u prvního měření naměřena hodnota cca 10 ml.min ⁻¹ (viz Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.)
L4c 6 R	2,0	0,1–0,2 (0,3)	0,3–0,6	0,3	--
L4d 6 L	2,0	0,8–0,9	(1,5)	0,9	--

Pozn.: zeleně jsou zvýrazněny shody mezi VTZ a maximem gradient, žlutě pak shody mezi VTZ a „gradientem 800“

2.11 Systém klasifikace horninových bloků

Nový klasifikační systém horninového prostředí URA (Underground Rock-mass Assessment; Soejono et al. 2025) je navržen jako nástroj pro stanovení vhodnosti horninového masivu pro umístění ukládacích vrtů (vymezení vhodných a nevhodných částí horninového masivu). Jedná se o jednoduchý, efektivní a prakticky použitelný postup pro kategorizaci horninového masivu navržený pro reálné použití v podmínkách budování HÚ. Klasifikační systém hodnotí horninový masiv primárně z pohledu dlouhodobé bezpečnosti. Systém je navržen pro prostředí vysoce metamorfovaných metasedimentárních a metavulkanických hornin přítomných na PVP Bukov II. Po zohlednění lokálních geologických poměrů je možné ho upravit pro použití v jiných geologických podmínkách. 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, přiřazených kritických objemů a kritických hydrogeologických projevů a jejich bezpečnostních obálek. Klasifikační systém URA je detailně představen v samostatné zprávě (Soejono et al. 2025). V této zprávě je detailně popsán hodnotící postup, použité výzkumné metody, klasifikační parametry a jsou tam shrnuty výsledky použitých metod a výsledky testování oběma stupni klasifikačního systému URA v reálných podmínkách nově budovaných podzemních chodeb L4a a L4b na PVP Bukov II (Obr. 43). Dále byly pomocí II. stupně této klasifikace zhodnoceny stěny všech chodeb PVP Bukov II (Elektronická příloha 2, Soejono et al. 2025). Práce na vývoji klasifikačního systému a jeho testování přinesly množství výsledků, zkušeností a doporučení, které jsou ve zprávě detailně diskutovány.



Obr. 43 Schéma ukazující výsledky II. stupně hodnocení stěn laboratorních chodeb L4a a L4b a rozmístění vhodných/nevhodných částí horninového masivu

3 Závěry, interpretace a doporučení

3.1 Shrnutí hlavních výsledků projektu

Projekt Geologická a geotechnická charakterizace horninového prostředí – PVP Bukov II byl založen na multidisciplinárním výzkumu nově ražených prostor na 12. patře bývalého dolu Rožná pro budoucí podzemní laboratoř. Výzkumné práce zahrnovaly širokou paletu geologických, geotechnických, hydrogeologických a geofyzikálních metod aplikovaných za cílem co nejdetailnějšího poznání horninového prostředí pro novou podzemní laboratoř. V této kapitole jsou shrnuty hlavní výsledky prací provedených v rámci tohoto projektu.

V průběhu ražeb probíhala systematická geotechnická a geomechanická dokumentace (kapitola 2.2.1) zahrnující 449 záběrových listů. Ty obsahují geologickou a geotechnickou dokumentaci čelby (Elektronická příloha 2), fotodokumentaci záběru, formulář s výpočtem indexových klasifikačních systémů QTS, RMR a Q systém a fotogrammetrický model. Z hlediska stability podzemního díla probíhaly na PVP Bukov II ražby chodeb ve velmi dobrých podmínkách. Mírně zhoršené vlastnosti byly pozorovány v blízkosti křížení chodeb, kde byl pro stabilizaci výrubu použitý stříkaný beton. V několika krátkých úsecích s problematickými polohami reaktivované foliace byl výrub vystrojen TH výztuží. Zaměření skutečného stavu nově vyražených prostor PVP Bukov II bylo provedeno pomocí technologie laserového skenování. Výstupem je 3D laserscanový model (Elektronická příloha 4).

Horninové prostředí PVP Bukov II je tvořené tělesy migmatitizovaných amfibolitů, migmatitizovaných pararul a migmatitů (kapitola 2.4.1, Elektronická příloha 8). Tyto horninové typy nemají ostré vzájemné kontakty, ale jsou mezi nimi plynulé přechody respektující geometrii mladší penetrativní metamorfní stavby. Duktální deformační záznam je výsledkem superpozice dvou generací metamorfních foliací. Puklinový systém je tvořen několika různě významnými puklinovými sety a díky silné mechanické anizotropii a její časté reaktivaci je nepravidelný a nesystematický. Významnější poruchy (kritické struktury s výrazně negativními mechanickými a transportními vlastnostmi) jsou reprezentovány zónami křehce reaktivované a silně alterované metamorfní foliace nebo zlomy vyplněnými mechanicky slabším materiálem (kataklazit, jílové minerály, kalcit, chlorit, grafit; kapitola 2.4.2). Kritické struktury vznikaly v sukcesi několika generací deformačních zón během dlouhodobé a polyfázové křehké tektonické historie oblasti. Maximální posuny na identifikovaných kritických strukturách jsou v řádu desítek cm a důležité zóny křehce reaktivované foliace nejsou výrazněji posouvány protínajícími zlomovými zónami, což naznačuje jejich simultánní reaktivaci. Strukturněgeologická mapa (kapitola 2.3.1; Elektronická příloha 6) a strukturněgeologický 3D model PVP Bukov II (kapitola 2.3.2; Elektronická příloha 7) jsou jedny z hlavních výstupů prací a prezentují geologickou a tektonickou stavbu oblasti. Byly sestaveny na základě syntézy terénních petrografických a strukturních dat a výsledků geofyzikálních prací a primárně zobrazují prostorovou distribuci litologických těles a kritických struktur.

Geochemické charakteristiky hornin (kapitola 2.4.3, Elektronická příloha 10) byly studovány za účelem klasifikace protolitu a určení zdrojů, tektonického prostředí jejich vzniku a petrogenese. Až na výjimky, mají studované horniny podobné obsahy hlavních i stopových prvků. Většina metavulkanitů reprezentuje původně subalkalické, metaluminické bazaltické až andezitové lávy. Přibližně polovina vzorků má vápenato-alkalické složení a druhá polovina tak odpovídá tholeitické sérii. Částečně odlišné složení některých vzorků souvisí s přítomností klastické

komponenty v původně bazickém tufu. Většina metasedimentárních vzorků odpovídá původně nevytřídněným pískovcům s nezralými zdroji klastického materiálu. Rozdílný stupeň parciálního tavení nemá na celkové složení výraznější vliv. Odlišné složení jednoho vzorku pararuly je způsobeno přítomností bazického klastického materiálu. Obsahy stopových prvků indikují, že detritus byl derivován z kyselých magmatických hornin magmatického oblouku s nízkým podílem recyklovaného materiálu, což odpovídá zjištěnému tektonickému prostředí metavulkanických členů horninové asociace PVP Bukov II.

Studium oxidačně-redukčních parametrů (kapitola 2.4.4, Elektronická příloha 11) ukázalo, že redoxní potenciál hornin na PVP Bukov II odpovídá přechodným až mírně redukčním podmínkám a je většinou řízený rovnováhou mezi dvojmocným železem v roztoku a hydroxidem železitým. Kyslík rozpuštěný v podzemních vodách ovlivňuje redoxní potenciál prostředí jen zprostředkovaně přes oxidaci redukovaných členů. Interakce vody nasycené vůči atmosférickému kyslíku ukázala, že amfibolit i pararula jsou vůči oxidaci velmi odolné. Redukční kapacita hornin (cca 1 000 mg O₂ na 100 g horniny) je řízena obsahem sulfidů a je modifikována tmavými minerály obsahujícími dvojmocné železo. Nejvyšší redukční kapacitu mají pararuly (sulfidická síra) a amfibolity (vysoký obsah dvojmocného železa) a nižší mají migmatit a migmatitizovaný amfibolit.

Míra zvodnění podzemí v prostoru PVP Bukov II je velmi nízká (kapitola 2.5.1, Elektronická příloha 12). V chodbách a zkušebních komorách se nevyskytují žádné vydatné přítoky podzemních vod. Většina průsaků do chodeb má charakter vlnutí stěn s občasnými úkapy. Nejvyšší měřitelné vydatnosti průsaků a výtoků z vrtů v prostoru PVP Bukov II se pohybovaly v prvních jednotkách ml.s⁻¹. Vydatnější přítoky jsou vázány na dílčí zlomy (kritické struktury). Proudění podzemních vod je v prostoru PVP Bukov II silně ovlivněno výskytem a orientací foliačních ploch. Zóny reaktivovaných nebo porušených alterovaných foliací působí jako komunikační cesty mezi zlomy a okolním horninovým prostředím a zvyšují míru hydraulického propojení struktur.

PVP Bukov II se v rámci dolu Rožná nachází v zóně výskytu podzemních vod s převahou sodíku (kapitola 2.5.2, Elektronická příloha 13). Vzájemný podíl síranů a hydrogenuhlíčanů postihuje míru ovlivnění primárních podzemních vod odpovídající hloubkové úrovni (typ Na-HCO₃) a jejich posun k silně ovlivněným důlním vodám (typ Na-SO₄). Celkový obsah rozpuštěných látek (TDS) je v rozmezí od 200 do 370 mg.l⁻¹, hodnoty pH jsou od 8,4 do 9,2. V odebraných vzorcích se nevyskytovaly žádné extrémní obsahy stopových prvků, organického uhlíku ani zvýšená radioaktivita vod.

Vody odebrané na PVP Bukov II mají rozptyl ve střední době zdržení mezi 5 310 ± 40 let a 20 870 ± 130 let. Jedná se převážně o infiltrované srážkové vody z chladnějšího klimatu (kapitola 2.5.3, Elektronická příloha 14).

V prostředí PVP Bukov II bylo monitorováno pět přítoků s průtokem do 5 ml.s⁻¹ (kapitola 2.5.5, Elektronická příloha 15). Z výsledků stanovení hlavních iontů a fyzikálně-chemických vlastností je patrné, že všech pět monitorovaných přítoků mělo podobné vlastnosti a trend vývoje parametrů v čase. Nejmarkantnější byl průběžný pokles pH a nárůst hydrogenuhlíčanů.

Na vybraných vzorcích amfibolitu a biotitického migmatitu byly studovány transportní vlastnosti se zaměřením na difuzní a sorpční charakteristiky (kapitola 2.6). Biotitický migmatit obecně vykazuje nižší hodnoty D_e , které dosahují maxima $2,1 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ (HTO) a $0,45 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

$^1(^{36}\text{Cl})$ u vzorků s paralelní orientací usměrnění. Amfibolit vykazuje hodnoty D_e mezi $1,71\text{--}9,07 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ (HTO) a $0,12\text{--}4,10 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ (^{36}Cl) s vyšší difuzivitou vzorků orientovaných paralelně k usměrnění. Amfibolit vykazuje obecně nižší sorpční kapacitu, zatímco biotitický migmatit má výrazně vyšší sorpční kapacitu. Vyšší sorpce je u migmatitu způsobena především vyšším obsahem biotitu, jehož vrstvená struktura poskytuje více vysoce afinitních sorpčních míst, zejména pro cesium. U stroncia je rozdíl v sorpci mezi oběma horninami méně výrazný.

Hodnocené velkoobjemové vzorky (kapitola 2.7.1) jsou reprezentovány amfibolity (60 % zkušebních tělísek z odstřelu 85,8 m chodby L7), dále pak biotit-amfibolickou pararulou (40 %), respektive migmatity (cca 73 % zkušebních tělísek z odstřelu 10 m chodby L6), ostatní horninové typy do 10 %. Vzorky z odběru velkoprofilovým vrtem v chodbě L5 ze staničení 32 m jsou petrograficky výrazně homogenní (amfibolity cca 53 % a migmatizované amfibolity cca 46 %).

Na základě detailního výzkumu fyzikálních, mechanických i přetvárných vlastností (FMV, kapitola 2.7.1, Elektronická příloha 17) lze konstatovat, že v intaktním stavu se horniny z PVP Bukov II vyznačují velmi nízkou pórovitostí (okolo 0,5 %), nasákavostí (do 0,2 %) a propustností pro vodu a plyny (méně než $1 \times 10^{-14} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ resp. $1 \times 10^{-22} \text{ m}^2$). Jedná se o horniny s vysokou až extrémně vysokou pevností (např. pevnost v prostém tlaku se pohybuje od 97 do 231 MPa). Charakteristickým rysem hodnocených hornin je často poměrně výrazná anizotropie, a to jak fyzikálních (např. rychlost šíření podélných ultrazvukových vln, tepelná vodivost a kapacita), tak i mechanických vlastností (pevnost v příčném tahu, pevnost v tlaku). Deformační moduly naměřené v laboratoři se pohybovaly převážně v rozmezí cca 60–90 GPa. Pomocí uniaxiálního lisu Goodman Jack byly v nově budovaném PVP Bukov II stanoveny deformační moduly ve vrtech in-situ. Tyto moduly se pohybují mezi 5 a 25 GPa.

Na základě analýzy parametru RQD na vrtném jádře (kapitola 2.7.3.5) celkem pěti vrtů ve staničení 87–90 m chodby L7 byla prokázána velmi vysoká kvalita hornin v daném hodnoceném místě. Index RQD se pro celé hodnocené délky vrtů pohybuje v rozmezí 72–91%, což je přibližně o 10–20 % více než hodnoty RQD známé z jiných částí dolu Rožná (Bukovská et al. 2020, Souček et al. 2018, Vavro et al. 2015). Rovněž v případě analýzy parametru RQD na vrtném jádře celkem čtyř vrtů geotechnické stanice GS-L4 byla prokázána velmi vysoká kvalita hornin v daném hodnoceném místě. Index RQD se pro celé hodnocené délky vrtů pohybuje v rozmezí 75–84 %, což je opět přibližně o 10–15 % více než hodnoty RQD v ostatních dříve hodnocených partiích dolu Rožná. Vyšší kvalitu HM potvrzují v obou případech také menší rozdíly mezi hodnotami RQD stanovenými na vrtném jádře a získané na základě záznamů metodami OBI a ABI, než tomu bylo v jiných částech dolu Rožná (Bukovská et al. 2020; Vavro et al. 2015).

Analýzou provedenou pomocí metod OBI a ABI (kapitola 0) ve vrtných stvolech pěti geotechnických vrtů na geotechnických stanicích GS-L7 a GS-L4a byly v HM PVP Bukov II identifikovány tři hlavní puklinové systémy. Nejvýraznější z těchto puklinových systémů, dominantně tvořený otevřenými puklinami, je prostorově shodný s metamorfní foliací.

Z měření napětí horninového masivu (HM) metodou hydroštěpení stěn vrtů (hydrofracturing, kapitola 2.7.3.3, Elektronická příloha 20), provedených na geotechnické stanici GS4 a GS7, můžeme konstatovat, že přijaté průměrné charakteristické hodnoty pro napěťový stav HM v zájmovém bloku jsou následující:

- Hodnota orientace maximálního hlavního horizontálního napětí k magnetickému severu je 128° (GS-L7 – 123° ; GS-L4a – 132°).
- Hodnota maximálního hlavního horizontálního napětí rovná se 38 MPa (GS-L7 – 42 MPa; GS-L4a – 34 MPa).
- Hodnota minimálního hlavního horizontálního napětí rovná se 18 MPa (GS-L7 – 19 MPa; GS-L4a – 16 MPa).

Geofyzikální charakterizace (kapitola 2.7.4; Elektronická příloha 21, Elektronická příloha 22, Elektronická příloha 23) sledovala vlastnosti HM v prostoru budovaného PVP Bukov II s využitím seismických metod (povrchová refrakční tomografie, tomografická měření mezi vrtů), stejnosměrných elektrických odporových měření (metoda ERT a georadarových měření (povrchová a ve vrtech). Fyzikální vlastnosti HM jsou dle očekávání ovlivněny stavem HM v místech průzkumu. Zjištěné seismické rychlosti se pohybují v rozmezí mezi 2 500–7 400 m/s. Nízké hodnoty se objevují zejména v souvislosti s porušením masivu vlivem ražby v blízkosti stěn chodeb. V částech ražbou neovlivněných jsou zastiženy rychlosti v hodnotách od 4800 do 7 400 m/s, horní hranice je zde vyšší, než bylo zjištěno v průběhu předchozích projektů (Bláha et al. 2017, Bukovská et al. 2020). Nejvyšší hodnoty byly zastiženy v okolí chodby L4c, nejnižší pak v prostoru mezi vrtů GS-L4. Měrné elektrické odpory jsou zaregistrovány v širokém intervalu od prvních stovek ohm.m do vyšších desítek tisíc ohm.m (vysoké odpory jsou také naměřeny v okolí chodby L4c, nízké odpory pak v rámci zvodnělých tektonických struktur).

Výsledky hodnocení I. stupně nového systému klasifikace horninového masivu URA (kapitola 2.11; Soejono et al. 2025) ukázaly, že pro vrt S-24 je vhodných 49,49 % délky a pro vrt S-33 je vhodných 59,08 % délky. V rámci II. stupně klasifikace URA (kapitola 2.11) bylo jako vhodných pro umístění ukládacích vrtů klasifikováno průměrně 49,6 % délky hodnocených stěn. Nejlépe byla hodnocena jižní stěna chodby L4b (63,59 %) a nejhůře byla hodnocena jižní stěna chodby L4a (35,1 %). Jako klíčové se ukázala prostorová distribuce kritických struktur a jejich kritických objemů, které často vyřadí i části stěn hodnocené v předchozích krocích jako vhodné.

3.2 Data využitelná pro popisné modely

Pro interpretaci geologických poměrů a ekosystému na potenciálních lokalitách pro realizaci HÚ budou vytvářeny tzv. popisné modely (Valter et al. 2023). Tyto modely vzniknou syntézou získaných informací a dat z geologického průzkumu na povrchu a měření v hlubokých vrtech a budou sloužit pro bezpečnostní hodnocení lokalit.

V rámci tohoto projektu bylo dokumentováno množství dat, která do popisných modelů budou vstupovat, a proto lze dílčí doporučení a zkušenosti z tohoto projektu uvažovat i pro další sběr dat v budoucích projektech SÚRAO. V tabulce níže (Tab. 12) jsou převzaty parametry a vstupní data, která uvažuje zpráva Valtera et al. (2023). Barevně je vyznačeno, které typy vstupních dat pro popisné modely byly získány v rámci geologické a geotechnické charakterizace pro PVP Bukov II.

Tab. 12 Přehled vstupních dat pro dílčí popisné modely dle Valtera et al. (2023), oranžově podbarvena data, která byla získána v rámci tohoto projektu viz výše

Strukturněgeologický model
<u>Horniny</u> : typy hornin, litologie, minerální složení, textura, pórovitost, objemová hmotnost, rozložení diskontinuit v prostoru, stáří.
<u>Zvětralinový plášť, kvartér a půdy</u> : stratigrafie, struktura, složení, stáří.
<u>Struktury</u> : charakter (duktilní, křehké), stupeň alterace, minerální výplň diskontinuit, stáří.
Geotermální model
Počáteční teplotní podmínky v horninovém masivu v současnosti,
Geotermální gradient.
Tepelné charakteristiky hornin: tepelná vodivost, tepelná difuzivita, tepelná kapacita, koeficient tepelné roztažnosti.
Teplota hornin, teplota podzemní vody, a jejich rozložení v prostoru,
Geomechanický model
<u>Napětí</u> : velikost a vektorové rozložení počátečního (recentního) pole napětí v horninovém masivu, pole napětí ve vztahu k diskontinuitám.
<u>Diskontinuity</u> : deformační a pevnostní charakteristiky, statistické rozložení v prostoru a tvar diskontinuit.
<u>Horniny tvořící horninový masiv</u> : deformační a pevnostní charakteristiky, rychlost šíření seizmických vln, objemová hmotnost, porozita, stupeň zvětrání.
<u>Systém charakterizace horninového masivu</u> : Q index, RQD (rock quality designation), RMR (rock mass rating), GSI (geological strength index), RMI (rock mass index).

Hydrogeologický model

Hydraulická vodivost, permeabilita, transmisivita, koeficient storativity, koeficient měrné zásobnosti, teplota podzemní vody a její rozložení v prostoru, množství rozpuštěných látek v podzemní vodě, vodní sloupec, stlačitelnost vody, stlačitelnost horninového masivu, velikost a distribuce srážkové infiltrace a podzemního odtoku, prostorová distribuce tlakových poměrů podzemní vody, prostorová distribuce jakosti, stáří a teploty podzemních vod, současná topografie, klima a hydrologie definující infiltrační oblasti v lokalitách.

Hydrogeochemický model

Minerální složení horninového masivu a sekundárních minerálů na povrchu diskontinuit, množství rozpuštěných látek v podzemní vodě, směšovací poměry rozpuštěných prvků v podzemní vodě, rovnovážné konstanty, rovnovážné koncentrace, časové závislosti.

**Popisný model klimatu a geodynamických procesů a popisný model povrchového ekosystému nebyly s ohledem na typ získaných dat uvažovány.*

3.3 Popis a charakterizace účinků razicích prací na okolí nově vyražených chodeb a komor

Snaha o kvantitativní popis a charakterizaci části horninového masivu (HM) ovlivněného ražbou byla provedena již během vyhodnocení geofyzikálních měření, která byla realizována prakticky bezprostředně po dokončení hornických prací v jednotlivých laboratorních chodbách. V této etapě se závěry opíraly především o vyhodnocení seismické refrakční tomografie provedené na stěnách sledovaných chodeb. Jiný způsob charakterizace oslabené zóny v HM byl realizován s pomocí provedení VTZ v krátkých vrtech ve stěnách vyraženého díla. Výsledky těchto zkoušek přináší informaci o propustnosti HM v okolí vrtu v 10 cm hloubkových intervalech. Podrobně se metodice a výsledkům VTZ věnuje kap. 2.9 této závěrečné zprávy.

Vzájemné srovnání výsledků získaných těmito odlišnými postupy je náplní kapitoly 2.10.1. Pro každý zkoušený vrt jsou vyneseny formou sloupcového grafu hodnoty průtoků v intervalech mocnosti 0,1 m (první měření modře, druhé měření oranžově), ve stejném grafu je znázorněn také průběh seismických rychlostí v HM a jejich gradientu ve směru kolmo na stěnu chodby, a to ve třech pozicích (v místě podélné osy vrtu a vždy 0,5 m na každou stranu od osy vrtu). Seismické metody v předchozích měřeních charakterizovaly dosah EDZ hodnotou hloubky, ve které gradient rychlosti klesá pod úroveň 800 m/s/m. Srovnáním vyhodnocení na základě změn gradientu rychlosti a poklesu průtoku s hloubkou se ukázalo, že stanovení mocnosti EDZ podle seismických měření přináší vyšší hodnoty u většiny sledovaných vrtů (odečtené mocnosti jsou uvedeny v Elektronická příloha 25. Lepší shodu mezi výsledky obou metod přináší posouzení dosahu porušení s ohledem na maximální hodnotu gradientu seismických rychlostí.

Celkem 17 vrtů bylo možné vyhodnotit podle všech tří zmíněných postupů a vzájemně porovnat stanovené hodnoty. U zbylých vrtů nebylo buď možné stanovit rozsah podle VTZ (celkem 5 vrtů) nebo chyběla data z měření refrakční seismiky (vrty do čelby a v okrajích sledovaných chodeb, kde nemělo seismické měření dostatečný hloubkový dosah). Dobrá shoda mezi výsledky stanovení rozsahu EDZ podle VTZ a maxima gradientu rychlosti se ukázala u celkem 11 vrtů ze 17 hodnocených. Tato významnější shoda výsledků obou metod byla pravděpodobně způsobena výskytem výrazných hydraulicky vodivých trhlin v HM, které ve většině případů komunikovaly se stěnou chodeb. Tyto výrazné diskontinuity pak měly za následek i výraznější pokles rychlosti projevující se maximálními hodnotami gradientu rychlosti nacházející se především v oblastech HM cca od 0,1–0,4 m.

Pouze ve třech případech se shodovaly výsledky stanovené s využitím hodnot gradientu 800 m/s/m a VTZ. Lze konstatovat, že výsledky stanovení dosahu EDZ podle námi zvoleného „gradientu 800“ nejsou v rozporu s výsledky publikovanými v práci Huang et al. (2016) zabývající se použitím metody ultrazvukové tomografie pro charakterizaci EDZ na lokalitě Onkalo v obdobném typu HM.

Charakterizace rozsahu EDZ s využitím kombinace výsledků seismické refrakční tomografie provedené na stěnách chodeb a stanovení propustnosti HM v krátkých vrtech pomocí VTZ může být perspektivním způsobem hodnocení integrity geologického prostředí. Výsledky obou metodik nejsou ve významném rozporu, určité neshody ve výsledcích je možné využít ke stanovení bezpečné hranice maximálního dosahu oblasti EDZ.

Prakticky po celou dobu provádění ražeb probíhalo měření seismických účinků trhacích prací, které sleduje velikost rychlosti kmitání částic prostředí (horniny) pomocí geofonů. Podrobné

zhodnocení tohoto monitoringu je náplní kapitoly 2.8 této zprávy. Ke vzniku malých trhlin v HM nebo ke zvětšování stávajících dochází při rychlostech kmitání $250\text{--}650\text{ mm.s}^{-1}$, významné trhliny pak vznikají při rychlostech kmitání zhruba $700\text{--}1000\text{ mm.s}^{-1}$, ke kompletnímu rozrušení horniny dochází při rychlostech nad 2500 m.s^{-1} (Vuolio in Saukkonen, 2008). Na základě dlouhodobého monitorování lze přibližně stanovit (na základě zjištěných korelačních vztahů mezi rychlostí kmitání, vzdáleností a hmotností nálože v kapitole 2.8), že pro hmotnost nálože 2,4 kg dojde k překročení uvedených rychlostí kmitání ve vzdálenostech od odstřelu menších než 2,1 m (limita 2500 m.s^{-1}), 4,3 m (limita 700 m.s^{-1}) a 7.9 m (limita 250 m.s^{-1}). V HM s přítomností primárních diskontinuit typu foliačních ploch může tedy dojít k rozvoji EDZ při trhacích pracích vzdálených v jednotkách metrů.

3.4 Zkušenosti a doporučení pro realizaci budoucích projektů

Práce na projektu ukázaly, že heterogenita geologických a strukturních vlastností PVP Bukov II, nepřesnost měření, specifika podzemního prostředí a vlivy spojené s ražbou či provozem podzemního díla mohou některé výsledky ovlivnit. Při výzkumných pracích, zpracování dat nebo interpretacích byly dále zjištěny výhody některých výzkumných postupů, ale také některé metodologické problémy, které se projevují v podobě nejistot. Je proto nezbytné zohlednit omezení použitých výzkumných metod a nejistoty spojené s vyhodnocením a interpretací získaných dat. Je důležité brát v potaz tato omezení, pečlivě vyhodnotit kvalitu získaných dat a zohlednit všechny možné zdroje nejistoty při jejich interpretaci. V této kapitole jsou diskutovány získané zkušenosti, benefity nebo omezení použitých metod, nejistot dat apod. a shrnuty z toho vyplývající doporučení pro navazující projekty na PVP Bukov II a HÚ obecně.

3.4.1 Specifika horninového prostředí PVP Bukov II

Lokální geologická specifika PVP Bukov II mají zásadní vliv na metodické postupy a výsledky výzkumných prací. 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 strukturní 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.

Řada průsaků podzemní vody do chodeb je nebo byla vázaná na plochy (pásma) foliací. Vlivem přítomnosti četných foliací docházelo k šíření vlhkosti od primárních zdrojů (zlomů) na větší vzdálenosti. Projevem bylo postupné spojování několika primárně dokumentovaných průsaků do prakticky souvislých slabě zvodnělých zón. Pásma foliací současně mohou propojovat hydraulicky aktivní zlomy. Tento jev je velmi specifický pro metamorfované horniny a dále pro danou orientaci foliace vůči chodbám. V granitových masivech k těmto projevům nebude docházet. Je možné předpokládat, že v prostředí granitoidů budou změny pozice a intenzity průsaků s časem výrazně menší než v PVP Bukov II.

Metamorfní foliace velkou měrou ovlivňuje fyzikální vlastnosti sledované v rámci geofyzikální charakterizace (rychlost podélných seismických vln, měrný elektrický odpor, odrazivost elektromagnetického vlnění). Vzdálenost mezi diskontinuitami a jejich případné nasycení podzemní vodou jsou určující pro měřené hodnoty sledovaných veličin, jejich vliv výrazně překrývá změny vlastností způsobené litologickým charakterem.

3.4.2 Specifika charakterizace a dokumentace v podzemí

Dokumentace razicích prací

V rámci budování PVP Bukov II se na dokumentaci horninového prostředí střídalo množství pracovních skupin z různých subjektů, pročež se ukázalo jako zcela klíčové včasné, přesné a viditelné značení staničení chodeb pro možnou koordinaci prací. Pro budoucí praxi lze doporučit jednoznačné rozdělení barevných sprejových značek a včasné označení a osazení značkami staničení.

Detailní charakterizace prostředí tak, jak byla prováděna na takovémto projektu, resp. může být prováděna při budoucí výstavbě HÚ, znamená výrazně zvýšenou časovou náročnost oproti standardní ražbě například tunelu silniční dopravy. Při ražbě HÚ bude nutné počítat s častým přerušením ražby a stavby, protože se budou výsledky průzkumu nejen ověřovat, ale také se budou zpřesňovat pro potřeby následného ukládání odpadu. Je tedy vhodné počítat s dokumentací a měřeními před zapažením stěn a vyklížením a omytím pracoviště. S tímto je nutné počítat již při projektování a vytváření harmonogramu prací pro takový projekt.

Geologická a geotechnická dokumentace

Terénní geologická a strukturní dokumentace v podzemí přináší významná omezení, které ovlivňují přesnost a spolehlivost dat. Omezené měřítko dokumentace způsobuje, že je obtížné přesně určit délku a charakter dokumentovaných struktur. Šířka chodeb neumožňuje získat úplný obraz o geometrii a vzájemných vztazích jednotlivých struktur, což komplikuje určení možného posunu na dané struktuře. Mocnost a typ výplně poruchových zón se často značně mění podél jejich průběhu, což ztěžuje stanovení jejich významnosti. 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. Strukturní dokumentaci stěn a zejména významnějších poruchových zón je nutné kombinovat s výsledky hydrogeologického a geofyzikálního výzkumu a projevy těchto struktur na jednotlivých stěnách vzájemně opětovně porovnat a propojit v terénu. Průběh významnějších poruchových zón je také vhodné korelovat s texturou celých chodeb v 3D modelu.

Metoda terénní dokumentace in-situ pomocí zákresů struktur do fotografií, měření kompasem a vyplňování standardizovaného formuláře se prokázala jako vysoce praktická i s ohledem na víceletý průběh projektu. Přenositelnost takto pořízených strukturních dat do 3D modelu je nejen efektivní, ale rovněž nutná. Importem dat do 3D modelovacího programu (v tomto případě MOVE 2023.1) a na připravené fotogrammetrické modely chodeb, nejen že dochází ke korekci strukturních dat (odchyly magnetického kompasu vlivem prostředí), ale rovněž k jejich usazení do geografického souřadného systému a tedy i k zajištění přenositelnosti výsledků primární dokumentace do GIS a dalších 2D/3D softwarů. Klíčové je pořízení fotografií pro tvorbu fotogrammetrického modelu ve stejné chvíli, kdy dochází k terénnímu měření. Jen takto lze zajistit přesnou lokalizaci měřené struktury. Obdobně lze přistupovat i k dalším primárním dokumentacím jako je hydrogeologická a petrologická, včetně možnosti lokalizace odběru vzorků, jejímž základem je lokalizace pomocí (anotované) fotografie.

Je třeba zdůraznit roli správného a fixního označení metráže podzemního díla, a to již při počátku ražby. Pro primární dokumentace během ražby, či bezprostředně po vyražení prostor, kdy je metráž odečítána na pásnu nataženém v chodbě je korektní usazení minimálně počátku chodby (0 m) důležité pro bezproblémový přenos měřených dat do modelovacích programů. Rovněž je vhodné při počátku ražby stanovit bod počátku chodby (0 m) i geodeticky s hodnotami X,Y,Z ,což opět pomůže práci zejména v 3D modelovacích programech a v GIS.

Fotogrammetrie

Při 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 a je třeba s touto znalostí k datům a možným nepřesnostem přistupovat.

Hydrogeologická dokumentace

V průběhu ražby a dalších technických prací v podzemí dochází ke změnám míst, rozsahu a vydatnosti drenáže (přítoky, průsaky) podzemní vody do chodeb. Hydrogeologická dokumentace proto musí probíhat vícefázově:

- Primární dokumentace bezprostředně po vyražení chodby – cílem této dokumentace je zastižení všech průsaků/přítoků včetně velmi slabých, které s postupující dobou od dokončení ražby mohou zcela vyschnout. Současně je v krátkém časovém intervalu po ražbě často možné lépe identifikovat struktury, na které je přítok vázán. Při pozdějších dokumentacích dochází k rozptýlu přítoku do ražbou otevřených puklin a foliací, vazba na konkrétní strukturu je zastřena.
- Revizní dokumentace v pravidelných intervalech – v rámci opakovaných dokumentací je možné sledovat vývoj přítoků, prostorové změny, změny vydatnosti apod.
- Závěrečná revizní dokumentace – musí předcházet hodnocení vyražených chodeb v kombinaci se závěrečnou strukturní dokumentací. Provázanost hydrogeologické a strukturně geologické dokumentace je nezbytnou podmínkou pro identifikaci struktur významných pro oběh podzemní vody. Závěrečné dokumentaci by mělo předcházet minimálně 14 dní stabilních podmínek v důlním díle.

Významným přínosem byly revizní hydrogeologické dokumentace realizované do 3D fotogrammetrického modelu. Dokumentace zakreslené do modelu následně umožňovaly kvalitní identifikaci vodivých struktur a jejich průběhu v chodbách. Vlivem špatného osvětlení a zašpinění stěn je situace in situ často špatně přehledná.

Při využití současné technologie ražby a úpravy počvy nelze stanovit celkový přítok podzemní vody do chodeb, případně do jejich částí. Rozptýlené průsaky ve formě občasných úkapů na mnoha místech vylučují jednorázová měření vydatnosti při dokumentaci. Průsaky ze dna (počvy) díla není možné sledovat vůbec. Pro sledování celkových přítoků by dna chodeb musela být vyfrézovaná se spádem k chodbě páteřní.

Všechny vrtý včetně předvrtů a vrtů geotechnických musí být karotovány metodami, které umožní ve vrtu zjistit místa přítoků a jejich vazbu na konkrétní struktury (akustická a optická televize, rezistivimetrie, PFL log). Bez provedení komplexu karotážních metod není možné stanovit hydrogeologicky významné struktury (viz vrt geotechnické stanice v chodbě L4a, Soejono et al. 2024).

Pro odběry vzorků vod i stanovení hydraulických vlastností hornin jsou vhodné svislé nebo šikmé úpadní vrtý. Tyto vrtý na rozdíl od vrtů horizontálních či dovrchních omezují ovlivnění vzorků/měření nenasyceným horninovým prostředím, které se v okolí chodeb nachází. Úvodní části těchto vrtů musí být kvalitně odizolovány od porušeného prostředí v blízkém okolí počvy.

3.4.3 Dokumentace vrtných jader

V rámci projektu se ukázalo, že i přes veškeré snahy v komunikaci s dodavatelem vrtných prací, není vždy jednoduché zajistit vhodnou manipulaci s vrtnými jádry a zároveň dostatečně přesnou práci s orientovaným jádrem, které pro některé práce je vhodné získat a mít k dispozici. V rámci dokumentace vrtných jader lze doporučit zpracování sjednocené vrtné kolonky, tedy sesazení veškerých výsledků získaných ze studie vrtných jader a samotných vrtů do jednoho souboru (karotážní metody, sken vrtného jádra, dokumentace petrografické, strukturní, RQD apod.).

Mezi další potencionální problémy patří nedostatky v ukládání a značení vrtných jader vedoucí k jejich posunu vůči reálné metráži vrtu, což následně výrazně komplikuje zpracování dat a jejich interpretaci. 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). Nejdůležitější zásady manipulace s vrtnými jádry jsou: zajištění proškolené vrtné osádky, zajištění míst bez výnosu jádra, důsledné značení orientace vrtného jádra, pokud je vrtáno orientovaně, opatrná manipulace se vzorkovnicemi, zaznamenání případných problémů se vzorkovnicemi (vysypání a přeskládání apod.).

3.4.4 Vodní tlakové zkoušky

Pro optimální rozložení měřených intervalů je nezbytné realizovat vybrané karotážní měření (kavernometrie, resistivimetrie, ABI) a zhodnotit horninové prostředí před provedením samotných vodních tlakových 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.

3.4.5 Hydrogeologický monitoring

Vzhledem k průběhu razících prací bylo nutné pro každé měření, případně odběr vzorků, obnovit systém jímacích objektů (plachet). Se zničením monitorovacích prvků kvůli odstřelům je nutné počítat i do budoucna a mít s sebou dostatek materiálu na případné opravy.

V případě omezené dostupnosti stálého připojení do elektrické sítě, je značně omezen výběr monitorovacích prvků. Jedná se hlavně o měření průtoků, která v drtivé většině potřebují napájení ze sítě 220 V. Vodoměry fungující bez připojení k elektrické síti mají omezený rozsah průtoků, které jsou schopné detekovat.

V rámci určení chemického složení vody bylo realizováno široké spektrum stanovení. Některá byla opakovaně pod detekční limit dané metody. Doporučujeme proto v následujících fázích monitoringu vynechat stanovení amoniaku, dusičnanů a dusitanů, fosforu, olova, radia 226 a uranu.

3.4.6 Geomechanika

V oblasti laboratorního stanovení fyzikálně-mechanických vlastností považujeme za zásadní, pokud jde o realizaci následných projektů v budoucnosti, zohlednění následujících poznatků, které byly získány v průběhu řešení projektu geologické a geotechnické charakterizace horninového prostředí PVP Bukov II:

- v případě hodnocení silně stavebně anizotropního prostředí, obdobného PVP Bukov a dolu Rožná obecně, doporučujeme stanovovat základní fyzikální, mechanické a deformační vlastnosti ve třech základních směrech vzhledem k texturní anizotropii, tj. směru kolmém, paralelním i šikmém k plochám metamorfní foliace;
- s ohledem na místní proměnlivost horninového prostředí doporučujeme provést odběr vzorků horniny formou širokoprofilového vrtání do boků, popř. čeleb důlních děl, nikoliv z rozvalu po trhací práci;
- u stanovování modulů přetvárnosti/pružnosti se jako žádoucí jeví sjednotit způsob registrace a vyhodnocování naměřených dat (registrace – LVDT vs. lepené tenzometry, vyhodnocování – rozsah maximální působící síly, z něhož bude z pracovního diagramu modul stanoven).

Na základě zkušeností s měřením odrazivosti pomocí Schmidtova kladívka in situ na stěnách chodeb PVP Bukov II lze tuto metodu doporučit jen a pouze pro orientační stanovení pevnosti v prostém tlaku, a to výhradně po validaci hodnot odrazivosti v závislosti na místních geotechnických vlastnostech zájmové lokality (litologický druh horniny, výskyt foliace a směr měření odrazivosti vzhledem k jejímu průběhu, strukturní stavba a míra primárního porušení HM, způsob ražení chodeb apod.). Měla by být přijata organizačně jednotná metodická opatření pro zajištění co možná nejvíce vypovídajících výsledků měření, např. stanovení přesné metodiky měření, eliminace vlivu lidského faktoru na kvalitu měření a způsob odběru horninových vzorků pro korelaci hodnot odrazivosti k pevnostním parametrům. Dle našeho názoru by tato metoda mohla být použita například pro primární a operativní rozdělení HM do kvaziisotropních celků na základě profilového měření na bocích důlních děl, jako jeden z prvotních orientačních parametrů zahrnutých do klasifikačního systému HM. Domníváme se, že vyšší spolehlivosti při měření odrazivosti jak pro stanovení pevnosti, tak i například pro rozdělení HM do kvaziisotropních celků by mohlo být dosaženo v případě použití kontinuálního strojního plnoprofilového ražení (např. TBM). V případě použití tunelovacích strojů bude docházet k minimálnímu sekundárnímu porušování HM, což bude mít příznivý dopad na distribuci a rozptyl hodnot odrazivosti. Problém může být v lokální drsnosti horniny na stěně boku důlního díla v místě úderů (možná nutná úprava plochy místa úderu před vlastním měřením odrazivosti).

Pro měření napětí HM metodou hydroštěpení stěn vrtu lze maximálně doporučit využití doprovodných metod pro stanovení vhodných měřících poloh. Pro tento účel mohou být využity karotážní sondy ABI, resp. HiRAT a OBI, resp. OPTV. První ze zmíněných sond může být rovněž s výhodou použita jak pro identifikaci vytvořené trhliny hydroštěpením, tak pro stanovení její orientace v prostoru (směr a úklon trhliny). Použití těchto sond lze rovněž s výhodou doporučit pro identifikaci měřících poloh ve vrtu u měření přetvárných vlastností HM v podmínkách in situ sondou Goodman Jack.

Je nutné si uvědomit, že metoda měření napětí HM pomocí hydroštěpení by měla být v projektech týkajících se HÚ aplikována v posledním pořadí projektovaných prací ve vrtech z důvodu štěpení stěn vrtu (možné ovlivnění vlastností HM vytvořením sekundárních trhlin

v HM). V případě technologického (nutného) postupného propažování vrtů by měla být tato metoda aplikována před zapažením úseku realizovaného vrtu s měřicí pozicí, před zahájením dalšího prohlubování vrtu, samozřejmě po provedení nutných geofyzikálních měření ve vrtu.

Jak se ukázalo i na lokalitě PVP Bukov II, u anizotropního HM může být problematická identifikace vytvořené trhliny pomocí obtiskové sondy, proto bude mít metoda hydroštěpení efektivnější využití v případě lokalit s malou anizotropií HM (např. lokality Březový potok, Horka, Hrádek). Pro správnou interpretaci metody hydroštěpení stěn vrtu v klasickém uspořádání s aplikací obtiskového pakru, zvláště v anizotropním prostředí, by tato metoda měření napětí měla být kombinována s metodami pro rekognoskaci a určení prostorové orientace vytvořené trhliny (např. ABI, akustické emise apod.). Při současném použití metody měření napětí HM hydroštěpením a metod zobrazování stavu stěn vrtu (ABI a OBI), by jako doplňkové informace o napěťovém stavu mohly být využity výsledky analýzy tzv. „breakoutů“ a analýzy ovalizace průřezu vrtů (jedná se především o validaci směru působení hlavních napětí kolmo na podélnou osu vrtu). Při jádrovém vrtání napěťových vrtů může být rovněž realizována analýza horninových jader z měřicích vrtů na tzv. „disking“, pokud se vyskytne (doplňková informace o oblastech působení zvýšených napětí v HM).

3.4.7 Geofyzika

Geofyzikální měření bylo realizováno v rámci přípravy a budování PVP Bukov II v několika etapách. V rámci úvodního vrtného průzkumu bylo prostředí HM sledováno metodou seismické tomografie (seismická měření mezi vrtu). V průběhu dalších prací byly výsledky těchto měření často zmiňovány, zjištěné seismické rychlosti jsou jedním ze vstupů do klasifikačního systému horninových bloků a staly se také součástí strukturněgeologického modelu. Pro podobné projekty je dobré tyto práce zachovat. Relevantnost výstupů z měření seismické tomografie je určena mimo jiné také počtem využitých vrtů a vzdáleností mezi nimi. Optimální vzdálenost mezi vrtu je do 50 m. S ohledem na návaznost klasifikačního systému na výsledky seismické tomografie je vhodné zachovat pozice průzkumných vrtů v místech budoucích chodeb. Všechny průzkumné vrtu by měly být sledovány také karotážními metodami, které by upřesnily geomechanický stav HM v těsném okolí vrtu (ultrazvuková měření s plným vlnovým záznamem, ABI, OBI, sledování přítoků) a měly by v nich být provedeny vodní tlakové zkoušky. Nezbytné je měření geometrických parametrů vrtů (inklinometrie).

Seismická tomografie byla také hlavní geofyzikální metodou při sledování HM v okolí geotechnických stanic. Rychlostní řezy získané měřeními mezi vrtu a mezi stěnou a vrtem zprostředkovaly obraz geomechanického stavu masivu nejen v těsném okolí provedených vrtů, ale na rozdíl od ostatních metod zahrnovaly výsledky měření celou část prostoru mezi vrtu. Výsledný obraz rychlostního pole byl použit pro sestavení interpretačního schématu, které zobrazilo geomechanický stav HM v prostoru mezi vrtu a pozici interpretovaných poruch.

Seismická refrakční tomografie byla prováděna v rámci charakterizace HM v okolí nově vyražených chodeb. Závislost rychlosti šíření podélných seismických vln na vzdálenosti mezi diskontinuitami v HM byla využita jako základní princip interpretace k rozdělení HM podle míry porušení (menší vzdálenost mezi diskontinuitami způsobuje pokles seismických rychlostí). Charakter průběhu seismické rychlosti sledovaný pomocí gradientu rychlostního pole ve směru kolmo na stěnu chody byl využit k popisu rozsahu mocnosti EDZ. Zjištěné hodnoty

seismických rychlostí v okolí sledovaných laboratorních chodeb jsou jedním ze vstupních parametrů pro klasifikaci horninového bloku.

Pro metodu ERT byly v podzemí uranového dolu specifické podmínky dané vysokými elektrickými odpory horninového prostředí (desítky tisíc Ωm), které kladly vysoké nároky na výkon měřicí aparatury, uzemnění elektrod a kabelové sekce. Rozestup elektrod AB 15 m se ukazuje jako hraniční, nicméně dostatečný pro popis EDZ a blízkého okolí horninového prostředí. Při měření na stěnách laboratorních chodeb svírajících pravý úhel byl, vzhledem ke geometrii měření, zvolen sekvenční způsob měření, kdy každá stěna byla změřena a zpracována samostatně, a následně izolinie odporů vykresleny společně v jednom souřadném systému. Kovové prvky vystrojení dolu (koleje, hajcmány) mohou ovlivnit průběh proudových linií a tím i hodnotu měrného elektrického odporu při větším rozstupu proudových elektrod. To se v izoohmických řezech projeví ve větší vzdálenosti od stěny laboratorní chodby výraznou nízkoodporovou oblastí. I přes výše uvedené se metoda ERT ukázala jako vhodná metoda pro charakterizaci horninového prostředí.

Charakterizace prostředí v okolí stěn nově vyražených chodeb byla prováděna spolu se strukturněgeologickým a hydrogeologickým mapováním prakticky ihned po dokončení díla a zpřístupnění pracoviště. Geofyzikální měření i další uvedené činnosti jsou prostorově ukotveny na pracovní staničení ražby, které by mělo být provedeno s odpovídající přesností a fixováno pomocí stabilního značení, a to nejlépe na obou stěnách chodeb. Vzhledem k členitosti stěn vyražených chodeb je nezbytné geodeticky zaměřit pozici každého snímače (elektrody), například kombinací fotogrammetrie a klasického zaměření totální stanicí. Zvolená skladba geofyzikálních metod (seismická refrakční tomografie, odporová elektrická měření ERT a georadar) dobře posloužila k určení charakteru a stavu HM v blízkém okolí stěn sledovaných chodeb. Hloubkový dosah měření je v případě seismických refrakčních profilových metod v daném prostředí kolem 4 m. Odporová měření byla vyhodnocena s dosahem do vzdálenosti 5–6 m od líce stěny, v případě georadaru se pak jednalo o 3–4 m. V případě seismické refrakční tomografie by bylo možné zvýšit hloubkový dosah využitím horizontálních vrtů ve stěnách chodeb (kombinace měření na stěně a v uspořádání stěna/vrt).

V rámci projektu byly výsledky geofyzikální charakterizace na stěnách chodeb využity pro plánování navazujících prací – určení pozice zkušebních komor. Tento úkol byl plněn dostatečně, komplexní geofyzikální hodnocení jednotlivých chodeb přineslo řadu informací o geomechanickém stavu HM v okolí stěn nově vyraženého díla, ty byly propojeny se strukturněgeologickou a hydrogeologickou úvodní charakterizací do celkového hodnocení prostředí v okolí sledované laboratorní chodby. V pozdějších fázích projektu vstupovaly informace z geofyzikálního průzkumu do strukturněgeologického modelu. Výsledky zejména seismické refrakční tomografie byly použity pro charakterizaci rozsahu EDZ na stěnách laboratorních chodeb (spolu s vyhodnocením VTZ v krátkých vrtech). Výsledky geofyzikální charakterizace, konkrétně rychlosti šíření seismických vln, jsou jedním ze vstupních parametrů do hodnocení dle nového klasifikačního systému vhodnosti horninového masivu.

3.4.8 Klasifikační systém horninového masivu pro účely ražby ukládací chodby

Na rozdíl od existujících geotechnických klasifikací jsou do klasifikačního systému URA zahrnuty parametry a vylučovací kritéria zohledňující dlouhodobou mechanickou stabilitu (pravděpodobnost reaktivace struktur a možné seismicity) a izolační funkci horninového prostředí. Hlavními výhodami jsou jednoduchost a efektivita hodnotícího procesu dosažená využitím malého počtu klasifikačních parametrů, které dostatečně charakterizují kritické vlastnosti horninového prostředí. Klíčový je důraz na 3D vizualizaci reálné prostorové distribuce a lokalizace důležitých geologických a strukturních prvků a výsledků klasifikace, což významně zjednodušuje a zefektivňuje jejich využití pro plánování výstavby. Pro tyto účely se aktuálně jeví jako nejvhodnější metoda fotogrammetrické rekonstrukce podzemních prostor. Tvorba těchto modelů je možná i během výstavby podzemních prostor (v době pořizování primární dokumentace), přičemž jejich usazení do korektní pozice v prostoru zajišťují geodeticky zaměřené vlíčovací body. Hlavním benefitem jejich využití, nejen pro účely klasifikačního systému, je možnost tvorby detailní fototextury, která hraje klíčovou roli při identifikaci jednotlivých strukturních prvků a stále není běžnou součástí např. laserscanů.

Potencionální nevýhodou klasifikačního systému je jeho specializace na geologické podmínky PVP Bukov II. Tato nevýhoda je kompenzována vysokou flexibilitou systému, která umožňuje jeho snadnou modifikaci. Díky své modulární struktuře a možnosti úprav umožňuje tento systém relativně snadné přizpůsobení pro jiné lokality. Pro odlišné geologické podmínky je nutné zvážit použití jiných klasifikačních parametrů, využití jiných nebo dalších výzkumných metod a také je nezbytné nově definovat limitní hodnoty klasifikačních parametrů. Změny metod, parametrů nebo jejich hodnot je nutné testovat v reálném podzemním prostředí konkrétní lokality. Přehledný výstup klasifikace vybraných vrtů a hlavních chodeb PVP Bukov II je uveden ve zprávě Soejono et al. (2025).

Reference

- BARTON N. (2007): Linking Seismic Velocity to Rock Quality Q and to Seismic Quality Q in the Near-Surface. 10.3997/2214-4609.201401583 ,
- BARTON N., LIEN R., LUNDE J. (1974): Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. – Rock Mechanics 6(4), 189-236.
- BIENIAWSKI Z.T. (1989): Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil and petroleum engineering. – John Wiley & Sons, Inc., New York, 251 pp.
- BLÁHA P., DURAS R., GEBAUER, J., NOVOTNÁ, J. (2017): Souhrn výsledků geofyzikálních měření na lokalitě Bukov (Etapa 5). – TZ 184/2017, SÚRAO, Praha.
- BUDETTA P., RISO R., DE LUCA, C. (2001): Correlations between jointing and seismic velocities in highly fractured rock masses. – Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 60. 185-192. 10.1007/s100640100097.
- BUKOVSKÁ Z., SOEJONO I., VONDROVIC L., VAVRO M., SOUČEK 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 – TZ596/2022, 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, 172 s.
- 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., BRITNA M., TRÍSKALOVÁ I., VELÍMKOVÁ A. (2025): Geologická a geotechnická charakterizace horninového prostředí – PVP Bukov II – čtvrtá průběžná zpráva. – TZ 811/2025, SÚRAO, Praha.
- BUKOVSKÁ Z., ŠVAGERA O., CHABR T., LEICHMANN J., SOSNA K., SOUČEK K., VAVRO M., ZUNA M., NAVRÁTIL P., BOHDÁLEK P., BOŠKOVÁ M., DOBEŠ P., FILIPSKÝ D., FRANĚK J., GALEKOVÁ E., GEORGIOVSKÁ L., HANÁK J., HAVLOVÁ V., HLISNIKOVSKÝ K., HOLECZY D., JANKOVSKÝ F., JAROŠ

- M., JELÍNEK J., JELÍNEK J., KNÉSL I., KOUČKÁ 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., VERNER, K., BURIÁNEK, D., DOBEŠ, P., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ, B., ERBAN, V., FRANĚK, J., HALODOVÁ, P., HOLEČEK J., JAČKOVÁ, I., JELÉNEK, J., KOPAČKOVÁ V., KOUČKÁ, 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, Praha, 692 pp.
- ČERVINKA R., GONDOLLI J., HAVLOVÁ V., RUKAVIČKOVÁ L. (2016): Výběr reprezentativních podzemních vod a příprava jejich syntetických ekvivalentů. Technická zpráva 41/2016, SÚRAO.
- DALLMEYER R.D., FRANKE W., WEBER, K. (1995): Pre-Permian Geology of Central and Eastern Europe. Springer, Berlin, 1–593 p.
- FLOYD P.A., LEVERIDGE B.E. (1987): Tectonic environment of the Devonian Gramscatho basin, south Cornwall: framework mode and geochemical evidence from turbiditic sandstones. – Journal of the Geological Society, London, 144, 531–542.
- GREEN E. C. R., WHITE R. W., DIENER J. F. A., POWELL R., HOLLAND T. J. B., PALIN R. M. (2016). Activity–composition relations for the calculation of partial melting equilibria in metabasic rocks. – Journal of Metamorphic Geology 34, 845–869.
- GUADAGNO F. M., NUNZIATA C. (1993): Seismic velocities of fractured carbonate rocks (southern Apennines, Italy). – *Geophysical Journal International*, Volume 113, Issue 3, June 1993, Pages 739–746, <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1993.tb04664.x>,
- HÁJEK A., KONEČNÝ P., ŠŇUPÁREK R., ČUMPL J., HOLÉČZY D., PECH E., BEZUŠKO P., HORTVÍK K., KONEČNÝ P. JR. (2000): Geomechanický model ložisek v rudním poli Rožná – Olší s ohledem na ukončení exploatace. Díl I – přírodní poměry. – DIAMO, s.p., o.z. GEAM a ÚGN AV ČR, Ostrava.
- HANÁK J., BREITER K., RUKAVIČKOVÁ L., CHLUPÁČOVÁ M., ONDRA P., SOSNA K., NOVÁK P., HAVLOVÁ V., NOVÁKOVÁ L. (2010): Výzkum vlivu mezizrnné propustnosti granitů na bezpečnost hlubinného ukládání do geologických formací a vývoj metodiky a měřicí aparatury. Odběr jádra ze srovnávacích vrtů. – Závěrečná zpráva, 64 s. MS Česká geologická služba Praha.
- HOEK E., BROWN E.T. (1997): Practical estimates of rock mass strength. – International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 34, 8, 1165–1186.
- HUANG J., FLYNN, W., REYES-MONTES, J., MUSTONEN S., YOUNG, R. P., MAXWELL S., HAYCOX J. (2016): Ultrasonic Tomography of the Excavation Damage Zone at the Onkalo, Nuclear Waste Repository Facility, Finland.
- HUDEČEK V., ŠANCER J., ZUBÍČEK P. (2019): Certifikovaná metodika pro vyhodnocování geomechanických vlastností hornin. – VŠB-Technická univerzita Ostrava, 49 s.
- CHABR T., FILIPSKÝ D. (2021): Zjištění prostorové homogenity horninového prostředí před provedením trhačích prací pomocí seismické tomografie. – TZ 548/2021, Archiv SÚRAO.

- JAROŠ M., NAVRÁTIL P., PATOČKA M., HLISNIKOVSKÝ K. (2021): Příloha 5 Interpretace geologické dokumentace vrtů S-28, S-29, S-30, S-32 a S-33 (1 : 500). – archiv SÚRAO, Praha.
- KALÁB Z. (2007): Mělká podzemní díla a vibrace. – *Tunel*, 2/2007, 12–20.
- KALÁB Z., PANDULA B., STOLÁRIK M., KONDELA J. (2011): Příspěvek k měření vibrací vyvolaných při ražbě tunelů. – *EGRSE. – Exploration Geophysics, Remote Sensing and Environment*. Roč. 18, č. 3 (2011), s. 62-71. ISSN 1803-1447.
- KŘÍBEK B., HÁJEK A. (eds) (2005): Uranové ložisko Rožná, Model pozdně variských a povariských mineralizací. – Česká geologická služba. Praha. 100 p.
- KŘÍBEK B., ŽÁK K., DOBEŠ P., LEICHMANN J., PUDILOVÁ M., RENÉ M., SCHARM B., SCHARMOVÁ M., HÁJEK A., HOLECZY D., HEIN U., LEHMANN B. (2009): The Rožná uranium deposit (Bohemian Massif, Czech Republic): shear zone-hosted, late Variscan and post-Variscan hydrothermal mineralization. – *Mineralium Deposita*, 44, 1, 99–128.
- MCLENNAN, S.M., HEMMING, S., MCDANIEL, D.K., HANSON, G.N. (1993): Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics. In: Johnsson, M.J., Basu, A. (Eds.), *Processes Controlling the Compositions of Clastic Sediments*. – *Geol. Soc. Am. Spec. Pap.*, 284, 21–40.
- MOYE D. G., 1967. Diamond drilling for foundation exploration. – *Civil Eng. Trans., Inst. Eng. Australia*, pp 95–100.
- PEARCE, J.A. (2008): Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust. – *Lithos* 100, 14–48.
- SAUKKONEN K., (2008): Evaluation of Vibration Caused Damages. – Working Report, POSIVA 2008-72.
- 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.
- SMUTEK J., AUGUSTA J., DOHNÁLKOVÁ M., GOLUBKO A., HAUSMANNOVÁ L., MAREDA L., MATULOVÁ M., MIKLÁŠ O., VONDROVIC L. (2023): Program výzkumu, vývoje a demonstračních aktivit pro Podzemní výzkumné pracoviště Bukov 2023. – TZ 683/2023, SÚRAO, Praha.
- 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., ČERMÁK 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 165 s.
- 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.
- 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.

- SOUČEK K., VAVRO M., STAŠ L., KALÁB Z., KONÍČEK P., GEORGIOVSKÁ L., KALÁB T., KONEČNÝ P., KOLCUN A., KRÁLOVÁ L., KUBINA L., LEDNICKÁ M., MALÍK J., MARTINEC P., PTÁČEK J., VAVRO L., WACLAWIK P., ZAJÍCOVÁ V. (2018): Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov – část II Geotechnická charakterizace. – TZ 221/2018, Archiv SÚRAO.
- 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.
- TESAŘ, O. (1977): Návrh klasifikace skalních hornin pro podzemní stavby v Praze. – Sborník symposia – Podzemní stavby 77, Praha, část 1. in *Zpravodaj metro*, roč. 8, č.1, s. 8–11
- TESAŘ, O. (1978): Klasifikace skalních hornin pro podzemní stavby v Praze.-Sborník přednášek konference Geotechnický prieskum pre tunely a navrhovanie tunelových ostění (II. díl), Vysoké Tatry-Štrbské Pleso, s. 110-11
- ULUSAY, R. (ed) (2007): The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974-2006. Commission on Testing Methods, International Society for Rock Mechanics, Ankara, Turkey.
- VALTER M., MACÁKOVÁ A., MAREDA L., ŠTOR T., VENCL M. (2023): Strategie vytváření popisných modelů potenciálních lokalit pro umístění hlubinného úložiště v ČR. TZ 705/2023, Praha.
- VAVRO M., SOUČEK K., STAŠ L., WACLAWIK P., VAVRO L., KONÍČEK P., PTÁČEK J. (2015): Application of alternative methods for determination of rock quality designation (RQD) index: A case study from the Rožná I uranium mine, Strážek Moldanubicum, Bohemian Massif, Czech Republic. *Canadian Geotechnical Journal*, 52, 10, 1466–1476.
- WHITE R. W., POWELL R., HOLLAND T. J. B., JOHNSON T. E., GREEN E. C. R. (2014). New mineral activity–composition relations for thermodynamic calculations in metapelitic systems. *Journal of Metamorphic Geology* 32, 261–286.
- WOOD, D.A. (1980): The application of a Th–Hf–Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary Volcanic Province. *Earth and Planetary Science Letters* 50, 11–30.
- ZAVORAL J., CINK R., ČERVENÝ J., EICHLER J., HOŘEJŠÍ V., CHLUMSKÝ J., KAŠPAR I., KURKA J., KŘÍŽOVÁ H., MENZELOVÁ O., MITTNEROVÁ A., MÜHLDOF J., PAVLÍK J., POLÁK V., PŘIDALOVÁ O., SMEJKAL A., ŠKOPEK J., ŠTASTNÝ J., ŠVANDA A., VANĚČEK I. (1987): Metodiky laboratorních zkoušek v mechanice zemin a hornin, III – Mechanika hornin. – Český geologický úřad Praha, 90 s.
- ZUNA M., GVOŽDÍK L., MILICKÝ M., SOSNA K., ŠVAGERA O., JANKOVSKÝ F., ŘIHOŠEK J., KABELE P. (2024): Výzkum puklinové konektivity v PVP Bukov – Závěrečná zpráva. TZ SÚRAO 747/2024.

Technické normy a standardy:

- ASTM D7625-10 Standard Test Method for Laboratory Determination of Abrasiveness of Rock Using the CERCHAR Method, 2010.
- ČSN 72 1154 Stanovení měrné a objemové hmotnosti, hutnosti a pórovitosti přírodního stavebního kamene. Praha: Úřad pro normalizaci a měření. 1983. 8 s. ČSN CEN ISO/TS

- 17892-11 – Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin – Část 11: Stanovení propustnosti zemin při konstantním a proměnném spádu, 2005.
- ČSN 73 0040 (ČSN 730040). Zatížení stavebních objektů technickou seizmicitou a jejich odezva. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019.
- ČSN EN 1926 (72 1142) Zkušební metody přírodního kamene - Stanovení pevnosti v prostém tlaku. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2007. 20 s.
- ČSN EN 1936 (72 1143) Zkušební metody přírodního kamene - Stanovení měrné a objemové hmotnosti a celkové a otevřené pórovitosti. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2007. 12 s.
- ČSN EN 13755 (72 1149) Zkušební metody přírodního kamene - Stanovení nasákavosti vodou za atmosférického tlaku. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2008. 8 s.
- ČSN EN 14581 (72 1131) Zkušební metody přírodního kamene – Stanovení součinitele lineární tepelné roztažnosti. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2005. 12 s.
- 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.
- ČSN CEN ISO/TS 17892-11 (721007). Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin - Část 11: Stanovení propustnosti zemin při konstantním a proměnném spádu.
- ISRM (1978a): International Society For Rock Mechanics Commission On Testing Methods: Suggested methods for determining sound velocity. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 15, 2, 53-58.
- ISRM (1978b): International Society For Rock Mechanics Commission On Testing Methods: Suggested methods for determining tensile strength of rock materials. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 15, 3, 99-103.
- ISRM (1979) : International Society For Rock Mechanics Commission On Testing Methods: Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials: Part 1. Suggested method for determination of the uniaxial compressive strength of rock materials. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 16, 2, 137-138.



SÚRAO

SPRÁVA ÚLOŽIŠŤ
RADIOAKTIVNÍCH
ODPADŮ

NAŠE
BEZPEČNÁ
BUDOUCNOST

info@surao.cz | www.surao.cz