Technická zpráva 811/2025

GEOLOGICKÁ A GEOTECHNICKÁ CHARAKTERIZACE HORNINOVÉHO PROSTŘEDÍ PVP BUKOV II

ČTVRTÁ PRŮBĚŽNÁ ZPRÁVA

Autoři: Zita Bukovská a kolektiv



Praha, 2025

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

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

IDENTIFIKACE V RÁMCI PROJEKTU:

Průběžná 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., 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., GEORGIOU L., JANEČEK I., KOČAN K., ZUNA M., HOFMAN D., JÁKL M., BRTNA M., PEŘESTÝ V., HÁJEK T., HOLEČEK J., MYŠKA O., TŘÍSKALOVÁ I., VELÍMKOVÁ A., KOHOUŠEK I. (2025): Geologická a geotechnická charakterizace horninového prostředí – PVP Bukov II – čtvrtá průběžná zpráva. – TZ811/2025, 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, Švagera O.¹, Kryl J.¹, Řihošek 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, Janeček I.⁴., Kočan K.⁶, Hofman D.², Jákl M.², Brtna M.², Peřestý V.¹, Hájek T.¹, Holeček J.¹, Myška O.¹, Třískalová I.¹, Velímková A.¹, Kohoušek I.³

Lucie Mareda Manažer projektu (SÚRAO) 5. 3. 2025 Igor Soejono Manažer projektu (Společnost Bukov II) 5. 3. 2025











Obsah

1 Úv	od	11
2 Pos	stup řešení projektu	14
2.1	Geologická a strukturněgeologická charakterizace	14
2.1.1	Dokumentace čeleb	14
2.1.2	3D sken chodeb	19
2.1.3	Geologická dokumentace vyražených prostor	21
2.1.4	Dokumentace vrtných jader	23
2.1.5	Strukturněgeologická mapa	25
2.2	Petrografická a geochemická charakteristika	
2.2.1	Petrografická charakteristika	
2.2.2	Geochemie žilných a puklinových mineralizací	33
2.2.3	Celohorninová geochemická charakteristika	42
2.2.4	Oxidačně-redukční podmínky	44
2.3	3D strukturněgeologický model	73
2.4	Hydrogeologická charakterizace	75
2.4.1	Hydrogeologická dokumentace	75
2.4.2	Studium původu a stáří vod	90
2.4.3	Hydrogeologický monitoring	93
2.5	Transportní vlastnosti	105
2.5.1	Příprava horninových vzorků	105
2.5.2	Charakterizace horninových vzorků	105
2.5.3	Difuzní experimenty	114
2.5.4	Sorpční experimenty	119
2.5.5	Závěr zhodnocení	125
2.6	Stanovení fyzikálně mechanických a geotechnických vlastností hornin laboratorr 126	ními testy
2.6.1	Fyzikální vlastnosti	127
2.6.2	Tepelné vlastnosti	132
2.6.3	Pevnostní a deformační vlastnosti	133
2.6.4	Technologické vlastnosti	137
2.6.5	Petrofyzikální vlastnosti	138
2.7	Stanovení fyzikálně mechanických a geotechnických vlastností hornin in-situ testy	154
2.7.1	Schmidtovo kladívko	154
2.7.2	Akustická televize	160
2.7.3	Goodman Jack	160
2.7.4	Stanovení napětí metodou hydraulického štěpení stěn vrtného stvolu	164

2.8	Geofyzikální charakterizace	171
2.8.1	Georadar	171
2.8.2	ERT	173
2.8.3	Mělká refrakční seismika	174
2.8.4	Výsledky geofyzikálních měření v chodbě L4c, L4d	175
2.8.5	Výsledky geofyzikálních měření v chodbě V5-6	177
2.8.6	Výsledky geofyzikálních měření v okolí ZK v chodbě L7	179
2.9	Seismické účinky trhacích prací	
2.9.1	Měření seismických účinků trhacích prací	
2.9.2	Vyhodnocení záznamů seismických účinků trhacích prací	
2.10	Charakterizace EDZ	
2.10.1	Způsob zpracování výsledků měření pomocí VTZ pro EDZ	
2.10.2	Shrnutí výsledků měření	201
2.11	Systém klasifikace horninových bloků	
2.12	Integrace dat do GIS projektu	205
3 Shi	nutí	

Seznam elektronických příloh:

Elektronická příloha 1 Tabulka s výsledky dokumentace čeleb a chodeb Elektronická příloha 2 Přehled 3D fotogrammetrických modelů čeleb Elektronická příloha 3 Dokumentace vrtných jader – WellCad, excel a pdf Elektronická příloha 4 Strukturněgeologická mapa PVP Bukov II Elektronická příloha 5 Geochemie žilných a puklinových mineralizací Elektronická příloha 6 Dokumentace přítoků – terénní měření Elektronická příloha 7 Výsledky hydrochemických analýz Elektronická příloha 8 Protokoly chemických analýz podzemních vod Elektronická příloha 9 Hydrogeologický monitoring – chemické složení vod Elektronická příloha 10 Výsledky stanovení transportních charakteristik Elektronická příloha 11 Stanovení a vyhodnocení rtuťové porozimetrie dodaných vzorků Elektronická příloha 12 Stanovení mechanických vlastností migmatitu z lokality PVP Bukov II Elektronická příloha 13 PVP Bukov II – karotáž – zpráva o karotážním měření 2 průzkumných vrtů Elektronická příloha 14 Protokoly o zkoušce uniaxiálním lisem Goodman Jack Elektronická příloha 15 Stanovení mechanických vlastností hornin – studie (výzkumná zpráva o výsledcích stanovení mechanických vlastností hornin, vypracovaná ZLVCH HGF VŠB-TUO) Elektronická příloha 16 Geofyzikální měření v laboratorní chodbě L4C a L4D. Profilové řezy (radarový, rychlostní a odporový) a souhrnný interpretační řez

Elektronická příloha 17 Geofyzikální měření v chodbě V5-6. Profilové řezy (radarový, rychlostní a odporový) a souhrnný interpretační řez

Elektronická příloha 18 Geofyzikální měření v okolí zkušebních komor laboratorní chodby L7. Profilové řezy (radarový, rychlostní a odporový) a souhrnný interpretační řez

Elektronická příloha 19 Zpracování seismických záznamů účinků trhacích prací – souhrnná tabulka, grafické shrnutí pro jednotlivé chodby

Seznam použitých zkratek:

AAS	atomový absorpční spektrometr
AAS-Cu	Cu(II)-trien stanovení pomocí atomového absorpčního spektrometru (AAS)
ABI	akustická karotáž
AM	aritmetický průměr
AMS	anizotropie magnetické susceptibility
apfu	atom per formula unit
AV ČR	Akademie věd České republiky
BET	teorie Bruknauer–Emmett–Teller
CDT	standard Canvon Diablo
CEC	kationtová výměnná kanacita
CEG	Centrum experimentální geotechniky
C V	variační koeficient
ČGS	
ČSN	Česká tochnická norma
ČVUT	Česká uvseká učení technická
a. p.	dokumentachi bod
Dm	mineralogicka hustota
Do	objemová hustota
E	modul přetvárnosti
E _{20-40%}	modul přetvárnosti stanovený v rozsahu 20–40 % maximální působící síly
EDZ	Excavation Damage Zone
	elektricka odporova tomografie
EO	
	magneticka foliace
FAAS	plamenova absorbchi spektrometne
FES	
FIA	fiuld inclusions assemblages
FMV	tyzikalne mechanicke a geotechnicke vlastnosti
GIS	geograficky informachi system
GS	geotechnická stanice
HFSE	high field strength elements
	norninovy masiv
	heavy rere earth elemente
	tritiová voda
ΗÚ	hlubinné úložiště
ICP-MS	inductively coupled plasma mass spectrometry
ICP-OES	inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy
К	obsah draslíku
К	hydraulická vodivost
K (⊥)	směr kolmý k metamorfní foliaci horniny
k1, k2, k3	maximální, prostřední a minimální susceptibilita
k	magnetická susceptibilita, nebo také SUSC
k ₁₀	koeficient hydraulické vodivosti při 10 °C
Kd	rozdělovací (sorpční) distribuční koeficient
k _ρ	koeficient plynopropustnosti
L	magnetická lineace
LILE	large ion lithophile elements
	~ 1

LLS	lineární regrese nejmenších čtverců
LREE	light rare earth elements
LVDT	linear variable differential transformer
LVR	liquid vapor ratio
MAC	micro-analysis consultant
MIP	vysokotlaká rtuťová porozimetrie
NMORB	normal mid-ocean ridge basalt
OBI	ontická karotáž
ORP	ovidačně-redukční notenciál
D	stupeň apizotropie
	stupen anizotropie
F (//)	
р	oleviena porovilosi
PDB	standard Pee Dee Belemnite
ppd	precipitated, tj. vysrážený
PRF UK	Přírodovědecká fakulta UK
PVP	podzemní výzkumné pracoviště
Q	Quality
QTS	Quality Testing System
RAO	radioaktivní odpad
REE	rare aerth elements
RMR	Rock Mass Rating
RQD	Rock Quality Designation
S.D.	smerodatna odchylka
SGW	synteticka graniticka podzemni voda
SND	stendard mean ecoan water
SPI	standard mean ocean water
SRF	stress reduction factor
SSA	specifický povrch
SÚRAO	Śpráva úlożišť radioaktivních odpadů
Т	tvarový parametr
Т	transmisivita
TDS	celkové rozpuštěné pevné látky v roztoku
TOC	celkový obsah organického uhlíku
TP	trhací práce
TU	tritium unit
T.V.	technická voda
U	obsahy uranu
UCS	pevnost v prostém tlaku
URA	underground rock mass-assesment
URF	underground research facility
UV-VIS	UV-VIS spektrometr
UZV	ultrazvuková vlna
ÚGN	Ústav geoniky
V-PDB	standard Vienna Pee Dee Belemnite
VO	velkoobjemový vzorek
VŠB–TUO	Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
VŠCHT	Vysoká škola chemicko-technologická
XRD	rentgenová difrakce
ZDA	základní dokumentační analýza
ZK	zkušební komora
ZLVCH HGF	Zkušební laboratoře výzkumného centra hornin Hornicko-geologické fakulty
 7ž	ztráta žíháním
-	

- μ Poissonovo číslo
- σ elektrická konduktivita
- б_{Pd} pevnost v prostém tlaku
- σ_{Ptp} pevnost v příčném tahu stanovená tzv. brazilskou zkouškou
- Ø aritmetický průměr

Abstrakt

Tato zpráva popisuje práce realizované v posledním roce řešení veřejné zakázky Geologická a geotechnická charakterizace horninového prostředí – PVP Bukov II. Charakterizační a popisné práce přímo navázaly na ražbu prostor pro podzemní laboratoř a zahrnuly zejména: geologické a geotechnické dokumentace čeleb a stěn díla, petrografickou, mineralogickou a strukturně geologickou dokumentaci, hydrogeologickou charakterizaci prostředí, dále stanovení fyzikálně-mechanických vlastností horninového masivu in situ a v laboratoři, geofyzikální charakterizaci a monitoring seismických účinků trhacích prací, charakterizaci EDZ. Důležitou součástí prací bylo sestavení nového klasifikačního systému pro účely klasifikace horninového prostředí pro hlubinné úložiště na úrovni ukládací chodby a sestavení 3D modelu prostředí PVP Bukov II.

Klíčová slova

PVP Bukov, Geologická dokumentace, 3D model, 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, 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

Abstract

This report describes the work carried out in the last year of the public contract Geological and geotechnical characterisation of the rock environment –Bukov URF II. The characterization and descriptive works were directly related to the excavation of the premises for the 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 characterization of the environment, as well as determination of the physical and mechanical properties of the rock mass in situ and in the laboratory, geophysical characterization and monitoring of seismic effects of blasting, characterization of the EDZ. An important part of the work was the development of a new classification system for the purpose of rock environment classification for the deep geological repository at the disposal corridor level and the development of a 3D model of the URF Bukov II environment.

Keywords

Bukov URF, geological documentation, 3D model, 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, geophysical research, seismic tomography, georadar, electric resistivity tomography, seismics, excavation induced vibration measurement, vibration velocity

1 Úvod

Tato zpráva shrnuje práce provedené v posledním roce řešení veřejné zakázky Geologická a geotechnická charakterizace horninového prostředí – PVP Bukov II, tedy v období od března 2024 do února 2025. V rámci plnění této zakázky realizační tým následuje postup dodavatele prací v podzemí, a tak se práce v uplynulém roce realizovaly zejména v chodbách L5, L6, L7, L8 v rozsahu dle uvedeného stavu (Obr. 1). V rámci ražby nových prostor se jednalo o poslední dokončené zkušební komory PVP Bukov II a to ZK5-1J a ZK5-1S. Níže uvedené práce byly doplněny o zpracování veškerých dat získaných v průběhu řešení projektu a zhotovení této průběžné zprávy, závěrečné zprávy (Bukovská et al. 2025) a zprávy o klasifikačním systému URA (Soejono et al. 2025).



Obr. 1 Situace PVP Bukov II – vyznačení vyražených a dokumentovaných prostor včetně průběhu realizovaných vrtů (zdroj: SÚRAO)



Obr. 2 Situace PVP Bukov II – vyznačení vyražených a dokumentovaných prostor včetně postupu ražeb (zdroj: SÚRAO)

2 Postup řešení projektu

2.1 Geologická a strukturněgeologická charakterizace

2.1.1 Dokumentace čeleb

2.1.1.1 Geomechanická a geotechnická dokumentace ražeb

V roce 2024 probíhala ražba zkušebních komor ZK5–1S a ZK5–1J z hlediska stability podzemního díla celkově ve velmi dobrých podmínkách. Pro geotechnickou dokumentaci čeleb bylo užito tří indexových klasifikačních systémů užívaných v podzemním stavitelství RMR (Bieniawski 1989), QTS (Tesař 1990) a Q systém (Barton et al. 1974). Tyto indexové klasifikace jsou počítány na základě parametrů sledovaných přímo v čelbě a stěnách podzemního díla. Nejčastěji proměňujícím se parametrem byla průměrná vzdálenost diskontinuit, nejčastěji ploch metamorfní foliace (v systému QTS a RMR) a index kvality horniny RQD (pro systém RMR a Q index). Dalšími často proměnlivými parametry byly charakter povrchu, tvar a průběžnost diskontinuit (všechny klasifikace) a počet puklinových systémů (pouze pro Q index). Méně často se měnily parametry charakterizující podzemní vodu. Ostatní parametry se měnily pouze sporadicky. Například pevnost horniny v prostém tlaku dosahuje vysokých hodnot 100 a více MPa, které lze ověřovat pouze laboratorně (specificky v chodbě L4c). Podobně málo se měnil parametr napjatosti horninového masivu (SRF – Q index). Parametry indexové klasifikace pro jednotlivé čelby jsou uvedeny v Elektronická příloha 1.

Délka jednotlivých záběrů byla po většinu doby ražby stejná (1,6–2,0 m). Pro každý nově vyražený záběr byl vyhotoven záběrový list obsahující geologickou dokumentaci ražeb, fotodokumentaci záběru a formulář s výpočtem indexových klasifikačních systémů QTS, RMR a Q-index.

Veškeré záběrové listy (Obr. 4) a podklady z dokumentací, včetně průběžně doplňované tabulky (MS Excel) s parametry pro výpočet indexových klasifikací (Tab. 1) pro jednotlivé čelby, byly odevzdány na úložiště Sharepoint k 2. 9. 2024.



Obr. 3 Příklad záběrového listu s geologickou dokumentací ražby na první straně. Následuje fotodokumentační strana a poslední strana je s formulářem s parametry pro výpočet indexových klasifikací



			klasifikace QTS (1	esař)
parametr	hodnota	iednotky	body T	poznámky
TSa	100	[MPa]	17	
TSh	0.5	[m]	45	
TSc	sevření	[mm]	21	odvozený od rozevření trhlin (nejvyšší zijštěné rozevření)
100	TS=TSa+TS	Sb+TSc	83	
	redukce základ	ní kvality horninové	ho masívu TS	
a - vliv or	ientace diskontir	uit vzhledem k ražbě	85	sklop blavních diskoptinuit je mezi 30° a 80°
h - charak	ter diskotinuit isk	o doplněk redukce (a)	0,5	
D - Charan	a - absence př	itoků vody	1.5	nepočila se
	d - přítoky	vody	1,5	
<u> </u>		vouy	72	
L	Q15-15-(a1	готута)	15	QTS=TS-(a+b+g+d)
narametr		hodnota	klasifikace RMR - ho	dnoceni
parametr	<u> </u>	nounota	Jedotky	body (a)
pevnost v	tlaku sc	100	[MPa]	12
index kval	ity hornin RQD	98,5	%	20
vzdálenos	st puklin	0,5	[m]	10
		mírně drsný povrch	disk., rozevření puklin <	
charakter	diskontinuit	1 mm, mírně alt	erované plochy disk.	25
vliv podze	mní vody	vlhký		10
		součet bodů		77
vliv orient:	ace diskontinuit			-5
VIIV ONCING		RMR body		72
		linebody	[
		klasi	ifikace kvality horninov	νého masiyu Ο
narametr	V	Rido	proměnné	hodnoty
POD	y		00 5	nounoty
RQD			90,0	
Jv-pocet p	ouklin v m°		5	
				iadan muldinara' aata dal¥imi nahadibimi muldinami
In-nočet i	ouklinových svet	ခ်ကာပိ		jeden puklinovy set s dalsími nahodilymi puklinami
on-pocer	Jukiniovych Syste	sina		
				drané naho nanrovidelné pukliny, zvlněné
la dramaa	t muldim			dishe nebo nepravidelle pukiny, zvinene
JI-dishos	t pukin		3	
				novně vybojoné, noměknoucí výrdě (křemen koloit)
la_ukazat	ol altorado puklin		0.75	pevile vyhojena, nemekilouci vypin (kiemen, kalcit)
ukazat	er alterace puklin		0,75	aughú símis paha psiningální něítal (místně – tož – ž F
				suchy vyrub nebo minimalni pritok (mistne mene nez 5
Jw-ukaza	tel zvodnění		1	i/min)
				slabé nadouvání (odprysk) (masivní hornina)
SRF-napi	atost hor, masivi	ı	6	
		DOD	Im In	
		$O = \frac{KQD}{M}$	21,88888889	
index C		$Q = \frac{1}{n}$	21,000000	
Index Q		,	,	

Obr. 4 - pokračování Obr. 3 Příklad záběrového listu s geologickou dokumentací ražby na první straně. Následuje fotodokumentační strana a poslední strana je s formulářem s parametry pro výpočet indexových klasifikací. Parametr TSa popisuje pevnost horniny v prostém tlaku; parametr TSb vyjadřuje průměrnou vzdálenost hlavních diskontinuit ve výrubu; parametr TSc odráží rozevřenost diskontinuit

ZNO-ZJ					1	body					. 1	QTS								RMR						1.1.1	Q	1.1.1.1	100 m				
datum a čas dokumentace	staničeni [m]	dokume ntoval	dírky pro fotogrammetrii staničení [m]	poznámka	QTS	RMR	۵	TSa	TSb	TSc	alfa	beta	gama	a delt	a C	QTS	v tlaku sc	RQD	vzdálenost puklin	charakter diskontinuit	vliv podzemní vodv	vliv orientace diskontinuit	RMR	RQD	1,	J _e J	J,	j_	SRF	٩			
14.09.2022 14:30	1.5	Mareček			68,0	72	15,31	17	39	21	7.5	0	1.5	0	6	68.0	12	20	10	25	10	-5	72	91,9	7	4 3	5.0	3 1	6	15,31			
15.09.2022 14:30	2.9	Mareček			68.0	72	15,86	17	39	21	7.5	0	1.5	0	6	0,86	12	20	10	25	10	-5	72	95.2	6	4 3	9.0	3 1	6	15,86			
19.09.2022 6:50	4.3	Burjak	-		63,5	69	23,63	17	34	19	6.5	0	0	0	6	33.5	12	17	10	25	15	-10	69	88,6	8	3 3	8.0	3 1	5	23,63			
23.09.2022 14:15	5.4	Sedláček	t l	2	63.5	69	17,72	17	34	19	6.5	0	0	0	6	3.5	12	17	10	25	15	-10	69	88.6	8	4 3	0.8	3 1	5	17,72			
26.09.2022 14:30	6,5	Mareček			68,0	72	21,88	17	39	21	7,5	0	1,5	0	6	6.8	12	20	10	25	10	-5	72	98,5	5	3 3	9.0	3 1	6	21,88			
29.09.2022 14:30	7,8	Mareček			68,0	72	21,88	17	39	21	7,5	0	1,5	0	6	68.0	12	20	10	25	10	-5	72	98,5	5	3 3	8.0	3 1	6	21,88			
30.09.2022 14:30	8,9	Mareček			68,0	72	21,15	17	39	21	7,5	0	1,5	0	6	68,0	12	20	10	25	10	-5	72	95,2	6	3 3	0,8	3 1	6	21,15			
03.10.2022 14:30	10,0	Burjak	7	8	63,5	74	22,75	17	34	19	6,5	0	0	0	6	53,5	12	17	10	25	15	-5	74	85,3	9	3 3	0,8	3 1	5	22,75			
2	L4	A				body						QTS								RMR							Q						
	[dirky pro							Т					Т	p	evnost				vliv	vliv			T		T	T					
datum a čas	staničeni	dokume	fotogrammetrii			· ······										v	tlaku		vzdálenost	charakter	podzemní	orientace											
dokumentace	[m]	ntoval	staničení [m]	poznámka	QTS	RMR	Q	TSa	TSb	TSc	alfa	beta	gama	delt		TS SI	c	RQD	puklin	diskontinuit	vody	diskontinuit	RMR	RQD	3, 3	J., J.	32	3	SRF 0	Q			
13.10.2022 14:30	1,5	Mareček	100	4	68,0	64	6,07	17	39	21	7,5	0	1,5	0	6	68,0	12	17	10	20	15	-10	64	82	10	9 3	5,0	3 1	6	6,07			
15.10.2022 6:30	3,0	Mareček	1		68,0	64	6,07	17	39	21	7,5	0	1,5	0	6	68,0	12	17	10	20	15	-10	64	82	10	9 3	8,0	3 1	6	6,07			
17.10.2022 14:20	4,4	Burjak	-		66,0	69	22,75	17	39	19	7,5	0	1,5	0	6	66,0	12	17	10	25	10	-5	69	85,3	9	3 3	8,0	3 1	5	22,75			
18.10.2022 14:20	5,7	Sedláček	4		61,5	69	23,63	17	34	19	6,5	0	2	0	6	61,5	12	17	10	25	10	-5	69	88,6	8	3 3	8,0	5 1	5	23,63			
19.10.2022 14:15	7,1	Burjak	5		61,5	74	23,63	17	34	19	6,5	0	2	0	6	51,5	12	17	10	25	15	-5	74	88,6	8	3 3	0,8	\$ 1	5	23,63			
20.10.2022 14:15	8,5	Sedláček	\$		61,0	79	17,72	17	34	19	6,5	0	2	0	6	51,5	12	17	10	25	15	-5	74	88,6	8	3 3	0.8	5 1	5	23,63			
24.10.2022 14:15	10,0	Sedláček	i .	8	65,0	79	17,72	17	36	19	7	0	2	0	6	53.0	12	17	10	25	10	-5	69	88,6	8	3 3	8,0	\$ 1	5	23,63			
25.10.2022 14:15	11,4	Sedláček	1		66,5	79	11,81	17	36	21	7,5	0	0	0	6	6.5	12	17	10	25	15	-5	74	88,6	8	3 2	0,8	5 1	5	15,75			
01.11.2022 14:30	13,0	Mareček	0		68,0	67	10,94	17	39	21	7,5	0	1,5	0	6	68,0	12	20	10	20	15	-10	67	98,5	99	5 6	8,0	5 1	6	10,94			
03.11.2022 14:30	14,5	Mareček		-	68,0	64	4,92	17	39	21	7,5	0	1,5	0	6	68.0	12	17	10	20	15	-10	64	88,6	8	12 3	0,8	\$ 1	6	4,92			
07.11.2022 7:00	16,2	Burjak	13	8	67,5	72	24,51	17	39	19	7,5	0	1,5	0	6	6,0	12	20	10	25	10	-5	72	91,9	7	3 3	0,8	5 1	5	24,51			
08.11.2022 14:25	17,9	Burjak	13		67,5	74	23,63	17	39	19	7,5	0	0	0	6	57,5	12	17	10	25	15	-5	74	88,6	7	3 3	0,8	3 1	5	23,63			
09.11.2022 11:30	19,5	Chabr	17	-	69,5	74	23,63	17	39	20	7,5	0	0	0	6	68.5	12	17	10	25	15	-5	74	88,6	7	3 3	0,8	<i>i</i> 1	5	23,63			
11.11.2022 12.15	21,1	Chabr	17		62,5	69	17,06	17	34	20	6,5	0	2	0	6	52,5	12	17	10	25	10	-5	69	85,3	9	4 3	8,0	1	5	17,06			
15.11.2022 10:10	22,4	Marecek		-	73,0	67	10,21	17	45	21	8,5	0	1,5	0	7	3,0	12	20	10	20	15	-10	67	91,9	7	6 3	0,8	3 1	6	10,21			
16.11.2022 14:30	24,0	Marecek			73,0	67	21,88	17	45	21	8,5	0	1,5	0	7	3.0	12	20	10	20	15	-10	67	98,5	5	3 3	8,0	<i>i</i> 1	6	21,88			
22.11.2022 14:30	25,5	Marecek			63,5	64	9,11	17	34	21	6,5	0	2	0	6	53,5	12	17	10	20	15	-10	64	82	10	6 3	8,0	1	6	9,11			
24.11.2022 14:30	27.2	Marecek			61,0	62	8,74	17	31	21	6	0	2	0	6	51.0	12	17	8	20	15	-10	62	78,7	11	6 3	8.0	; 1	6	8,74			
25.11.2022 14:30	28,7	Marecek			61,0	62	8,74	1/	31	21	6	0	2	0	6	51,0	12	1/	8	20	15	-10	62	/8,/	11	6 3	5,0	/ 1	6	8,74			
29.11.2022 14:20	30,5	Placzek	28	8	65,5	/4	22,75	17	34	21	6,5	0	2	0	6	53,5	12	1/	10	25	15	-5	/4	85,3	9	3 3	0,8	1 1	5	22,75			
01.12.2022 6:30	31,8	Sedlacek			64,5	74	22,75	17	34	20	6,5	0	2	0	6	52,5	12	17	10	25	10	-5	69	85,3	9	3 3	5,0	; 1	5	22,75			
05.12.2022 11:00	33.6	Marecek	l	<u> </u>	57,0	39	0,85	17	34	14	6	0	2	10	5	0.10	12	17	10	0	10	-10	39	82	10	6 3	8	1	6	0,85			
06.12.2022 11:00	35,4	warecek			57,0	39	0.85	1/	34	14	6	0	2	0	15	07,0	12	1/	10	0	10	-10	39	82	10	0 3	8	1	b	0,85			
07.12.2022 11:00	3/,1	warecek			57,0	39	0,85	1/	34	14	6	0	2	10	5	0,10	12	1/	10	0	10	-10	39	62	10	0 3	8	1	0	0,65			
13.12.2022 6:45	38,9	Burjak	35	-	06.0	69	23,63	17	39	19	1.5	0	1,5	0	0	0,0	12	1/	10	25	10	-5	69	00.0	8	3 3	0,8	41	2	23,63			
15.12.2022 6:30	40,6	Chabs	35	1 K 1	01,5	14	17,20	1/	34	19	0,5	0	2	10	0	C.10	12	17	10	25	10	-5	09	00,0	0	4 3	5.0	1	2	2.09			
04.01.2023 14.40	41,2	Diagrak	40,5	<u>k</u>	40,0	44	10.02	17	34	14	0	10	2	10	4	1.5	12	17	10	10	10	-5	44	02	10	4 3	0	1	2,5	1.00			
05.01.2023 14.25	45.0	Disezek	- U,D	-	61.5	69	11.95	17	20	14	0.5	10	2	10	10	1.5	12	17	10	10	10	-5	54	05.2	0	6 2	2	1	5	1,02			
1 00 01 20/0 14:00	1 40.0	I FIGGZES		1	1 1 2	0.2	1 11 37		1. 1.2	1.14	1.431.731	1 10	1 /	1 0	- 1020	1 1 1 1		11/	1 10			· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	- 14	1 112 2	1 2 1	11	1 3		121	1.700			

Tab. 1 Výřez z tabulky parametrů indexových klasifikací (Elektronická příloha 1) pro jednotlivé záběry

Dokumentace ražby zkušební komory ZK5-1J

Zkušební komora ZK5-1J byla ražena od 25. 3. do 17. 4. 2024. Délka komory je 10,0 m. Geotechnické podmínky při ražbě byly dobré (Obr. 5). Horninový masiv vykazoval poměrně stabilní podmínky se vzdáleností hlavních diskontinuit v rozmezí 0,2 až 0,3 m (v systémech QTS a RMR). Charakteristika diskontinuit se téměř neměnila, většinově byly sevřené s maximálním rozevřením do jednoho milimetru. V systémech RQD a Q systém je stabilní parametr RQD nad 90 % s mírným snížením ve dvou případech na 88 %, což vede ke snížení bodového ohodnocení. V Q systému dělá největší rozdíly množství puklinových setů a ohodnocení napjatostního stavu horninového masivu SRF. Horninový masiv byl téměř suchý.



Obr. 5 Změna indexových klasifikací ve zkušební komoře ZK5-1J

Dokumentace ražby zkušební komory ZK5-1S

Zkušební komora ZK5-1S byla ražena od 13. 3. do 28. 3. 2024. Délka komory je 10,0 m. Geotechnické podmínky při ražbě byly dobré a v systému QTS a RMR poměrně vyrovnané (Obr. 6). Na začátku ražby byl masiv téměř homogenní s průměrnou vzdáleností diskontinuit až 0,5 m oproti standartním 0,2–0,3 m. V systémech RMR a Q systém došlo ke konci chodby ke zvýšení bodového ohodnocení vlivem lepšího charakteru diskontinuit. U Q systému se mírně měnil parametr SRF a výrazně se měnil počet puklinových setů. Voda se v horninovém masivu téměř nevyskytovala.



Obr. 6 Změna indexových klasifikací ve zkušební komoře ZK5-1S

2.1.1.2 Fotogrammetrie

Geodetická část dokumentace čeleb byla prováděna metodou digitální fotogrammetrie. Z pořízených digitálních snímků čelby je pomocí obrazové korelace vyhotoven 3D model čelby a výrubu. Model je nejprve vyhotoven v podobě očištěného mračna bodů s hustotou cca 10 000 bodů na 1 m². Z tohoto očištěného mračna je generován 3D model v podobě obarvené a otexturované trojúhelníkové sítě.

Vzniklé 3D modely čelby jsou připojeny do souřadnicového systému pomocí vlícovacích bodů. Vlícovací body byly průběžně (cca jednou měsíčně) geodeticky zaměřovány. Některé vlícovací body ale nebylo možné zaměřit, protože do doby měření byly zničeny. Toto mohlo způsobit na několika sadách snímků nedostatek nebo špatnou konfiguraci vlícovacích bodů. Usazení modelu nebylo předmětem prací, dodány byly fotogrammetrické modely z každého záběru a u těch, u kterých bylo možné změřit vlícovací body, je známá jejich georeference. V případě potřeby budoucího usazení fotogrammetrických modelů je nutné tyto bezrozměrné (bez vlícovacích bodů) modely usadit ručně/odhadem s neznámou přesností.

Vytvořené 3D modely čeleb byly průběžně odevzdávány na datové úložiště objednatele, jejich přehled je uveden v Elektronická příloha 2. Mezivýsledky a měřené hodnoty jsou archivovány u zhotovitele.

2.1.2 3D sken chodeb

Bylo provedeno zaměření skutečného stavu nově vyražených prostor PVP Bukov II pomocí technologie laserového skenování. Tato technologie umožnuje přesně a rychle zachytit skutečný stav měřeného objektu. Prvotním výstupem ze skeneru je mračno bodů (point cloud). Jedná se řádově o milióny bodů rozmístěných v prostoru, které vznikají během procesu samotného skenování, kde každý bod mračna je definován vlastní prostorovou souřadnicí (x, y, z). 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 hustotu trojúhelníků v místech s vyšší křivostí, tak aby bylo možné s modelem dále efektivně pracovat i v jiném SW. Cílem úlohy bylo poskytnout 3D model podzemních prostor v podobě upravené nepravidelné trojúhelníkové sítě (TIN).

Předmětem měření byly nově vyražené prostory chodeb L7 a L8 v průběhu dubna 2024 a chodeb L4a, L4b, L5 a L6 (Obr. 6, Obr. 7, Obr. 8, Obr. 9) včetně propojovacích chodeb L4c, L4d a V5-6 v průběhu června 2024.

Zaměření a skenování těchto chodeb bylo provedeno firmou SG Geotechnika pomocí totální stanice Leica MS60, skeneru RTC360, fotoaparátu Canon EOS 6D Mark II a s využitím softwaru Leica Infinity, RealityCapture a skenovacího systému od společnosti FARO.

Výsledné TIN modely jsou součástí elektronických příloh závěrečné zprávy projektu. Výsledný model byl exportován do formátu OBJ.



Obr. 7 Model chodeb L4a a L4b získaný z laserového skenování



Obr. 8 Model chodeb L4a a L4b získaný z laserového skenování, detail



Obr. 9 Model chodeb L7 a L8 získaný z laserového skenování



Obr. 10 Model chodeb L7 a L8 získaný z laserového skenování- detail

2.1.3 Geologická dokumentace vyražených prostor

V rámci dokumentace vyražených prostor byla dokončena kompletní geologická dokumentace prostor PVP Bukov II (Obr. 11). Jednalo se o chodby L4c, L4d a doražený 10 m úsek chodby v chodbě L7. Dále pak byly zdokumentovány zkušební komory v chodbách L5 a L6 tedy: ZK6-1S, ZK6-2S, ZK5-1S a ZK5-1J. Fotogrammetrické modely byly vytvořeny v programu Agisoft Metashape Professional v1.8.4, tyto byly škálovány a usazeny do souřadného systému S-JTSK pomocí měřičských bodů od firem Inset a SG-Geotechnika získaných v rámci tohoto projektu.



Obr. 11 Kompletní rozsah fotogrammetrických modelů chodeb PVP Bukov II zobrazený v prostředí programu MOVE v.2023 – pohled zvrchu

Součástí dokumentace byl na žádost SÚRAO pokus o pořízení fotogrammetrického modelu počev jednotlivých chodeb a zjištění jeho využitelnosti pro zpřesnění strukturněgeologické dokumentace PVP Bukov II. ČGS pořídila kompletní fotografický záznam počev v chodbách L4a až L8 v takovém stavu, jaký byl k dispozici po nahlášení požadavku na vyčerpání důlní vody a vyčištění počev. Z celkového počtu 6 chodeb bylo možné model bez výrazných problémů sestavit u tří z nich (L6, L7 a L8). Zbylé chodby jsou buď neúplné, nebo nebylo možné sestavit model vůbec, což bylo zřejmé již z řídkého mračna bodů s ohledem na množství chybějících bodů v L4a a L4b (Obr. 12).

Z principu metody fotogrammetrie pomocí techniky SFM (Structure From Motion) nelze sestavovat modely s vodní hladinou, jelikož neobsahuje žádné indikativní prvky (hrany, barvy a obecně výrazné statické prvky), ze kterých může algoritmus programu triangulovat jejich vzájemnou polohu. Výsledkem je pak model s neúplnými hranicemi, deformovanými hranami a nevyplněnými prostory, který nelze pro strukturněgeologický popis využít. Model rovněž není často dostatečně kvalitní ani na vizualizaci ražených prostor na rozdíl od modelů stěn a stropu chodeb a zkušebních komor.



Obr. 12 Zkonstruované fotogrammetrické modely chodeb L8, L7 a L6. Neúplný 3D model L5 a nekvalitní základ pro modelování v L4a a L4b vzhledem k velkým objemům vody v chodbách. Červené polygony představují "díry" v modelu, tj. místa, kde je nedostatek dat pro jeho konstrukci. Zelené polygony představují místa, kde je z modelu možné získat alespoň základní strukturní informace a využít je v kontextu vymodelovaných stěn a stropu chodby. Nevybarvené (šedé) části modelu představují místa, kde je sice možné model zkonstruovat, ale ze kterých nelze získat žádnou strukturní informaci. Vpravo jsou pro ilustraci fotografie stavu chodeb v době dokumentace

Z Obr. 12 je patrné, že dokumentace počev během fáze provádění technických prací (ražby, stavba, betonáže aj.) není praktická, vzhledem k stálé přítomnosti vody i po vyčerpání a množství usazeného kalu. Na Obr. 12 je dobře patrná míra zastoupení míst, kde je možné alespoň útržkovitá strukturní data získat, představuje to však jen malé procento plochy, oproti datům ze stěn a stropu chodeb, kdy je pokrytí dobře popsatelným modelem až 100 % (pomineme-li místa s vedením vody/vzduchu nebo zabezpečení torkretem či sítí).

2.1.4 Dokumentace vrtných jader

V předcházejícím období byla oskenovaná vrtná jádra L7-87L, L7-87U a L7-87D, která jsou situována na konci chodby L7 v PVP Bukov II. Následně byla zpracovaná v softwaru CoreBase. Tato data byla v letošním roce přepracována v softwaru WellCAD, následně z nich byly vytvořeny příslušné vrtné kolonky (Obr. 14; Elektronická příloha 3). Vrtná kolonka pro každý vrt je předána ve formátu PDF a je souhrnem a grafickým vyjádřením dat, která byla získána dokumentací vrtného jádra s použitím skenu jádra (Obr. 13). Obsahuje data vztahující se k in-situ dokumentaci vrtného jádra (litologie, typ/mocnost/výplň struktury, DZ-drcená zóna, PZ-puklinová zóna, koment, jiné) a data ze skenu vrtných jader a získaná ze softwaru WellCAD (rozbalené jádro, TAD póly, 3D snímek). Zároveň je ke každé vrtné kolonce předána stereografická projekce struktur (póly ploch na spodní hemisféru ve Schmidtově projekci), rovněž ve formátu PDF a dále pak XLSX sešit obsahující zjištěná měření (azimut a sklon) struktur v příslušné metráži vrtu a s označením typu struktury.



Obr. 13 Ukázka snímku ze skeneru vrtného jádra (úseky cca 1 m, rozbalená válcová plocha, linie vyznačuje orientaci jádra)

Při pohledu na Obr. 15 je možné srovnat strukturní data z jednotlivých vrtů, kdy je ideální příležitost sledovat vývoj foliačních ploch, jelikož vrty jsou situované u sebe a míří subvertikálně do stropu (L7-87U), subvertikálně do počvy (L7-87U) a subhorizontálně k cca severu (azimut 7°, sklon -5°; L7-87L). Vrt L7-87D má rozmezí azimutů foliačních ploch cca 225–358°, a tedy foliace upadají od ~JJZ přes JZ, Z, SV až k S pod relativně středními sklony. Zbylé dva vrty L7-87L a L7-87U naopak ukazují uniformní hodnoty azimutů foliací s malým rozptylem. Pro L7-87L nabývají foliační plochy rozmezí hodnot azimutů 196–262° a pro L7-87U 161–251°. Dominantně ale upadají k ~JZ. U vrtu L7-78U je rozmezí azimutů foliačních ploch mírně rozptýlenější. Sklony se pohybují majoritně ve středních hodnotách. Velký rozptyl dat u vrtu L7-78D může být způsoben tím, že vrt mohl být v některých částech nesprávně zrotován, a to z důvodu chybějících nebo podrcených částí vrtu. V těchto případech se bylo nutné držet pouze vodící čáry nakreslené na vrtu pracovníky DIAMO s.p. a nebylo možné si nijak ověřit, že vodící čára je správně. Je tedy možné, že "set" foliačních ploch, který ve stereografické projekci padá mimo průměrné hodnoty je ve skutečnosti zatížen chybou a foliační plochy upadají v těchto případech relativně uniformě pod středními úhly k ~JZ. Nicméně je nutno brát v potaz fakt, že části foliačních staveb se vrásní a že se zde nacházejí místa, která do uniformního zapadání k JZ nebudou patřit.



Obr. 14 Příklad části zpracované vrtné kolonky v softwaru WellCAD



Obr. 15 Výsledná stereografická data pro jednotlivé vrty (póly ploch na spodní hemisféru ve Schmidtově projekci)

Na Obr. 16 je porovnání stereografické projekce na vrtu L7-87L z karotážního měření (OBI) s výsledky ČGS z měření struktur na oskenovaném vrtném jádře v softwaru WellCAD. Karotážní data jsou však vynesena na svrchní hemisféru ve Wulffově projekci, proto byla naše data rovněž upravena na tuto projekci, aby byla porovnatelná. Jak je vidět na Obr. 16, tak strukturní data jsou při dvou nezávislých metodách velmi dobře korelovatelná.



Obr. 16 Porovnání karotážních dat (vlevo) a dat ze skeneru vrtných jader (vpravo) na příkladu vrtu L7-87L (póly ploch na svrchní hemisféru ve Wulfově projekci)

2.1.5 Strukturněgeologická mapa

Na základě geologických dokumentací podzemních prostor byla sestavena strukturněgeologická mapa PVP Bukov II v měřítku 1:850. Jako podklad byla využita veškerá data z terénních dokumentací, průběžně zpracovávaný 3D model, fotogrammetrické modely jednotlivých chodeb a závěrečné ověření poruchových struktur přímo v podzemí. Výsledná mapa (Elektronická příloha 4) tak zobrazuje strukturní poměry PVP Bukov II s důrazem na poruchové zóny, jejich známý a přepokládaný rozsah a pokud je známo, také smysl pohybu na těchto zónách. Předpokládaná pokračování struktur (čárkovaně ve strutkurněgeologické mapě) jsou interpretací možného dosahu struktury hlouběji do horninového masivu s ohledem na to, o jak velkou, dobře zachycenou, či výraznou strukturu se jedná. U struktur přetínajících několik chodeb bez výrazné změny jejich projevu je důvodné se domnívat, že struktura bude pokračovat dále do horninového masivu. Výše zmíněné informace jsou naloženy na předpokládaný průběh litologických celků a jsou doplněny o běžnou orientaci metamorfní stavby pro dílčí litologie. Pro přehlednost jsou vykresleny rozsahy chodeb PVP Bukov II a blízkého okolí. Veškerá zobrazená geologická data jsou výsledkem dokumentací v rámci tohoto projektu.

2.2 Petrografická a geochemická charakteristika

2.2.1 Petrografická charakteristika

2.2.1.1 Petrografie hornin

V roce 2024 byly petrograficky zdokumentovány nově vyražené prostory v PVP Bukov II: chodby L4c a L4d a zkušební komory ZK5-1S, ZK5-1J, ZK6-1S a ZK6-2S v chodbách L5 a L6. Účelem dokumentace bylo doplnění geologické mapy a 3D geologického modelu. V nově dokumentovaných úsecích dominuje biotitický migmatit, který místy přechází až do migmatitizovaného amfibolitu (Obr. 17). V celém prostředí PVP Bukov 2 se vyskytují budiny amfibolitů. V roce 2024 nebyly odebrány nové petrologické vzorky.

V rámci petrografické charakterizace prostor PVP Bukov II byly popsány vzorky biotitického migmatitu z vrtu L5-62L a amfibolitu z vrtu L5-35P, které byly pořízeny za účelem testování fyzikálněmechanických vlastností hornin. Tyto popisy jsou součástí kapitoly 2.5.



Obr. 17 Biotitický migmatit na začátku chodby L4c

2.2.1.2 Termodynamické modelování teplotně-tlakových podmínek metamorfózy

Pro termodynamické modelování teplotně-tlakových podmínek metamorfózy (P–T) byly vybrány tři reprezentativní vzorky zastupující dominantní litologie v prostředí PVP Bukov II, kterými jsou biotitická pararula s granátem (296CGT0009), biotitický migmatit s granátem (296CGT0015) a granátický amfibolit (296CGT0009).

Horninová složení potřebná pro výpočet P–T podmínek metamorfózy byla získána zprůměrováním plošných analýz výbrusů (ve hmotnostních %, Tab. 2) pokrývající reprezentativní území vybraného výbrusu. Plošné analýzy byly naměřeny v laboratoři rentgenové mikroanalýzy ČGS v Praze na Barrandově při zvětšení 50×, napětí 15 kV a proudu 1,5 nA. Pro výpočet byly naměřené hmotnostní analýzy převedeny do molárních procent.

hornina	Bt-pararula s Grt	Bt-migmatit s Grt	Grt-amfibolit					
výbrus	296CGT0020	296CGT0015	296CGT0009					
SiO ₂	68,4	67,25	49,8					
P ₂ O ₅	b.d.	0,08	b.d.					
Al ₂ O ₃	13,7	12,89	16,9					
CaO	2,62	3,04	9,12					
MgO	1,31	1,07	4,46					
FeO	3,76	3,92	9,22					
K ₂ O	1,32	2,34	0,59					
Na ₂ O	4,22	2,79	2,91					
TiO ₂	0,52	0,38	0,56					
MnO	0,06	0,71	0,19					
suma	95,9	94,67	93,8					

Tab. 2 Chemické složení (hm. %) vybraných litologií pro modelování P–T podmínek

b.d. – pod detekčním limitem

Výpočet odhadu P–T podmínek ekvilibrace hornin byl proveden pomocí programu MAGEMin (Riel et. al. 2022) verze 1.5.8 s použitím databáze ds62 (Holland a Powell 2011).

Pro biotitickou pararulu s granátem a biotitický migmatit s granátem byla použita termodynamická databáze pro metapelitické horniny (White et al. 2014), která se používá pro systém MnNCKFMASHTO (MnO, Na₂O, CaO, K₂O, FeO, MgO, Al₂O₃, SiO₂, H₂O, TiO₂, O). Pro granátický amfibolit byla použita termodynamická databáze pro metabazické horniny (Green et al. 2016), která je používaná v systému NCKFMASHTO (Na₂O, CaO, K₂O, FeO, MgO, Al₂O₃, SiO₂, H₂O, TiO₂, O).

Všechny studované horniny prošly parciálním tavením. Pro modelování P—T podmínek migmatitických hornin je klíčové vhodně stanovit množství vody, které přímo ovlivňuje množství taveniny v hornině a fázové rovnováhy. Protože tavenina má již při malém objemu tendenci z horniny odcházet, množství vody bylo stanoveno tak, aby pozorovaná minerální asociace ležela těsně nad solidem, tj. aby hornina byla v rovnováze s malým množstvím taveniny. Tento případ modeluje relativně suchou minerální asociaci poblíž vrcholné teploty (maximální ztráta taveniny) a zároveň zabraňuje významnému přetisku vrcholné asociace na retrográdní dráze, protože krystalizující zbytková tavenina kvůli svému malému objemu neuvolní významné množství vody. Obsah O byl pro jednotlivé horniny stanoven tak, aby odpovídal velmi nízkému obsahu Fe³⁺ v minerálních fázích.

Biotitická pararula s granátem (296CGT0020)

Horninu tvoří křemen, plagioklas, biotit a porfyroblasty granátu, které jsou hojně prorůstány křemenem a plagioklasem (Obr. 18). Akcesoricky je v hornině ilmenit, apatit, zirkon, monazit a sulfidy. Místy se v ilmenitu nachází relikty rutilu.

Plagioklas svým složením XAb = 0,73–0,77 odpovídá oligoklasu. Biotit má složení XMg = 0,49–0,53; Ti = 0,0–0,2 apfu. Granát je bohatý almandinovou komponentou a jeho složení neukazuje systematickou zonálnost: Prp_{0,17–0,18}Alm_{0,66–0,67}Grs_{0,10–0,12}Sps_{0,04–0,05}; XMg ~ 0,21. Ilmenit obsahuje: MnO = 0,52–3,95 hm. %, Fe³⁺ = 0,0–0,01 apfu.

Popsaná minerální asociace odpovídá poli Ilm–PI–Grt–Liq–Bt–Qz v 6,4–10,3 kbar a 680–780 °C. Toto pole leží v těsné blízkosti křivky, za kterou již není tavenina přítomna (Obr. 19).



Obr. 18 Biotitická pararula s granátem (296CGT0020): a) sken výbrusu; b) porfyroblast granátu hojně prorůstaný křemenem a plagioklasem. Okolní hmotu tvoří křemen, plagioklas, a biotit



Obr. 19 P–T pseudosekce biotitické pararuly s granátem. Červeně zvýrazněné pole odpovídá pozorované minerální asociaci

Biotitický migmatit s granátem (296CGT0015)

Horninu tvoří křemen, plagioklas, K-živec, biotit a xenomorfní porfyroblasty granátu, které jsou hojně prorůstány křemenem a živci (Obr. 20). Akcesoricky je v hornině přítomen ilmenit, apatit, zirkon, monazit a sulfidy.

Plagioklas svým složením XAb = 0,66–0,68 odpovídá andezínu. Obsah Ab komponenty v K-živci je 0,05–12. Biotit má složení XMg = 0,44–0,46; Ti ~0,2 apfu. V granátu převažuje almandinová komponenta a jeho složení ukazuje pokles Ca a Mn a nárůst XMg od středu k okraji: $Prp_{0,06\rightarrow0,11}Alm_{0,44\rightarrow0,55}Grs_{0,20\rightarrow0,11}Sps_{0,30\rightarrow0,23}$; XMg: 0,11→0,16. Ilmenit obsahuje: MnO = 12,4–16,8 hm. %, Fe³⁺ = 0,0–0,05 apfu.

Popsaná minerální asociace odpovídá poli Grt–Liq–Bt–Ilm–Pl–Kfs–Qz v rozmezí od 4,0–7,4 kbar a 670–780 °C. V nižších teplotách za tímto polem již není tavenina přítomna (Obr. 21).



Obr. 20 Biotitický migmatit s granátem (296CGT0015): a) sken výbrusu; b) základní hmota tvořená křemenem, biotitem, plagioklasem a K-živcem; c) detail porfyroblastu granátu, který obsahuje četné uzavřeniny křemene a živců



Obr. 21 P–T pseudosekce biotitického migmatitu s granátem. Červeně zvýrazněné pole odpovídá pozorované minerální asociaci

Granátický amfibolit (296CGT009)

Hornina je tvořena porfyroblasty granátu, amfibolem, plagioklasem, křemenem a malým množstvím biotitu, který podléhá chloritizaci (Obr. 22). Porfyroblasty granátu jsou hojně prorůstány amfibolem, plagioklasem a křemenem a bývají nahrazovány chloritem. Akcesoricky se v hornině vyskytují titanit, sulfidy, apatit a ilmenit.

Plagioklas svým složením XAb = 0,36–0,77 odpovídá labradoritu až andezínu. Obsah Ab komponenty v K-živci je 0,02-0,18. V granátu převažuje almandinová komponenta a jeho složení ukazuje vyšší obsah Ca XMg nižší obsah Mn v jádru v porovnání s okrajem. а а Prp0,15-0,12AIm0,53-0,57Grs0,27-0,25Sps0,05-0,06; XMg: 0,22-0,17. Amfibol svým složením odpovídá feroaž magnezio-hornblendu (XMg = 38–53, Ti=0,05–0,15 apfu). Ilmenit obsahuje: MnO = 3,2–4,4 hm. %, Fe³⁺ ~ 0,10 apfu.

Jelikož termodynamická databáze pro metabazické horniny (Green et al. 2016) nepočítá s MnO, který má významný vliv na rozšíření P–T stability granátu, byly P–T podmínky reekvilibrace amfibolitu určeny pouze podle pozorované minerální asociace s předpokladem, že se granát pravděpodobně vyskytuje i za nižších P–T podmínek, než předpovídá pseudosekce.

Pozorovaná minerální asociace odpovídá polím PI–Amp–Bt–Liq–Qz–Spn, Amp–Bt–Amp–PI–Liq–Qz, Liq–Bt–PI–Amp–Qz, PI–Amp–Bt–Amp–Liq–Qz–Spn, v P–T rozsahu 4,0–6,3 kbar a 700–740 °C (Obr. 23).



Obr. 22 Granátický amfibolit (296CGT0009): a) sken výbrusu; b) porfyroblast granátu, který je prorůstaný amfibolem, plagioklasem a křemenem a po okrajích je nahrazován chloritizovaným biotitem



Obr. 23 P–T pseudosekce granátického amfibolitu. Zeleně zvýrazněná oblast odpovídá P–T podmínkám pozorované minerální asociace

Diskuze a výsledky P-T modelování

Hlavní minerální asociace předvídané pseudosekcemi ukazují vývoj pozorovaných minerálních asociací všech třech litologií v podmínkách amfibolitové facie (Obr. 24). Přiblížení minerálních asociací modelovaných litologií je přibližně v rozmezí 5,7–7,1 kbar a cca 690–730 °C.

Tato data korespondují s výsledky získanými z ostatních projektů, které probíhaly v prostředí dolu Rožná. V litologiích PVP Bukov I (Bukovská a Verner eds. 2017) byly vypočtené teploty vzniku amfibolu pomocí amfibol-plagioklasového termometru (Blundy a Holland 1990) určeny na 692–727 °C pro tlaky cca 5 kbar. Amfibol v pegmatitu intrudující do amfibolitů poskytl P–T podmínky 669–691 °C (Blundy a Holland 1990) a tlaky kolem 5 kbar (Anderson a Smith 1995). V projektu Získání dat z hlubokých horizontů dolu Rožná (Bukovská et al. 2020), byly podmínky ekvilibrace minerální asociace pro migmatit a granátický amfibolit předpovídané pseudosekcemi spočtenými v programu THERMOCALC stanoveny do 700–750 °C a 5-7 kbar.

Horniny v prostředí PVP Bukov II náleží do strážeckého moldanubika. Teplotně-tlakové podmínky hornin strážeckého moldanubika byly spočteny v programu THERMOCALC v rámci geologického mapování v okolí Žďáru nad Sázavou a Nového Veselí (Buriánková et al. 2005). Podmínky metamorfózy biotitického a sillimanit-biotitického granitizovaného migmatitu, který je nejrozšířenější horninou strážeckého moldanubika, byly spočteny na T = 617± 66 °C a P = 4,2 ± 3,2 kbar. Podmínky vzniku jemně zrnité okaté masivní biotitické pararuly místy s granátem a kyanitem byly stanoveny na T = 831±55 °C, P = 8,0 ±1,4 kbar.



Obr. 24 Shrnutí výsledných odhadovaných P–T podmínek pro reprezentativní litologické typy (zelené pole – amfibolit, oranžové pole – migmatit, růžové pole – pararula

2.2.2 Geochemie žilných a puklinových mineralizací

2.2.2.1 Metodika laboratorních prací

Všechny laboratorní práce byly provedeny v laboratořích České geologické služby.

Elektronová mikroskopie – LAREM – metodika kvantitativních analýz hlavních prvků

Kvantitativní analýzy karbonátových žil byly provedeny na pracovišti ČGS-LAREM s využitím skenovacího elektronového mikroskopu Tecsan Mira 3GMU s FEG katodou a analytickým systémem EDS (SDD) X-Max80 f. Oxford Instruments. Podmínky analýz byly následující: urychlovací napětí 15 kV, proud svazku 3 nA, doba načítání rtg. spektra 40 s. Byly použity karbonátové standardy MAC a SPI. Analýzy byly přepočteny na 3 kyslíky.

ICP-MS – analýza stopových prvků a prvků vzácných zemin

Vzorky kalcitu byly naváženy do teflonových kelímků a byly přidány koncentrované HNO₃ a HF v poměru 1 : 6 (obj/obj). Uzavřené kelímky byly zahřívány na topné desce při 130 °C cca 72 hodin. Poté byly kyseliny odpařeny do sucha a opakovaně přidáno malé množství koncentrované HNO₃. Následně byla aplikována 6M HCl a uzavřené kelímky byly na 24 hodin odstaveny na topnou desku při 80 °C. Alikvotní část roztoku byla zředěna v 2 % HNO₃ (konc/konc) pro měření koncentrací stopových prvků pomocí Agilent 7900x ICPMS. Spolehlivost a stabilita přístroje v průběhu analytické sekvence byly monitorovány pomocí mezinárodního referenčního basaltu BHVO-2. Pro normalizaci analýz a vytvoření grafů byl použit program GCDkit (Janoušek et al. 2006).

Fluidní inkluze

Fluidní inkluze byly studovány v oboustranně leštěných destičkách o síle 0,3 mm metodami optické mikrotermometrie na aparatuře Chaixmeca (Poty et al. 1976). Aparatura byla kalibrována pro teploty mezi –100 až +400 °C chemickými standardy f. Merck, teplotou tání ledu a fázovými přechody v inkluzích s čistým CO₂. Homogenizační a kryometrická data vykazují reprodukovatelnost ±0,2 °C při teplotách pod 0 °C a ±3 °C při teplotách do 400 °C. Salinita vodných roztoků byla přepočtena podle Bodnara (1993). Složení solných systémů bylo určeno podle Davise et al. (1990). Hustota a složení inkluzí s CO₂ a CH₄ byly přepočteny podle Bakkera a Diamonda (2000) a Van den Kerkhofa a Thieryho (2001). Salinita vodných roztoků v inkluzích s CO₂ byla vypočtena podle Darlinga (1991).

Stabilní izotopy uhlíku a kyslíku v karbonátech

Vzorky žilných karbonátů byly jemně rozetřeny v achátové misce a rozloženy ve 100% kyselině fosforečné ve vakuu při 25 °C (podle McCrea 1950). Složení izotopů δ^{13} C (‰) a δ^{18} O (‰) v uvolněném CO₂ bylo změřeno na hmotnostním spektrometru Delta V v laboratořích ČGS. Celková chyba stanovení izotopového složení je ±0,1 ‰. Izotopové složení uhlíku je vztaženo k mezinárodnímu standardu PDB. Hodnoty izotopového složení kyslíku vztažené ke standardu SMOW jsou určeny z měřených hodnot proti standardu PDB přepočtem.

Izotopy Sr v karbonátech

Vzorky o hmotnosti cca 0,5 g byly rozpuštěny v 25% HCl v ultrazvukové lázni, vysušeny a znovu rozpuštěny pomocí 2M HNO₃. Separace stroncia byla provedena pomocí iontové kolonové chromatografie s použitím PP kolon naplněných kationtovým iontoměničem Eichrom Sr. spec resin podle postupu popsaného v práci Pin et al. (1994).

Izotopové analýzy byly provedeny pomocí přístrojů Neptune a Triton Plus (MC-ICP-MS a TIMS, oba od výrobce ThermoFisher Scientific). Instrumentální izotopová frakcionace byla korigována na standardní hodnotu ⁸⁶Sr/⁸⁸Sr = 0,1194. Přesnost analýzy byla kontrolována opakovaným měřením poměru ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr referenčního materiálu NBS987, s výsledkem 0,710300 ± 23 (1SD; n = 48) pro MC-ICP-MS a 0,710254 ± 8 (1SD; n = 15) pro TIMS; výsledky měření MC-ICP-MS byly přepočteny na standardní hodnotu referenčního materiálu ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr = 0,710240.

Stabilní izotopy síry v sulfidech

Pro stanovení izotopového složení síry v sulfidu se vzorek smísí s oxidačním činidlem (práškovým CuO) a je převeden na SO₂ při 800 °C ve vakuu (Griněnko 1962). Získaný plyn SO₂ se vymrazí do transportních ampulí a jeho izotopové složení síry je změřeno na hmotnostním spektrometru Finnigan MAT 251. Celková chyba stanovení izotopového složení síry vyjádřeného pomocí běžně užívané hodnoty δ^{34} S je ±0,15 ‰. Izotopové složení síry je vztaženo k mezinárodnímu standardu CDT (Buzek et al. 1985).

2.2.2.2 Výsledky laboratorních analýz

Ve zprávě jsou shrnuty a graficky prezentovány výsledky jednotlivých analytických metod. Tabulky s výsledky laboratorních analýz jsou v Elektronická příloha 5.

Kvantitativní analýzy hlavních prvků

V sadě 25 vzorků karbonátových žil byly analyzovány obsahy hlavních prvků – Ca, Mg, Fe, Mn a Sr. V jednotlivých zrnech bylo provedeno 5, v některých zrnech 10 analýz. Celkem bylo provedeno 205 analýz. Celkem 160 analýz spadá do pole kalcitu, 40 analýz do pole dolomitu a 5 analýz do pole sideritu (Obr. 25). Celkem 19 vzorků obsahovalo podle analýz pouze kalcit. V pěti vzorcích byl analyzovaný kalcit a dolomit. Jeden vzorek (L7-S–20,1) obsahoval kalcit a siderit.

V kalcitech se obsah CaO pohybuje v rozmezí 47,73 % až 56,18 % (0,95–1 apfu), obsah MgO 0–0,89 % (0–0,02 apfu), obsah FeO 0–1,92 % (0–0,03 apfu) a obsah MnO 0–1,3 % (0–0,02 apfu). V dolomitech je obsah CaO v rozsahu 26,76–29,43 % (0,49–0,55 apfu), obsah MgO 10,4–14,82 % (0,27–0,38 apfu), obsah FeO 5,1–15,5 % (0,07–0,22 apfu) a obsah MnO 0–2,43 % (0–0,04 apfu). V sideritech je obsah CaO v rozsahu 5,8–6,81 % (0,12–0,14 apfu), obsah MgO 7,1–7,67 % (0,20–0,22 apfu), obsah FeO 39,63–40,75 % (0,63–0,66 apfu) a obsah MnO 1,04–1,21 % (0,02 apfu).

Obsahy Sr v karbonátech byly většinou pod mezí detekce. Největší obsahy SrO 0,15 % byly ve vzorku L4A-P–23,2.



Obr. 25 Kvantitativní analýza hlavních prvků (Ca-Mg-Fe+Mn) v karbonátových žilách z PVP Bukov II podle apfu

Analýza stopových prvků a prvků vzácných zemin

Pomocí ICP-MS byl stanoven obsah 16 stopových prvků (Obr. 26) a 15 prvků vzácných zemin (Obr. 27) v celkem 16 vzorcích kalcitů.

Obsahy Sr se pohybují v širokém rozsahu 30–490 ppm. Většina hodnot je vyšší než 100 ppm, což svědčí o hydrotermálním původu karbonátových žil (Tullborg et al. 2008). Obsahy Rb jsou naopak nízké. V 8 vzorcích jsou obsahy pod 1 ppm, v 9 vzorcích se obsahy pohybují v rozsahu 5,4–11,72 ppm.

Obsahy U jsou velmi nízké. U 10 vzorků jsou pod mezí detekce, u sedmi vzorků jsou pod 0,4 ppm. Obsahy Th jsou také nízké, 0,13–1,43 ppm, ojediněle 5,52 ppm. Obsahy uranu i thoria jsou celkově nižší než v okolních horninách (René 2002), jsou obdobné obsahům v karbonátových žilách z PVP Bukov I (Bukovská et al. 2017).

Obsahy HFSE jsou také nízké. Obsahy Zr jsou u 5 vzorků pod mezí detekce, u ostatních vzorků jsou v rozsahu 9,27–31,14 ppm. Obsahy Hf jsou 0,1–2,3 ppm. Anomální je vzorek L4B-P–0,6, který obsahuje 1 573,96 ppm Zr a 32,51 ppm Hf. Obsahy Ta a Nb jsou vždy pod mezí detekce, pouze u vzorku L5-J–12,4 bylo stanoveno 1,05 ppm Nb. Obsahy Ba jsou v rozmezí 3,89–102,89 ppm. Pouze vzorek L4A–P–23,2 je výrazně nabohacený Ba a obsahuje 2 887,14 ppm Ba.



Obr. 26 Obsah stopových prvků v žilných kalcitech normalizovaný obsahem prvků ve svrchní kontinentální kůře (Taylor a McLennan 1995)

Křivky normalizovaných obsahů prvků vzácných zemin mají většinou podobný trend a vykazují mírný pokles od LREE k HREE. U 4 vzorků (L7-S-20,1; L8-S-84,7; L8-S-33,8; VCH5-6-Z-31,8) je patrný stoupající trend obsahů HREE. U vzorku L7-S-70,7 je část prvků vzácných zemin (Nd, Sm Tb, Dy, Ho, Tm, Lu) pod mezí detekce. Většina vzorků má pozitivní Eu anomálii, pouze u vzorku L7-S-55,65 se projevuje negativní Eu anomálie. Rozdílným hodnotám Eu anomálií odpovídá i poměr Eu/Eu* 0,41–4,28. Negativní, resp. pozitivní Eu anomálie může být pravděpodobně indikátorem lokálních změn redox podmínek.

Celkový obsah prvků vzácných zemin (ΣREE) je variabilní a pohybuje se v rozsahu 2,07–264,11 ppm. Proměnlivé obsahy REE ve vzorcích dokládá i poměr La_N/Yb_N v rozsahu 0,06–69,78 nebo poměr LaN/SmN v rozsahu 0,44–16,62.



Obr. 27 Obsah prvků vzácných zemin v žilných kalcitech normalizovaný obsahem REE v chondritech (Boynton 1984)

Fluidní inkluze

Fluidní inkluze byly studovány v karbonátových, křemen-karbonátových, křemen-živcových a křemenných výplních žil a puklin. Byl posuzován jejich vztah k hostitelskému minerálu (primární vs. sekundární inkluze; FIA), poměr kapalné a plynné fáze (LVR=L/L+V), tvar a velikost inkluzí. Základní měřená data (Th, salinita) jsou zobrazena v grafech (Obr. 28, Obr. 29 a Obr. 30). Příklady inkluzí jsou zobrazeny na Obr. 31.

V kalcitech mají měřené dvoufázové inkluze stupeň zaplnění většinou 0,90–0,95. Některé inkluze obsahují pouze kapalnou fázi. Velikost inkluzí je většinou do 15 µm, ojediněle do 30 µm. Primární dvoufázové inkluze homogenizují za teplot 52–168 °C. Naměřená eutektická teplota je u primárních inkluzí v kalcitech -42,5 °C až -44,5 °C, což indikuje přítomnost chloridů Na, Mg a Fe v roztoku. Inkluze ze vzorku VCH5-6-V–43,5 vykazují eutektickou teplotu -56,5 °C, což indikuje převahu CaCl₂ v roztoku. Teploty tání ledu se pohybují v rozsahu -0,7 °C až -14,7 °C. Tyto teploty určují salinity roztoků v rozsahu 1,2–18,4 hm. % NaCl ekv, přičemž vyšší salinity mají inkluze s obsahem CaCl₂.

Primárně sekundární a sekundární inkluze v kalcitech homogenizují při teplotách 54–187 °C. Eutektické teploty jsou naměřeny pouze u dvou vzorků o hodnotě –35,5 °C, což indikuje přítomnost chloridů Na, Mg, Fe a K, a hodnotě –54,6 °C, což indikuje převahu CaCl₂. Teploty tání ledu jsou v rozsahu –0,9 °C až –13,1 °C, což odpovídá salinitám 1,6–17 hm. % NaCl ekv. Stejně jako u primárních inkluzí, vyšší salinity mají inkluze s obsahem CaCl₂.


Obr. 28 Histogram teplot homogenizace vodného roztoku fluidních inkluzí z PVP Bukov II



Obr. 29 Histogram salinit vodného roztoku fluidních inkluzí z PVP Bukov II

V křemeni je několik typů fluidních inkluzí. Primární inkluze pouze s vodným roztokem mají většinou nepravidelný LVR, měřeny byly s poměrem 0,90–0,95. Jejich velikost je pod 10 µm. Teploty

homogenizace jsou v malém rozpětí 172–186 °C. Eutektická teplota nebyla zaznamenána. Teploty tání ledu v rozsahu –0,9 °C až –13,4 °C udávají salinity roztoku 2,1–16,6 hm. % NaCl ekv.

Druhý typ primárních inkluzí obsahuje vodný roztok a CO₂. Poměr vodného roztoku a CO₂ je nepravidelný v rozsahu 0,1–0,9. Teplota celkové homogenizace se podařila změřit pouze u třech inkluzí a je v rozsahu 258–275 °C. Teplota tání pevného CO₂ je v rozsahu –59,1 °C až –58,2 °C, což indikuje malou příměs pravděpodobně CH₄. CO₂ homogenizuje buď na plyn za teplot 26,2–30,1 °C (hustota fáze 0,297–0,349 g/cm³) nebo na kapalinu za teplot 19,7–27,4 °C (hustota fáze 0,668–0,777 g/cm³). Salinita vodného roztoku se v případě obsahu plynných složek (CO₂, CH₄, …) určuje podle teploty tání klatrátů. Ta je v rozsahu 5,9–8,9 °C, což indikuje salinity 2,2–7,6 hm. % NaCl ekv.

Primárně sekundární a sekundární inkluze v křemeni lze opět rozdělit do několika typů.

Měřené inkluze s vodným roztokem mají LVR 0,8–0,9 a jejich velikost je většinou pod 10 μm, ojediněle do 30 μm. Teploty homogenizace jsou v širokém rozpětí 125–295 °C. Eutektickou teplotu se většinou nepodařilo zaznamenat. U několika inkluzí je pravděpodobně kolem -61 °C, což může indikovat převahu CaCl₂ s možnou příměsí LiCl. Teploty tání ledu jsou ve dvou skupinách. Jedna skupina je v rozmezí -7,2 °C až -11,2 °C, což udává salinitu v rozmezí 10,7–15,2 hm. % NaCl ekv. Teploty tání ledu u druhé skupiny jsou v rozmezí -21,4 °C až -25,1 °C, což udává salinitu 23,3–25,6 hm. % NaCl ekv.

Druhý typ primárně sekundárních a sekundárních inkluzí obsahuje vodný roztok a CO₂ o LVR 0,1–0,8. Velikost těchto inkluzí je obvykle pod 10 µm. Teplotu celkové homogenizace se nepodařilo naměřit. Teplota tání pevného CO₂ je v rozmezí –58,1 až –60,2 °C, což indikuje malou příměs pravděpodobně CH₄. CO₂ homogenizuje buď na plyn za teplot 21,3–29,6 °C (hustota fáze 0,205–0,330 g/cm³) nebo na kapalinu za teplot 12,4–27,4 °C (hustota fáze 0,668–0,843 g/cm³). Teplotu tání klatrátů se podařilo naměřit pouze u několika inkluzí v rozsahu 5,8–9,1 °C, což udává salinitu 1,8–7,8 hm. % NaCl ekv.

Ve vzorku L4B-L–72,6 bylo zjištěno několik inkluzí obsahující pravděpodobně CH₄. Inkluze obsahují za laboratorní teploty pouze plynnou fázi. Mají velikost 20–40 μ m. Homogenizují na plyn za teplot –118,8 °C až –124,6 °C (hustota 0,015–0,020 g/cm³).



Obr. 30 Teplota homogenizace vs. salinita fluidních inkluzí vodného roztoku v jednotlivých minerálech

Naměřené parametry fluidních inkluzí z PVP Bukov II se většinou dají přirovnat k datům z porudního až pouranového vývoje ložiska Rožná (Kříbek a Hájek 2005). Variabilita salinit při relativním zachování teplot homogenizace (Obr. 30) může indikovat izotermální mísení různých typů hydrotermálních roztoků o odlišné salinitě.



Obr. 31 Příklady fluidních inkluzí z prostoru PVP Bukov II: a) primární H₂O inkluze s obsahem pouze kapalné fáze v kalcitu (vzorek L7-S–70,7); b) primárně-sekundární dvoufázové H₂O inkluze v kalcitu (vzorek L8-J–70,8); c) primárně-sekundární H₂O-CO₂ v křemeni (vzorek L6-S–48,4); d) primární dvoufázové H₂O inkluze v křemeni (L8-S–33,8)

Stabilní izotopy uhlíku a kyslíku v karbonátech

Hodnoty δ^{18} O (Obr. 32) se v analyzovaných kalcitech pohybují v rozmezí 10,3–19,34 ‰ (SMOW). Tyto hodnoty pravděpodobně odpovídají solankám sedimentárních bazénů. Hodnoty δ^{13} C jsou v rozmezí -3,58 až -14,1 ‰ (PDB). Tyto hodnoty pravděpodobně odpovídají uhlíku z hlubinného zdroje, příp. u nižších minusových hodnot uhlíku organického původu, případně směsi uhlíků z více zdrojů. Izotopické složení je podobné datům z rudního stadia ložiska Rožná (Kříbek a Hájek 2005).



Obr. 32 Izotopové složení uhlíku a kyslíku v kalcitech z prostoru PVP Bukov II

Izotopy Sr v karbonátech

Poměr ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr v kalcitech je v úzkém rozpětí 0,706008–0,712640 (Obr. 33). Kalcity mají nízké obsahy Rb, a naopak vysoké obsahy Sr. Poměr ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr se od doby krystalizace karbonátů příliš nezměnil. Naměřená data jsou podobná datům z ložiska Rožná, která jsou v rozsahu 0,709414–0,711561 (Kříbek a Hájek 2005). Hodnoty poměrů ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr jsou částečně mimo hodnoty z vápenců a evaporitů a zcela mimo hodnoty hornin z moldanubika (Janoušek et al. 1995). Pravděpodobně se jedná o smíšený zdroj z různých horninových typů vyluhovaných solankami.



Obr. 33 Izotopový poměr 87 Sr/86 Sr v kalcitech z PVP Bukov II a z možných zdrojových hornin a fluid

Stabilní izotopy síry v sulfidech

Izotopové složení síry bylo analyzováno celkem na 33 vzorcích pyritů a pyrhotinů (Obr. 34). Pyrit na puklinách vykazuje široké rozpětí hodnot δ^{34} S 11,3 až –10,2 ‰ (CDT), pyrit z karbonátových žil hodnoty 12,7 až –3,4 ‰, impregnační pyrit hodnoty 12,1 až –2,5 ‰; pyrhotin na puklinách hodnoty 2,3 a 1,4 ‰ a pyrhotin v karbonátové žíle hodnoty –2,2 a –3,1 ‰. Naměřené hodnoty δ^{34} S odpovídají hodnotám sulfidů z poruranové 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, Bukovská et al. 2019). Během rudního uranonosného stádia došlo v revíru Rožná-Olší k migraci oxidačních fluid a rozkladu minerálů s dvojmocným Fe, včetně pyritu. Pyrit ve výplni žil a puklin je pravděpodobně mladší než uranová mineralizace a svědčí o redukčním prostředí pouranového stádia. Nízké až negativní hodnoty izotopického složení síry jsou pravděpodobně důsledkem frakcionace mezi redukovanými a oxidovanými složkami síry v roztocích. Vzhledem k nízkým teplotám mineralizace nelze vyloučit ani vliv sulfát-redukujících bakterií v hydrotermálním systému, nebo redukci sulfátů organickými látkami. (Kříbek a Hájek 2005).



Obr. 34 Izotopové složení síry pyritů a pyrhotinů z PVP Bukov II

2.2.2.3 Interpretace výsledků a závěr

V rámci projektu byly studovány hydrotermální karbonátové, křemen-karbonátové a křemen-živcové žíly se sulfidickou mineralizací. Vzorky byly odebrány z chodeb L4a až L8 a V5-6 a z vrtů, které předcházely vyražení chodeb. Cílem prací bylo určit mineralogické složení žil, teplotně-tlakové podmínky vzniku mineralizace a zdroje fluid.

Hydrotermální karbonátové žíly jsou tvořeny převážně kalcitem, v několika případech byl identifikován dolomit a v jednom případě siderit. Karbonáty jsou místy doprovázeny křemenem a pyritem. Časté jsou produkty alteračních procesů na ploše kontaktu s horninou (chloritizace, hematitizace, argilitizace, pyritizace, prokřemenění a karbonatizace). V rámci dřívějších ložiskových výzkumů bylo na ložisku Rožná rozlišeno sedm generací kalcitu, které se vyskytují v předrudním, rudním i porudním stádiu vývoje ložiska (Arapov et al. 1984). Kalcity z prostoru PVP Bukov II nebylo možné spolehlivě zařadit do jednotlivých generací a byly klasifikovány na základě zjištěných dat a jejich porovnáním s daty z ložiska Rožná (Kříbek a Hájek 2005).

Pravděpodobně nejstarší jsou křemenné a křemen-živcové žíly. Vzorky obsahují primární i sekundární inkluze typu H₂O-CO₂ s malou příměsí pravděpodobně CH₄. Vyšší teploty homogenizace a přítomnost CO₂ může indikovat pravděpodobný vznik v závěru metamorfních procesů.

Kalcity z PVP Bukov II na základě mikrotermometrického měření fluidních inkluzí odpovídají porudní a pouranové mineralizaci z ložiska Rožná (Kříbek a Hájek 2005). Na základě obsahů Sr lze předpokládat jejich hydrotermální původ (Tullborg et al. 2008). Poměry ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr ukazují na směsný zdroj z různých horninových typů vyluhovaný solankami hlubokého oběhu. Původ roztoků je na základě hodnot δ^{18} O nejspíše v pánevních solankách.

Hodnoty δ^{34} S v pyritech a pyrhotinech v PVP Bukov II lze přirovnat k hodnotám sulfidů z poruranové 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, 2019).

2.2.3 Celohorninová geochemická charakteristika

V roce 2024 byl analyzován jeden vzorek 296CGT0101 odebraný z chodby L4b v roce 2023. Tento vzorek amfibolitu, reprezentující jeden z hlavních horninových typů vyskytující se na PVP Bukov II, byl analyzován v laboratořích AcmeLabs Vancouver (Bureau Veritas Minerals) v Kanadě. Hlavní a stopové prvky byly stanoveny pomocí optického emisního spektrometru s indukčně vázaným plazmatem (ICP-MS). Rozpouštění vzorků pro ICP-MS analýzu bylo provedeno pomocí tavení LiBO₂/Li₂B₄O₇ (vzácné zeminy a žáruvzdorné prvky). Získaná celohorninová geochemická data byla statisticky a graficky zpracována v programu GCDkit (Janoušek et al. 2006).

V této práci je mg číslo (mg#) definováno jako $100 \frac{MgO}{FeOt + MgO} [mol.\%]$ a index A/CNK (Shand 1943)

jako $\frac{Al_2O_3}{CaO + Na_2O + K_2O}$ [*mol.*%]. Pro popis obsahů vzácných zemin (REE) normalizovaných

chondritem je použit poměr Eu/Eu*, který odráží velikost anomálie Eu $(\frac{Eu}{Eu*} = \frac{Eu_N}{\sqrt{Sm_NGd_N}})$, kde N se vztahuje ke koncentracím normalizovaným na obsahy v chondritu

(Boynton 1984). Petrografické charakteristiky studovaného vzorku a chemické složení jednotlivých minerálních fází jsou popsané ve zprávě Soejono et al. (2024). Geochemická data byla odevzdána na úložiště Sharepoint.

V rámci této zprávy jsou popisovány pouze základní geochemické charakteristiky a klasifikace. Detailnější genetické implikace, jako je charakter zdrojových magmatických systémů a identifikaci tektonického prostředí vzniku protolitů studovaných hornin, jsou pro celý soubor vzorků diskutovány v závěrečné zprávě.

Nově studovaný vzorek amfibolitu z chodby L4a má slabě intermediální složení s obsahem SiO₂ cca 55 wt.% a podle obsahu alkálií a SiO₂ v TAS diagramu (Obr. 35a; Cox et al. 1979) odpovídá andesitu. V Nb/Y–Zr/Ti diagramu (Pearce 1996) padá tento vzorek do pole bazaltu (Obr. 35b). Studovaný vzorek má relativně vysoký obsah Al₂O₃ (16,5 wt.%), ale zato nízký obsah K₂O (0,66 wt.%). Pokud porovnáváme obsahy hlavních oxidů, je patrné, že amfibolit 296CGT0101 je ve srovnání s ostatními vzorky (Bukovská et al. 2023; Soejono et al. 2024) bohatší na CaO a chudší na MgO. Vzorek má metaluminický charakter (Obr. 35a, d; A/CNK = 0,7). V B-A diagramu (Obr. 35d; Debon a Le Fort 1983) odpovídá vzorek minerální asociaci biotit ± amfibol ± ortopyroxen. Podle SiO₂–FeO/MgO diagramu (Miyashiro 1974) patří vzorek 296CGT0101 k vápenato-alkalické sérii (Obr. 35e). V AFM ternárním diagramu Irvina a Baragara (1971) odpovídá tholeitické sérii (Obr. 35f).

V diagramu normalizovaném hodnotami pro chondrit (Obr. 36a; Boyton et al. 1984) vykazuje vzor vzácných zemin studovaného vzorku relativně plochý průběh a absenci europiové anomálie. Křivky stopových prvků normalizované hodnotami pro NMORB (Sun a McDonough 1989) pro všechny studované vzorky ukazují výrazné nabohacení LILE, LREE a HFSE (Obr. 36b). Typická je výrazná negativní Nb anomálie a méně výrazné propady v Zr a Th. Vzorek 296CGT0101 vykazuje slabé ochuzení v La a Ce, pozitivní anomálii v obsahu Pb a slabou negativní anomálii v Pr. Metavulkanický vzorek studovaný v této etapě má v základních rysech podobné geochemické vlastnosti jako dříve analyzované vzorky 296CGT0034 a 296CGT0040 (Bukovská et al. 2023) a 296CGT0071 (Soejono et al. 2024) a svým chemickým složením reprezentují původně bazaltické lávy.



Obr. 35 Klasifikační diagramy studovaných metavulkanických hornin: (a) TAS diagram (Cox et al. 1979), (b) Nb/Y–Zr/Ti diagram (Pearce 1996), (c) A/CNK–A/NK diagram (Shand 1943), (d) B-A diagram (Debon a Le Fort 1983), (e) SiO₂–FeO/MgO diagram (Miyashiro 1974), (f) AFM diagram (Irvine a Baragar 1971)



Obr. 36 Obsahy vybraných stopových prvků studovaných metasedimentárních (a, b), resp. metavulkanických (c, d) hornin normalizované: (a, c) chondritem (Boyton et al. 1984), (b, d) NMORB bazaltem (Sun a McDonough 1989)

2.2.4 Oxidačně-redukční podmínky

Vyhodnocení oxidačně-redukčních podmínek horninového prostředí PVP Bukov II bylo provedeno na základě terénního měření pH, měrné elektrické vodivosti, teploty, oxidačně-redukčního potenciálu a koncentrace rozpuštěného kyslíku. Data byla doplněna chemickými analýzami odebraných vzorků podzemní vody a dokumentací přítoků podzemních vod. Dále byly provedeny laboratorní experimenty sledování spotřeby kyslíku rozpuštěného ve vodě pro vzorek amfibolitu 296CGT0009 a vzorek pararuly 296CGT0010.

Pro správnou interpretaci oxidačně-redukčního (dále jen redoxního) potenciálu a odvození redoxních podmínek v horninovém prostředí PVP Bukov II je třeba vyhodnotit celou sadu terénních měření a chemických analýz a dále správně definovat podstatu a význam redoxního potenciálu v přírodním prostředí.

Vyhodnocení bylo provedeno na 15 hydrogeologických objektech, na kterých bylo v období let 2021–2023 provedeno 33 terénních měření fyzikálně-chemických parametrů, 19 hodnot přítoků a zhotoveno 39 chemických analýz.

Pozice jednotlivých hydrogeologických objektů, které byly v rámci PVP Bukov II sledovány je uvedena na Obr. 37. Dále je uvedeno zkrácené označení vzorků jen posledním dvojčíslím.

2.2.4.1 Správnost analýz

Před vyhodnocením a geochemickým modelováním je třeba provést kontrolu správnosti analýz a vzájemnou kompatibilitu terénních a laboratorních měření. Prvním kritériem je kontrola nábojové vyrovnanosti analýz. Výsledky kontroly nábojové vyrovnanosti jsou uvedeny na Obr. 38. Ideálně by se měla nábojová nevyrovnanost pohybovat v intervalu ± 5 %, přijatelná je v intervalu ±10 %. Nábojová nevyrovnanost se u většiny analýz pohybuje v tomto intervalu, u třech analýz převažuje náboj kationtů nad nábojem aniontů o více než 10 % (významná chyba při stanovení některého z kationtů nebo aniontů či nestanovení některé podstatné složky). Význam kontroly spočívá především v tom, aby při zjištění odchylek v celkové charakteristice či vývoje podzemních vod nebyly tyto odchylky způsobené chybou analýzy chybně interpretovány jako změny v chování systému.

Další kontrolou správnosti analýz je hodnocení celkové koncentrace rozpuštěných látek, které je laboratorně stanoveno jako rozpuštěné látky sušením při 105 °C a porovnané s hodnotami vypočítanými z analýz (ve vyhodnocení označeny jako TDS lab a Dissolved solids). Zde je u většiny vzorků dosaženo dobré shody mezi stanovenou a vypočítanou hodnotou, významnější rozdíly jsou u 5 vzorků (Obr. 40).



Obr. 37 Pozice jednotlivých hydrogeologických objektů, které byly letech 2021–2023 sledovány v rámci PVP Bukov II



Obr. 38 Nábojová nevyrovnanost chemických analýz podzemních vod odebraných v PVP Bukov II v letech 2021–2023. Značení jednotlivých hydrogeologických objektů bylo zkráceno z původního značení 296HCR00XX na XX. Symboly a barvou jsou rozlišeny podzemní vody podle typu přítoku (viz Obr. 39)



Obr. 39 Porovnání koncentrace rozpuštěných látek stanovených sušením při 105 °C (TDS lab) a vypočítané z chemických analýz (Dissolved species). Symboly a barvou jsou rozlišeny podzemní vody podle typu přítoku

Vzájemnou kompatibilitu terénních a laboratorních měření je možné provést porovnáním hodnot měrné elektrické vodivosti změřené v terénu a v laboratoři a dále porovnáním hodnot pH. Rozdíly mohou být způsobeny jednak chybou měření, ale také tím, že v průběhu transportu vzorku do laboratoře došlo ve vzorku ke změnám, obvykle vysrážení či rozpuštění některé ze složek či komunikací vzorku s atmosférou. U většiny vzorků je u měrné elektrické vodivosti dosaženo dobré shody mezi terénní a laboratorní hodnotou (Obr. 40).



Obr. 40 Porovnání měrné elektrické vodivosti naměřené v terénu (EC field) a v laboratoři (EC lab). Symboly a barvou jsou rozlišeny podzemní vody podle typu přítoku (viz Obr. 39)



Obr. 41 Porovnání hodnot pH naměřených v terénu (pH field) a v laboratoři (pH lab). Symboly a barvou jsou rozlišeny podzemní vody podle typu přítoku (viz Obr. 39)

2.2.4.2 Charakteristika podzemních vod

Jedná se o středně mineralizované podzemní vody (Pitter 1998), jejichž pH se pohybuje v mírně až středně alkalické oblasti (pH 8,38–9,37). Z hlediska zastoupení hlavních složek se jedná o podzemní vody s převážně sodnými ionty (83–97 ekv. %), zbytek tvoří téměř výhradně vápenaté ionty. V aniontové části jsou síranové a hydrogenuhličitanové hlavními anionty, vzájemně kolísají mezi 30 a 55 ekv. %, zastoupení chloridů je poměrně stálé v intervalu 10–15 ekv. %. Z této charakteristiky se poněkud vymykají vzorky podzemních vod z hydrogeologického objektu 11, kde je vyšší zastoupení chloridů 20–26 ekv. % a hydrogeologického objektu 39, kde výrazně převažují hydrogenuhličitanové ionty nad síranovými 70 : 19 ekv. % při 11 ekv. % chloridů. Celková koncentrace rozpuštěných látek se pohybuje mezi 204 a 369 mg/l. Jak je patrné z Obr. 42, nemá na charakteristiku podzemních vod vliv typ přítoku. Totéž platí i o typu horninového prostředí, ze kterého dochází k přítoku podzemních vod (Obr. 43).



Obr. 42 Piperův a Durovův diagram pro podzemní vody sledované v letech 2021–2023 v rámci PVP Bukov II. Rozlišeny jsou jednotlivé typy přítoků



Obr. 43 Piperův a Durovův diagram pro podzemní vody sledované v letech 2021–2023 v rámci PVP Bukov II. Rozlišeny jsou jednotlivé typy hornin (b-a pararula je biotit-amfibolická pararula migmatitizovaná)

Zbývá posoudit, zda má typ přítoku a typ horniny systematický vliv na hodnoty pH a Eh jako klíčové parametry pro hodnocení redoxních podmínek horninového prostředí PVP Bukov II a zda jsou hlavní parametry ovlivněny velikostí přítoku.

Jak je patrné z Obr. 44, nemá typ přítoku ani typ horniny systematický vliv na hodnoty pH a redoxního potenciálu, hodnoty nahodile pokrývají celý interval uvedených parametrů. Totéž platí o velikosti přítoku (Obr. 45).



Obr. 44 Závislost redoxního potenciálu na pH s rozlišením typu přítoku (vlevo) a typu horniny (vpravo)



Obr. 45 Závislost vybraných parametrů podzemních vod horninového prostředí PVP Bukov II na velikosti přítoku podzemních vod

Podzemní vody horninového prostředí PVP Bukov II se blíží k nasycení vůči kalcitu, přitom není rozdíl mezi přítoky z puklin či hornin, kde byl identifikován kalcit a z prostředí bez kalcitu (Obr. 46). Pokud se týká dalších významných složek podzemních vod Fe, Mn a U, pak jsou podzemní vody u Fe a Mn vůči jejich minerálům pro kyslíkaté prostředí (všechny odebrané vody obsahují rozpuštěný kyslík), tedy hydroxidu železitému Fe(OH)₃ a pyrolusitu MnO₂ přesyceny o desítky řádů a u uranu nenasyceny vůči uraninitu UO₂. V případě, že bude uvažováno bezkyslíkaté prostředí a redoxní podmínky budou určeny naměřeným redoxním potenciálem (viz kapitola 2.2.4.3), pak bude stupeň nasycení podzemních vod vůči Fe(OH)₃ kolísat právě kolem nasycení, vůči pyrolusitu budou podzemní vody nenasyceny. Vůči uraninitu je většina podzemních vod za těchto podmínek nenasycena, na objektech 27, 30, 38 a 39 jsou

podzemní vody 5–9× přesyceny (Obr. 47). Zde je třeba poznamenat, že jsou koncentrace uvedených složek v podzemní vodě velmi nízké, a i malá změna koncentrace a redoxního potenciálu vede ke změně nasycení o desítky řádů.



Obr. 46 Stupeň nasycení podzemních vod horninového prostředí PVP Bukov II vůči kalcitu CaCO₃ s rozlišením přítomnosti kalcitu na puklině či v hornině



Obr. 47 Stupeň nasycení podzemních vod horninového prostředí PVP Bukov II vůči Fe(OH)₃ (vlevo) a uraninitu (vpravo) za předpokladu bezkyslíkatého prostředí (viz kap. 2.2.4.3)

Posledním parametrem, který ovlivňuje chování podzemních vod po jejich výtoku z horninového prostředí a dosažení kontaktu s atmosférou, je parciální tlak oxidu uhličitého a kyslíku. V rovnováze s atmosférou by měl parciální tlak oxidu uhličitého ve vodě dosahovat 10–4 bar a parciální tlak kyslíku 0,21 bar. Všechny podzemní vody horninového prostředí PVP Bukov II jsou vůči atmosférickému CO₂ nenasyceny (Obr. 48), po kontaktu podzemních vod s atmosférou se v nich bude CO₂ rozpouštět a jejich pH se bude posouvat do kyselejší oblasti v důsledku posunu rovnováhy rozpuštěných karbonátových látek. Vůči atmosférickému kyslíku je většina podzemních vod téměř nasycena a v kontaktu s atmosférou dojde k dosažení rovnováhy. Podle vyhodnocení redoxních podmínek horninového prostředí PVP Bukov II v kapitole 2.2.4.3 však kyslík rozpuštěný ve vodách neurčuje redoxní potenciál horninového prostředí. Kromě toho by při minimální a maximální koncentraci rozpuštěného kyslíku 0,22 a 11,8 mg/l, které byly naměřeny v terénu, měl být redoxní potenciál 781,8 a 807,4 mV, řádová změna koncentrace rozpuštěného kyslíku by způsobila jen malou změnu redoxního potenciálu 25,6 mV.



Obr. 48 Parciální tlaky oxidu uhličitého (vlevo) a kyslíku (vpravo) v podzemních vodách horninového prostředí PVP Bukov II. Červená linie vyznačuje parciální tlaky uvedených plynů za rovnováhy s atmosférou

Je možné shrnout, že podzemní vody horninového prostředí PVP Bukov II jsou středně mineralizované vody s celkovou koncentrací rozpuštěných látek v intervalu 204–369 mg/l. V kationtové části extrémně převažují sodné ionty, v aniontové části se vzájemně zastupují sírany a karbonátové látky v rozsahu ~35–55 ekv. % s relativně stálým zastoupením chloridů ~13 ekv. %. Z uvedené charakteristiky se vymykají podzemní vody z HG-objektu 39 se zastoupením karbonátových látek 70 ekv. % a z HG-objektu 11 s vyšším zastoupením chloridů 21–26 ekv. %.

Podzemní vody jsou mírně alkalické s pH v intervalu 8,44–9,32, jsou nasyceny vůči kalcitu a hydroxidu železitému. Typ a vydatnost přítoku (vlhkost, kapky, výtok) ani typ horniny (migmatit, migmatitizovaný amfibolit a biotit-amfibolická pararula migmatitizovaná) nemají na fyzikálně-chemické parametry a chemické složení podzemních vod určující vliv.

2.2.4.3 Metodika stanovení oxidačně-redukčního potenciálu

Redukční potenciály

Redoxní reakce jsou zvláštním druhem chemických reakcí, při kterých se mění oxidační číslo zúčastněných prvků. Oxidační číslo (nebo také oxidační stav, oxidační stupeň nebo mocenství) je hypotetický koncept, při kterém se předpokládá, že jsou atomy ve sloučeninách navzájem vázány ze 100 % iontově, což ve skutečnosti neplatí. Alternativně je možné oxidační číslo definovat jako počet elektronů, které atomu přebývají nebo chybí ve srovnání s prvkovým stavem.

Obecně je možné dílčí (poločlánkovou) redukční reakci zapsat rovnicí

$$Ox + n e^- \to Red \tag{1}$$

Oxidovaná a redukovaná forma téže látky je označována jako redoxní pár. Pro redukční dílčí reakci látky Ox je změna reakční Gibbsovy funkce rovna

$$\Delta G_r = G_{\text{Red}}^{\circ} + RT \ln a_{\text{Red}} - G_{\text{Ox}}^{\circ} - RT \ln a_{\text{Ox}} - G_{a_e^-}^{\circ} - nRT \ln a_{e^-}$$
(2)

kde *R* je plynová konstanta, *T* je teplota, G° jsou standardní hodnoty Gibbsovy funkce reagujících látek, *a* jsou jejich aktivity a *n* je počet vyměňovaných elektronů. Rozdíl hodnot standardních Gibbsových

$$\Delta G_r^\circ = G_{\text{Red}}^\circ - G_{\text{Ox}}^\circ \tag{3}$$

Členy s aktivitami reagujících látek je možné sloučit do jednoho členu

$$\Delta G_r = \Delta G_r^\circ + RT \ln \frac{a_{\text{Red}}}{a_{\text{Ox}} a_{a_{e^-}}^n} = \Delta G_r^\circ + RT \ln \frac{a_{\text{Red}}}{a_{\text{Ox}}} - nRT \ln a_{e^-}$$
(4)

Aktivita elektronů se v dílčí (poločlánkové) reakci při daných aktivitách oxidované a redukované formy látky v redoxním páru ustaví na takové hodnotě, aby bylo dosaženo rovnováhy. V tom případě je hodnota reakční Gibbsovy funkce ΔG_r v dílčí reakci nulová

$$0 = \Delta G_r^{\circ} + RT \ln \frac{a_{\text{Red}}}{a_{\text{Ox}}} - nRT \ln a_{\text{e}} -$$
(5)

Člen $-nRT \ln a_{e^-}$ představuje příspěvek aktivity elektronů k reakční Gibbsově funkci ΔG_{e^-} . Tento příspěvek je zároveň spojen s elektrickým potenciálem *E* vztahem

$$\Delta G_{e^-} = -nRT \ln a_{e^-} = -nFE \tag{6}$$

Dosazením za člen $-nRT \ln a_{e^-}$ obdržíme

$$0 = \Delta G_r^{\circ} + RT \ln \frac{a_{\text{Red}}}{a_{\text{Ox}}} + nFE$$
(7)

a další úpravou

$$E = \frac{-\Delta G_r^{\circ}}{nF} - \frac{RT}{nF} \ln \frac{a_{\text{Red}}}{a_{\text{Ox}}}$$
(8)

Za standardních podmínek s jednotkovými aktivitami oxidované a redukované formy látky v redoxním páru přechází rovnice na tvar

$$E^{\circ} = \frac{-\Delta G_r^{\circ}}{nF} \tag{9}$$

kde E° je standardní redukční potenciál. Výsledná rovnice pro elektrický potenciál dílčí redukční reakce má pak tvar

$$E = E^{\circ} - \frac{RT}{nF} \ln \frac{a_{\text{Red}}}{a_{\text{Ox}}}$$
(10)

která je známa jako Nernstova nebo Nernstova-Petersova rovnice. Pro vztah mezi standardní reakční Gibbsovou funkcí a rovnovážnou konstantou platí

$$\Delta G_r^\circ = -RT \ln K \tag{11}$$

Dosazením za ΔG_r° ze vztahu

$$\Delta G_r^{\circ} = -nFE^{\circ} \tag{12}$$

získáme pro standardní potenciál vztah

$$E^{\circ} = \frac{RT}{nF} \ln K \tag{13}$$

Standardní potenciály E° je tedy možné vypočítat nejen z hodnoty standardní reakční Gibbsovy funkce, ale také z hodnoty rovnovážné konstanty dílčí redukční reakce. Příklady redukčních potenciálů, které jsou významné z hlediska posouzení redoxních podmínek v horninovém prostředí PVP Bukov II jsou uvedeny v Tab. 3.

Tab. 3 Standardní redukční potenciály vybraných redox párů, které jsou významné z hlediska horninového prostředí PVP Bukov II

redoxní pár	redoxní reakce	log K	Eh°
			mV
$H_2O/O_2(g)$	$O_2(g) + 4 e^- + 4 H^+ \leftrightarrow 2 H_2O$	83,103	1229
Mn²+/pyrolusit	$MnO_2 + 4 H^+ + 2 e^- \leftrightarrow Mn^{2+} + 2 H_2O$	41,563	1229
Fe ²⁺ /Fe(OH) ₃ (s)	$Fe(OH)_{3}(s) \ + 3 \ H^{+} \ + e^{-} \ \leftrightarrow Fe^{2+} \ + 3 \ H_{2}O$	17,902	1059
NH4 ⁺ /NO ²⁻	NO_2^- + 8 H ⁺ + 6 e ⁻ \leftrightarrow NH_4^+ + 2 H ₂ O	91,383	901
NO2 ^{-/} NO3 ⁻	$NO_3^- + 2 H^+ + 2 e^- \leftrightarrow NO_2^- + H_2O$	27,6877	819
Fe ²⁺ /Fe ³⁺	$Fe^{3+} + e^- \leftrightarrow Fe^{2+}$	13,013	770
uraninit/UO ₂ 2+	UO_2^{2+} + 2 e ⁻ \leftrightarrow UO_2	13,855	410
pyrit/SO ₄ 2-	$\begin{array}{rrr} F e^{2^+} + 2 \; SO_4{}^{2^-} \; + \; 16 \; H^+ \; + \; 14 \; e^- \; \leftrightarrow \; F e S_2 \; + \\ & 8 \; H_2 O \end{array}$	83,606	353
$H_2(g)/H^+$	$2 \ \mathrm{H^{+}} + 2 \ \mathrm{e^{-}} \leftrightarrow \mathrm{H_2}(g)$	0.000	0

Oxidačně-redukční potenciály

Obecně je možné celkovou redoxní reakci vyjádřit rovnicí

$$X_{\text{Red}} + Y_{\text{Ox}} \rightarrow X_{\text{Ox}} + Y_{\text{Red}}$$
(14)

která je složena ze dvou dílčích reakcí

$$X_{\text{Red}} \to X_{\text{Ox}} + n \, \text{e}^- \tag{15}$$

$$Y_{\rm Ox} + n \, \mathrm{e}^- \to Y_{\rm Red} \tag{16}$$

kde X_{Red} je redukovaná a X_{Ox} oxidovaná forma látky X a Y_{Ox} je oxidovaná a Y_{Red} redukovaná forma látky Y. Rovnice pro rozdíl potenciálů obou redoxních párů (elektrické napětí) pak přechází na tvar

$$\Delta E = \Delta E^{\circ} - \frac{RT}{nF} \ln \frac{a_{X_{Ox}} a_{Y_{Red}}}{a_{X_{Red}} a_{Y_{Ox}}}$$
(17)

V průběhu redoxní reakce přijímá dílčí reakce s vyšším elektrickým potenciálem elektrony, aktivita redukované formy v redoxním páru roste, aktivita oxidované formy klesá a souběžně klesá i její potenciál. Dílčí reakce s nižším elektrickým potenciálem naopak elektrony odevzdává, klesá aktivita redukované formy, roste aktivita oxidované formy a souběžně roste i její elektrický potenciál. Po dosažení celkové rovnováhy v redoxní reakci se aktivity elektronů a tím i elektrické potenciály obou dílčích reakcí vyrovnají a rozdíl jejich potenciálů (elektrické napětí) je nulový

$$0 = \Delta E^{\circ} - \frac{RT}{nF} \ln \frac{a_{X_{Ox}} a_{Y_{Red}}}{a_{X_{Red}} a_{Y_{Ox}}}$$
(18)

V redoxní reakci bylo dosaženo rovnováhy. Nulové napětí pro danou redoxní reakci (nulový rozdíl potenciálů obou dílčích reakcí, které skládají redoxní reakci) však neznamená, že je nulová aktivita elektronů v prostředí. Znamená to, že je jejich aktivita pro obě dílčí reakce stejná. Aktivitu elektronů v prostředí a s ní spojený elektrický potenciál je pak možné zjistit z potenciálu kterékoliv dílčí reakce

$$E = E_{\rm X}^{\circ} - \frac{RT}{nF} \ln \frac{a_{\rm X_{\rm Red}}}{a_{\rm X_{\rm OX}}}$$
(19)

$$E = E_{\rm Y}^{\circ} - \frac{RT}{nF} \ln \frac{a_{\rm Y_{\rm Red}}}{a_{\rm Y_{\rm Ox}}}$$
(20)

Tento potenciál se označuje jako oxidačně-redukční či zkráceně redoxní potenciál a obvykle se označuje symbolem Eh nebo ORP (Oxidation Reduction Potential).

Problémy interpretace redoxních potenciálů

Obecně je redoxní potenciál spojen s aktivitou elektronů v prostředí (viz rovnice (6), která nezávisí jen na aktivitě redukované a oxidované formy příslušné látky, ale také na její speciaci a na aktivitách dalších látek, které se reakce zúčastňují a jejich speciaci. To je možné dokumentovat na dvou příkladech. V Tab. 3 jsou uvedeny standardní redukční potenciály pro dusíkaté látky, kdy je standardní redukční potenciál páru NH₄⁺/NO₂⁻ vyšší, než je standardní redukční potenciál páru NO₂⁻/NO₃⁻, což je nelogické – výše oxidované látky mají nižší redukční potenciál. Když se však podíváme na speciaci dusíkatých látek při jednotkové aktivitě protonů (pH = 0), pak zjistíme, že je dusitanový aniont přítomen jako nedisociovaná kyselina dusitá HNO₂ (Obr. 49a). Při respektování speciace dusíkatých látek už jsou vypočítané redukční potenciály redoxních párů dusíkatých látek v pořádku.

Druhým příkladem jsou redoxní potenciály redoxního páru dvojmocného a trojmocného železa. Standardní redukční potenciál redoxního páru Fe^{2+}/Fe^{3+} je 770 mV. Speciace železa v roztoku je silně závislá na pH (Obr. 49b) a při hodnotě pH = 8,92, což je průměrná hodnota pH podzemních vod na PVP Bukov II, bude železo ve vodě v podobě hydroxokomplexu Fe(OH)₃. Redukční potenciál redoxního páru $Fe^{2+}/Fe(OH)_3$ se významně sníží a bude –102 mV. Trojmocné železo je však od mírně kyselého prostředí velmi nerozpustné a v první fázi se sráží v podobě hydroxidu železitého Fe(OH)₃(ppd). Pak bude ve vodném prostředí působit redoxní pár $Fe^{2+}/Fe(OH)_3$ (ppd; ppd – precipitated) a při aktivitě rozpuštěného dvojmocného železa 10⁻⁶ (ve zředěných roztocích odpovídá koncentraci rozpuštěného dvojmocného železa 0,06 mg/l) bude redukční potenciál tohoto redoxního páru roven –169 mV.

redoxní pár	redoxní reakce	log K	Eh°	
			mV	
HNO ₂ /NO ₃ -	$NO_3^- + 3 H^+ + 2 e^- \leftrightarrow HNO_2 + H_2O$	30,9084	914	
NH4 ⁺ /HNO ₂	$HNO_2 + 7 H^+ + 6 e^- \leftrightarrow NH_4^+ + 2 H_2O$	88,1626	869	
Fe²⁺/Fe(OH)₃(s)	$Fe(OH)_3(s) + 3 H^+ + e^- \leftrightarrow Fe^{2+} + 3 H_2O$	17,902	1059	
	pH = 8,92			
Fe ²⁺ /Fe ³⁺	Fe ³⁺ + e ⁻ ↔ Fe ²⁺	13,013	770	
Fe²+/Fe(OH)₃	$Fe(OH)_3 + 3 H^+ + e^- \leftrightarrow Fe^{2+} + 3 H_2O$	-1,729	-102	
Fe²+/Fe(OH)₃(ppd)	$\begin{array}{rrr} Fe(OH)_3(ppd) + 3 \ H^+ \ + \ e^- \ \leftrightarrow \ Fe^{2+} \ + \ 3 \\ H_2O \end{array}$	-8,858	-524	
	pH = 8,92, <i>a</i> _{Fe2+} = 10 ^{−6} (~0,06 mg/l)			
Fe ²⁺ /Fe(OH)₃(ppd)	$\begin{array}{rrr} Fe(OH)_3(ppd) + 3 \ H^+ \ + \ e^- \ \leftrightarrow \ Fe^{2+} \ + \ 3 \\ H_2O \end{array}$	-2,858	-169	

Tab. 4 Redukční potenciály redox párů dusíkatých a železných látek při respektování jejich speciace v závislosti na hodnotě pH a rozpustnosti hydroxidu železitého





Obr. 49 (a) Speciace dusíkatých látek v závislosti na pH a redox potenciálu. (b) Speciace železa ve vodě v závislosti na pH a redox potenciálu bez srážení a (c) při aktivitě Fe²⁺ = 10⁻⁶ (odpovídá přibližně koncentraci rozpuštěného železa 0,06 mg/l) se srážením nejrozpustnějších minerálů železa (ppd znamená vysrážený)

Druhou komplikací při interpretaci redoxních potenciálů je nízká rychlost oxidačně-redukčních reakcí. V ideálním případě by se měly nacházet dílčí redoxní páry přítomné v systému v rovnováze, měly by mít stejný redukční potenciál a být spojeny se stejnou aktivitou elektronů. Aktivitě elektronů by se měly přizpůsobit aktivity jednotlivých členů redoxních párů a naopak. Obecně jsou přírodní systémy díky pomalému průběhu oxidačně-redukčních reakcí v redoxní nerovnováze a jednotlivé redoxní páry mají různý redukční potenciál a rozdíl jejich redukčních potenciálů je hnací silou redoxních reakcí. Redoxní potenciál prostředí pak leží někde v intervalu mezi potenciály jednotlivých redukčních párů v závislosti na rychlosti, kterou jsou elektrony uvolňovány látkami, které jsou oxidovány a na rychlosti, kterou jsou elektrony příkladu oxidace dvojmocného železa na trojmocné dusičnanovými anionty

$$8 \operatorname{Fe}^{2+} + \operatorname{NO}_{3^{-}} + 21 \operatorname{H}_{2} O \rightarrow 8 \operatorname{Fe}(OH)_{3} + \operatorname{NH}_{4^{+}} + 14 \operatorname{H}^{+}$$
(21)

která v přírodě obvykle probíhá za mikrobiální asistence. Na začátku reakce jsou v prostředí ionty dvojmocného železa a dusičnanové anionty. Vývoj redukčních potenciálů obou redoxních párů NH4⁺/HNO₃ a Fe²⁺/Fe(OH)₃ v závislosti na pokročilosti reakce od počátku až do dosažení rovnováhy je uveden na Obr. 50. Dosažení rovnováhy v uvedené reakci trvá týdny, v případě mikrobiální asistence se zkracuje na dny. Po většinu doby se redukční potenciály obou redoxních párů liší. Redoxní potenciál vodného prostředí, který je možné změřit ORP elektrodou, leží v oblasti mezi těmito dvěma redukčními potenciály v závislosti na rychlosti obou dílčích reakcí a teprve na konci reakce po dosažení rovnováhy jsou jejich potenciály stejné a naměřený redoxní potenciál bude odpovídat tomuto potenciálu.



Obr. 50 Vývoj redukčních potenciálů redoxních párů NH_4^*/NO_3^- a $Fe^{2*}/Fe(OH)_3$ při oxidaci dvojmocného železa dusičnanovými anionty v závislosti na pokročilosti reakce. Redoxní potenciál vodného prostředí, který je možné změřit ORP elektrodou leží někde mezi těmito dvěma potenciály v závislosti na rychlosti dílčích reakcí

Z výše uvedeného je zřejmé, že bez kompletních údajů o vodném prostředí (fyzikálně-chemické parametry, chemické složení) a bez úplného geochemického modelu, který umožní zjistit speciaci jednotlivých složek prostředí, není možné interpretovat redoxní podmínky reálného prostředí.

2.2.4.4 Redox potenciál přírodního prostředí

Oblast stability vodného prostředí

Hodnota pH a redoxního potenciálu Eh patří mezi nejdůležitější fyzikálně-chemické parametry přírodních vod. Redoxní potenciál čisté vody je určen redoxní reakcí

$$H_2 0 \to 0.5 \ 0_2(g) + H_2(g)$$
 (22)

která je složena ze dvou dílčích reakcí. První je oxidace kyslíku

$$H_2 0 \to 0.5 \ 0_2(g) + 2 \ H^+ + 2 \ e^-$$
 (23)

Standardní elektrický potenciál této dílčí reakce je při jednotkovém parciálním tlaku kyslíku 1,229 V. Druhou reakcí je redukce protonů vznikajících autoprotolýzou vody

$$2 H^+ + 2 e^- \rightarrow H_2(g)$$
 (24)

Standardní elektrický potenciál této reakce má za standardních podmínek, tj. při jednotkovém parciálním tlaku vodíku a při pH = 0, hodnotu 0 V.

Pokud je voda izolována od atmosféry a koncentrace rozpuštěného kyslíku $O_2(aq)$ a vodíku $H_2(aq)$ a tomu odpovídající parciální tlaky plynného kyslíku $O_2(g)$ a plynného vodíku $H_2(g)$ jsou výsledkem "vnitřní" redoxní reakce (22, pak je redoxní potenciál čisté vody při pH = 7 roven hodnotě 400,6 mV. Koncentrace rozpuštěného kyslíku a vodíku a tomu odpovídající parciální tlaky plynů jsou neměřitelné

$$c_{0_2(aq)} = 1,14 \times 10^{-31} \frac{\text{mol}}{\text{kg}}, c_{\text{H}_2(aq)} = 2,28 \times 10^{-31} \frac{\text{mol}}{\text{kg}}, f_{0_2(g)} = 10^{-28,04}, f_{\text{H}_2(g)} = 10^{-27,53}$$

Hodnoty pH a Eh vody se nemohou pohybovat v libovolných mezích. Jakmile redoxní potenciál překročí hodnotu, kdy parciální tlak kyslíku a tomu odpovídající koncentrace rozpuštěného kyslíku v rovnici (23 překročí atmosférický tlak, bude kyslík z vody unikat a voda se bude rozkládat na plynný kyslík. Při pH = 0 je tato hranice při redoxním potenciálu 1,229 V. Protože se reakce zúčastňují protony, je elektrický potenciál této dílčí reakce závislý na pH prostředí

$$Eh = 1,229 - 0,05917 \text{ pH}$$
(25)

a aktivita elektronů

$$p\varepsilon = 20,78 - pH \tag{26}$$

Při nízkých redoxních potenciálech (vysoké aktivitě elektronů), kdy parciální tlak vodíku a tomu odpovídající koncentrace vodíku rozpuštěného ve vodě dosáhne v rovnici (24 atmosférického tlaku, rozkládá se voda na plynný vodík, který z vody uniká. Za standardních podmínek při pH = 0 je tento hraniční redoxní potenciál roven 0 V. Reakce se zúčastňují protony, a proto je redoxní potenciál závislý na pH prostředí podle rovnice

$$Eh = -0.05917 \text{ pH}$$
 (27)

a aktivita elektronů je

$$p\varepsilon = -pH \tag{28}$$

Těmito hranicemi jsou vymezeny podmínky, ve kterých probíhají redoxní reakce v přírodním vodném prostředí. Horní a spodní hranice stability vody jsou vyznačeny v podobě pH-Eh a pH-pε diagramů na Obr. 51.



Obr. 51 Hranice stability vody v podobě pH-Eh (vlevo) a pH-pɛ (vpravo) diagramů

Redoxní potenciály přírodního prostředí

Pro charakteristiku vodného prostředí se z hlediska pH a Eh často využívá různě upraveného diagramu Garrelse a Christa (1965; Obr. 52), který je založen na datech publikovaných Bassem Beckingem et al. (1960). Ten vyznačuje v pH-Eh diagramu oblasti podmínek charakteristických pro různé typy přírodních vod (Obr. 53).



Obr. 52 Charakteristické oblasti hodnot pH a Eh pro různé typy prostředí, jak je vyznačili Garrels a Christ (1965)

Toto vymezení jednotlivých oblastí je však značně omezené a nepřesné. Procesy, které ovlivňují hodnoty pH a Eh jsou velmi různorodé a složitě provázané. V důsledku toho se jednotlivé oblasti podmínek přírodních vod významně překrývají (Obr. 53), a tak je mnohem výstižnější pro charakterizaci podmínek přírodních prostředí využít původních dat Basse Beckinga et al. (1960). Příklady hodnot pro jednotlivé typy přírodních vod jsou uvedeny na Obr. 54.



Obr. 53 Hodnoty pH a Eh přírodních vod a příklady hodnot pro sladké a důlní vody podle Bass Becking et al. (1960)



Obr. 54 Oblasti hodnot pH a Eh pro různé typy přírodních vod. Zpracováno na základě hodnot uvedených v publikaci Bass Becking et al. (1960)

2.2.4.5 Oxidačně-redukční podmínky horninového prostředí PVP Bukov II

Charakter redoxního prostředí

Pro posouzení redoxních podmínek horninového prostředí PVP Bukov II byly výsledky terénního měření redoxních potenciálů vyneseny do pH-Eh diagramů podle Garrelse a Christa (1965) a podle Bass Beckinga (1960; Obr. 55). Vynesené hodnoty redoxních potenciálů podle tohoto rozlišení spadají do oblasti vod charakteristické pro přechodné prostředí až prostředí izolované od atmosféry. To se jeví v rozporu s naměřenými koncentracemi rozpuštěného kyslíku. Jak už bylo zmíněno v podkapitole 2.2.4.3, probíhají redoxní reakce pomalu, a navíc se redoxní potenciál ustavuje na hodnotách, které jsou určovány nejen aktivitami jednotlivých členů redoxních párů, ale také kinetikou jednotlivých reakcí. Přestože je kyslík hlavním oxidačním činidlem, jsou jeho reakce ve srovnání s ostatními redoxními reakcemi relativně pomalé a redoxní potenciál vodného prostředí je obvykle určován jinými redoxními páry. Při hodnotách pH povrchových vod kolem 8,2 nasycených vůči atmosférickému kyslíku a při teplotě ~20 °C by se měl redoxní potenciál redoxního páru H₂O/O₂(aq) pohybovat kolem 740 mV, reálně naměřené hodnoty se však obvykle pohybují v intervalu 400–600 mV. Je zřejmé, že je redoxní potenciál horninového prostředí určován jinými redoxními páry, než je H₂O/O₂(aq).



Obr. 55 Diagramy pH-Eh podle Garrelse a Christa (1965) a Bass Beckinga et al. (1960) s vynesením hodnot pro podzemní vody PVP Bukov II. Vody jsou symboly a barevně rozlišeny podle typu přítoku

Identifikace redoxního (redoxních) párů určujících redoxní prostředí

Pro všech 39 vzorků byly na základě změřených fyzikálně-chemických parametrů a analýz vod sestaveny geochemické modely v softwarovém prostředí Geochemist's Workbench Release 17.0.2 (Bethke et al. 2023). S jejich pomocí byla určena speciace jednotlivých složek podzemních vod PVP Bukov II a vypočítány aktivity jednotlivých specií. V geochemických modelech pak byly pro jednotlivé vzorky podzemních vod vypočítány redukční potenciály jednotlivých redoxních párů, které jsou uvedeny v Tab. 5.

H ₂ O/O ₂ (aq)	$O_2(aq) + 4 H^+ + 4 e^- \leftrightarrow 2 H_2O$							
Mn ²⁺ /MnO ₂	pyrolusit + 4 H ⁺ + 2 e [−] \leftrightarrow Mn ²⁺ + 2 H ₂ O							
NH4 ⁺ /NO3 ⁻	NO_3^- + 10 H ⁺ + 8 e ⁻ \leftrightarrow NH_4^+ + 3 H ₂ O							
Fe ²⁺ /Fe(OH) ₃ (ppd)	$Fe(OH)_3(ppd) + 3 H^+ + e^- \leftrightarrow Fe^{2+} + 3 H_2O$							
UO ₂ /UO ₂ ²⁺	$UO_2^{2^+} + 2 e^- \leftrightarrow uraninit$							
FeS ₂ /SO ₄ ^{2–}	$Fe^{2+} + 2 SO_4^{2-} + 16 H^+ + 14 e^- \leftrightarrow pyrit + 8 H_2O$							

Tab. 5 Redoxní páry, které byly vyhodnocovány pro podzemní vody PVP Bukov II

Redukční potenciály redoxních párů v podzemních vodách PVP Bukov II jsou vyneseny v závislosti na hodnotách pH na Obr. 37. Jednotlivé redoxní páry vykazují výrazné rozdíly v redukčních potenciálech a jsou v podzemních vodách ve výrazné nerovnováze. Reálně naměřené redoxní potenciály jsou výrazně nižší, než za daných podmínek odpovídá ideálním hodnotám redukčních potenciálů redoxních párů H₂O/O₂(aq), Mn²⁺/MnO₂ a NH₄⁺/NO₃⁻ a naopak zřetelně vyšší, než by odpovídalo redoxnímu páru FeS₂/SO₄²⁻. Ve většině případů je dosaženo dobré shody mezi naměřeným redoxním potenciálem a redukčními potenciály redoxních párů Fe²⁺/Fe(OH)₃(ppd) a UO₂/UO₂²⁺.



Obr. 56 Vypočítané redukční potenciály jednotlivých redoxních párů a hodnoty redoxního potenciálů naměřeného při odběru vzorků v terénu na PVP Bukov II

Pro určení redoxního páru (redoxních párů), které určují redoxní potenciál horninového prostředí PVP Bukov II, byly na základě úplného geochemického modelu vod sestrojeny stabilitní pH-Eh diagramy pro jednotlivé složky vod, které se mohou podílet na redoxních reakcích a vynesením reálně naměřených redoxních potenciálů a redukčních potenciálů jednotlivých redoxních párů pro zjištěné aktivity jednotlivých specií. Porovnání je uvedeno na Obr. 57.

Z porovnání vyplývá, že většina redoxních potenciálů naměřená v terénu velmi dobře souhlasí s hodnotami redoxních potenciálů vypočítaných v geochemických modelech jednotlivých podzemních vod, který byl sestrojen na základě chemických analýz a umožňoval zjistit speciaci příslušných složek a určit jejich aktivitu. To svědčí o tom, že je redoxní potenciál horninového prostředí určován redoxním párem dvojmocné/trojmocné železo s rovnováhou mezi ionty dvojmocného železa a hydroxidem železitým s rovnicí

$$Fe(OH)_{3}(ppd) + 3 H^{+} + e^{-} \leftrightarrow Fe^{2+} + 3 H_{2}O$$
(29)

s tím, že kontrola redoxního potenciálu prostředí přechází u nejnižších redoxních potenciálů na redoxní pár pyrit/síranové ionty FeS₂/SO₄²⁻ s redoxní rovnicí

$$Fe^{2+} + 2 SO_4^{2-} + 16 H^+ + 14 e^- \leftrightarrow pyrit + 8 H_2O$$
 (30)

Kyslík rozpuštěný v podzemních vodách je samozřejmě hlavním oxidačním činidlem a způsobuje oxidaci oxidovatelných složek obsažených v horninách (Fe, Mn, U, S). Rychlost jeho reakcí je však pomalá ve srovnání s ostatními redoxními páry, a tak je aktivita elektronů a s ní spojený redoxní potenciál prostředí určován jinými redoxními reakcemi, v tomto případě aktivitou rozpuštěného dvojmocného železa a hydroxidem železitým (obecně limonitem) a u některých vzorků se blíží redukčnímu potenciálu redoxního páru pyrit-síranové anionty. Koncentrace rozpuštěného kyslíku má nicméně na redoxní potenciál prostředí vliv zprostředkovaně přes tyto redoxní páry, jak o tom svědčí přes značný rozptyl dat závislost redoxního potenciálu na koncentraci rozpuštěného kyslíku na Obr. 59.

Geochemické modely byly využity také pro zjištění reakcí, které kontrolují hodnotu pH. Jak je patrné z Obr. 60, leží naměřené hodnoty pH podzemních vod PVP Bukov II v okolí hranice mezi kalcitem a aktivitou vápenatých a hydrogenuhličitanových iontů ve vodách a hodnota pH je kontrolována rovnováhou

$$Ca^{2+} + HCO_{3^{-}} \leftrightarrow CaCO_{3}(s) + H^{+}$$
(31).



Obr. 57 Porovnání reálných a modelových (teoretických) hodnot redukčních potenciálů pro složky podzemních vod PVP Bukov II, které se mohou v podzemních vodách účastnit redoxních reakcí. Stabilitní pH-Eh diagramy jsou pro jednotlivé složky konstruovány z úplného geochemického modelu podzemní vody 296HCR0027 ze dne 5. 12. 2022. Pro ostatní vody se stabilitní diagramy liší jen nevýznamně



Obr. 58 Porovnání reálných a modelových (teoretických) hodnot redukčních potenciálů pro složky podzemních vod PVP Bukov II, které se mohou v podzemních vodách účastnit redoxních reakcí. Stabilitní pH-Eh diagramy jsou pro jednotlivé složky konstruovány z úplného geochemického modelu podzemní vody 296HCR0027 ze dne 5. 12. 2022. Pro ostatní vody se stabilitní diagramy liší jen nevýznamně



Obr. 59 Porovnání koncentrací rozpuštěného kyslíku a naměřeného redoxního potenciálu v podzemních vodách PVP Bukov II



Obr. 60 Stabilitní pH-Eh diagram pro uhlíkaté látky v podmínkách PVP Bukov II. Stabilitní pH-Eh diagram byl pro uhlíkaté látky konstruován z úplného geochemického modelu podzemní vody 296HCR0027 ze dne 5. 12. 2022. Pro ostatní vzorky se stabilitní diagramy liší jen nevýznamně

2.2.4.6 Spotřeba rozpuštěného kyslíku interakcí s horninami

Pro sledování rychlosti spotřeby kyslíku rozpuštěného ve vodě byly vybrány dvě horniny s odlišným zastoupením železa, manganu a sulfidické síry. První vzorek je amfibolit s označením 296CGT0009 a druhou horninou je vzorek pararuly s označením 296CGT0010. Kompletní silikátové analýzy jsou uvedeny v Tab. 6 Silikátové analýzy vzorků použitých pro sledování spotřeby rozpuštěného kyslíku. Jsou uvedeny výsledky paralelních analýz.

vzorek	296CG	ЭТ0009	296CGT0010		
složka	hm. %	hm. %	hm. %	hm. %	
-H ₂ O	0,02	0,03	0,05	0,04	
+H ₂ O	1,41	1,41	1,78	1,70	
SiO ₂	50,66	50,66	55,92	55,92	
TiO ₂	0,65	0,63	0,87	0,88	
Al ₂ O ₃	16,33	16,43	14,30	14,25	
Fe ₂ O ₃	1,54	1,55	1,13	1,15	
FeO	8,59	8,59	6,47	6,57	
MnO	0,20	0,19	0,15	0,14	
CaO	10,18	10,36	5,96	5,95	
MgO	5,82	5,71	6,10	6,08	
K ₂ O	0,60	0,59	1,19	1,22	
Na ₂ O	2,67	2,62	4,42	4,45	
S	0,10	0,10	0,36	0,35	
SO3	0,05	0,05	0,02	0,05	
CO ₂	0,08	0,08	0,26	0,26	
P ₂ O ₅	0,23	0,18	0,30	0,30	
celkem	99,13	99,18	99,28	99,31	

Tab. 6 Silikátové analýzy vzorků použitých pro sledování spotřeby rozpuštěného kyslíku. Jsou uvedeny výsledky paralelních analýz

Ze vzorků byly sítováním připraveny zrnitostní frakce 0,10–0,28 mm (Obr. 61), pečlivě propláchnuty vodou a vysušeny při pokojové teplotě. 150 g vzorku horniny bylo vloženo do vaku na vodu značky Naturehike Hydrovak Pro 146 g, 1,5 l, naplněno 1,5 l deionizované vody nasycené vůči atmosférickému kyslíku. Vak neprodyšně uzavřen tak, aby neobsahoval žádnou plynnou fázi (Obr. 62). Souběžně byl jako kontrolní sledován jeden vak s vodou nasycenou vůči atmosférickému kyslíku bez horninového vzorku. Odběr vzorků vody byl prováděn přes speciální ventil tak, aby se při odběru zabránilo kontaktu s atmosférou.



Obr. 61 Vzorky hornin použité pro sledování spotřeby kyslíku. Vlevo: 296CGT0009 (amfibolit), vpravo: 296CGT0010 (pararula)



Obr. 62 Vak se vzorkem 150 g horniny a 1,5 l vody nasycené vůči atmosférickému kyslíku

Koncentrace rozpuštěného kyslíku byla stanovována testovací soupravou HI 3810 Rozpuštěný kyslík firmy Hanna Instruments Czech s.r.o. s rozsahem stanovení koncentrace rozpuštěného kyslíku 0– 10 mg/l O₂(aq) a přesností ±0,1 mg/l modifikovanou azidovou metodou.

Před začátkem experimentů byla neprodyšnost vaků a těsnost ventilu prověřena tak, že byly vaky naplněny deionizovanou vodou bez rozpuštěného kyslíku, který byl vypuzen probublávání dusíkem. Koncentrace kyslíku zůstala i po týdnu nulová.

Koncentrace rozpuštěného kyslíku ve vodě v kontaktu s horninou bez přístupu atmosféry byla sledována po dobu 131 dnů. Výsledky stanovení rozpuštěného kyslíku jsou uvedeny v Tab. 7 a na Obr. 63.

•		•				
vzorek	blank	2 96CGT 0009	2 96CGT 0010			
čas	O ₂ (aq)	O ₂ (aq)	O ₂ (aq)			
dny	mg/l	mg/l	mg/l			
0	7,6	7,6	7,6			
8	7,5	7,4	7,8			
21	7,5	7,4	7,5			
46	7,6	7,6	7,5			
58	7,5	7,5	7,5			
65	7,7	7,5	7,5			
84	7,5	7,6	7,5			
107	7,5	7,5	7,5			
131	7,8	7,7	7,6			

Tab. 7 Koncentrace kyslíku v 1,5 l destilované vody v interakci se 150 g horniny



Obr. 63 Vývoj koncentrace kyslíku rozpuštěného v 1,5 l destilované vody v interakci se 150 g horniny. Blank je koncentrace kyslíku ve vodě bez horniny

Voda byla před uzavřením do vaků nasycena atmosférickým kyslíkem při teplotě 33 °C (horké letní dny), ideálně by měla koncentrace rozpuštěného kyslíku dosáhnout 7,716 mg/l O₂(aq).

V průběhu dlouhodobého experimentu sledování interakce kyslíku rozpuštěného ve vodě s horninami nedošlo k poklesu jeho koncentrace a je možné konstatovat, že je rychlost interakce kyslíku s horninami ve vodném prostředí extrémně pomalá. To potvrzuje výsledky studia zvětrávání hornin v reálném horninovém prostředí. Vzorky migmatitizované biotitické až amfibol-biotitické pararuly, odebrané na 20. patře dolu R 1 ložiska Rožná, které byly exponovány vůči vlhkosti a atmosféře od roku 1985, nejevily ani při mikroskopickém studiu od povrchu žádné známky oxidace či dalších typů přeměny (Zeman a Cahová 2020).

2.2.4.7 Redukční kapacita hornin

Principiálně je redukční kapacita hornin dána obsahem složek v horninách, které jsou schopny oxidace kyslíkem. Redukční kapacitu hornin je možné vypočítat z chemické analýzy podle obsahu dvojmocného železa, dvojmocného manganu a sulfidické síry. Pro oxidační reakce uvedených složek platí následující rovnice

$$Fe^{2+} + H^{+} + 0.25 O_2(aq) \rightarrow Fe^{3+} + 0.5 H_2O$$
(32)

$$Mn^{2+} + H_2O + 0.5 O_2(aq) \rightarrow MnO_2 + 2 H^+$$
 (33)

$$S^{2-} + 2 O_2(aq) \rightarrow SO_4^{2-}$$
 (34)

které ukazují, kolik kyslíku je třeba na oxidaci každé ze složek obsažených v hornině. Seznam hornin vybraných pro výpočet redukční kapacity je uveden v Tab. 8.

Tab. 8 Vzorky hornin,	pro které byly	v zhotoveny si	ilikátové analýzy	a proveden	výpočet re	dukční kapacity
				· · · · · ·	J P P P P P P P P P P	

číslo	označení	hornina
1	296CGT0009	amfibolit
2	296CGT0010	pararula
3	296CGT0034	amfibolit
4	296CGT0035	migmatit
5	296 CGT0036	pararula
6	296 CGT0071	amfibolit migmatitizovaný

Silikátové analýzy vybraných hornin a výpočet redukční kapacity hornin jsou uvedeny v Tab. 8. Ze složek, které se mohou oxidovat molekulárním kyslíkem, má nejvyšší obsah dvojmocné železo, jehož koncentrace se pohybují v rozmezí 4,00–9,13 hm. %. Obsahy dalších oxidovatelných složek manganu a sulfidické síry se pohybují o více než řád níže, přesto má obsah sulfidické síry na redukční kapacitu hornin nejvyšší vliv. Je to dáno tím, že na oxidaci jednoho molu dvojmocného železa je třeba jen 0,25 molu molekulárního kyslíku, zatímco na oxidaci jednoho molu sulfidické síry jsou třeba 2 moly molekulárního kyslíku, to je osmkrát více.

Vysokou redukční kapacitu mají pararuly díky nejvyššímu obsahu sulfidické síry (pohybuje se kolem 0,35 hm. %) a amfibolity díky vysokému podílu dvojmocného železa (kolem 9 hm. %). Nízkou redukční kapacitu má migmatit či migmatitizovaný amfibolit, které mají relativně nízké obsahy jak sulfidické síry, tak i dvojmocného železa. Mangan se podílí na redukční kapacitě hornin nejméně.

	296GCT0009 296GCT0010		296GCT0034 296		296G0	296GCT0035 296C		296GCT0036 296G		T0071		
složka	hm. %	hm. %	hm. %	hm. %	hm. %	hm. %	hm. %	hm. %	hm. %	hm. %	hm. %	hm. %
-H ₂ O	0,02	0,03	0,05	0,04	0,06	0,04	0,03	0,05	0,11	0,10	0,08	0,09
+H ₂ O	1,41	1,41	1,78	1,70	1,63	1,59	1,09	1,11	1,99	1,98	0,98	0,96
SiO ₂	50,66	50,66	55,92	55,92	49,13	49,13	65,22	65,22	65,08	65,08	66,32	66,32
TiO ₂	0,65	0,63	0,87	0,88	1,63	1,68	0,68	0,68	0,50	0,50	0,54	0,59
Al ₂ O ₃	16,33	16,43	14,30	14,25	15,34	15,15	14,06	14,16	13,98	14,04	14,19	14,39
Fe ₂ O ₃	1,54	1,55	1,13	1,15	0,91	1,06	0,04	0,06	0,38	0,49	0,34	0,46
FeO	8,59	8,59	6,47	6,57	9,13	8,96	4,94	4,92	4,11	4,00	4,45	4,33
MnO	0,20	0,19	0,15	0,14	0,17	0,17	0,06	0,06	0,05	0,05	0,06	0,06
CaO	10,18	10,36	5,96	5,95	9,68	9,97	3,30	3,25	2,86	2,66	3,11	3,53
MgO	5,82	5,71	6,10	6,08	7,20	7,15	2,48	2,42	3,11	3,27	2,93	2,52
K ₂ O	0,60	0,59	1,19	1,22	1,03	1,04	3,29	3,25	1,94	1,78	1,92	1,88
Na ₂ O	2,67	2,62	4,42	4,45	3,12	3,05	3,55	3,42	4,41	4,54	3,90	3,80
S	0,10	0,10	0,36	0,35	0,15	0,18	0,21	0,22	0,36	0,34	0,13	0,13
SO3	0,05	0,05	0,02	0,05	0,05	0,02	0,02	0,02	0,02	0,05	0,05	0,05
CO ₂	0,08	0,08	0,26	0,26	0,14	0,14	0,08	0,08	0,16	0,16	0,06	0,06
P ₂ O ₅	0,23	0,18	0,30	0,30	0,41	0,41	0,26	0,19	0,18	0,16	0,21	0,16
celkem	99,13	99,18	99,28	99,31	99,78	99,74	99,32	99,12	99,25	99,20	99,26	99,33
						mmol/1	00 g					
Fe ²⁺ →Fe ³	119,56	119,56	90,05	91,45	127,08	124,71	68,76	68,48	57,21	55,67	61,94	60,27
Mn ²⁺ →M n ⁴⁺	2,82	2,68	2,11	1,97	2,40	2,40	0,85	0,85	0,72	0,69	0,85	0,82
$S^{2-}\rightarrow S^{6+}$	3,12	3,12	11,23	10,91	4,68	5,61	6,55	6,86	11,23	10,60	4,05	4,05
celkem O ₂	37,54	37,47	46,02	45,68	42,32	43,60	30,71	31,26	37,12	35,47	24,02	23,59
						mg/10	0 g					
celkem O ₂	1201,1 4	1198,8 8	1472,7 2	1461,6 4	1354,2 9	1395,2 3	982,6 9	1000,4 3	1187,6 8	1134,9 2	768,6 0	754,7 5

Tab. 9 Paralelní silikátové analýzy a výpočet redukční kapacity vybraných hornin PVP Bukov II

2.2.4.8 Závěry analýzy oxidačně-redukčních podmínek

Podzemní vody PVP Bukov II patří mezi středně mineralizované vody s celkovou koncentrací rozpuštěných látek v intervalu 204–369 mg/l s mírně až středně alkalickou hodnotou pH v rozmezí 8,38–9,37. V kationtové části výrazně převládají sodné ionty, v aniontové části kolísá zastoupení síranových a hydrogenuhličitanových iontů kolem poměru 1 : 1 s nižším podílem chloridových iontů (10–15 ekv. %, na objektu 11 je to 20–26 ekv. %).

Typ přítoku (vlhkost, kapky, průtok), velikost přítoku a typ horniny, ze kterého dochází k přítoku nemá na celkovou mineralizaci a chemické složení podzemních vod vliv. Totéž platí i pro hodnoty pH a redoxního potenciálu.

Podzemní vody PVP Bukov II jsou nasycené nebo se nasycení blíží vůči kalcitu, ve většině případů jsou nasycené nebo přesycené vůči hydroxidu železitému a v některých případech přesycené vůči uraninitu. Z hlediska rozpuštěných plynů se ve většině případů blíží podzemní vody k nasycení vůči atmosférickému kyslíku a jsou silně nenasycené vůči atmosférickému oxidu uhličitému.

Redoxní potenciál prostředí odpovídá přechodným až mírně redukčním podmínkám a je určován 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 PVP Bukov II se podílí na určení redoxního potenciálu prostředí jen zprostředkovaně přes pomalou oxidaci redukovaných členů uvedených redoxních párů.

Hodnota pH podzemních vod je určována rovnováhou mezi kalcitem a aktivitou vápenatých a hydrogenuhličitanových iontů.

Experimenty sledující interakci vody nasycené vůči atmosférickému kyslíku ukázaly, že jsou amfibolit i pararula vůči oxidaci velmi odolné a v intervalu 131 dnů nebyl pozorován v rámci přesnosti stanovení žádný úbytek kyslíku. To potvrzuje výsledky studia zvětrávání hornin z ložiska Rožná, kdy ani po 35 letech expozice migmatitizované biotitické až amfibol-biotitické pararuly vůči vlhkosti a atmosféře nebyly při mikroskopickém studiu povrchu pozorovány žádné známky oxidace či dalších typů sekundární přeměny hornin.

Redukční kapacita hornin se pohybuje kolem 1 000 mg O₂ na 100 g horniny, přičemž o redukční kapacitě hornin rozhoduje 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 migmatitizovaný amfibolit.
2.3 3D strukturněgeologický model

Hlavní práce provedené během posledního roku řešení projektu na 3D strukturněgologickém modelu spočívaly v identifikaci, propojení a vymodelování nejvýznamnějších struktur (s označením SGXX; Obr. 64) vyskytujících se v celých vyražených prostorech PVP Bukov II. Tektonická síť významnějších struktur je tvořená pěti zónami reaktivované foliace konkordantními s penetrativní metamorfní stavbou a dvaceti třemi poruchovými zónami (Elektronická příloha 4). 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 (Elektronická příloha 4): nejdelší zlomy se ssv.–jjz. až sv.–jz. průběhem, kratší zlomy se ssz.– jjv. průběhem a nejméně početné zóny se zjz.–vsv. průběhem. Posuny na identifikovaných strukturách jsou maximálně v řádu desítek cm a zóny křehce reaktivované foliace nejsou výrazněji posouvány protínajícími zlomovými zónami. Identifikovaný pohyb na některých zlomových strukturách není promítnutelný v daném měřítku modelu. Struktury a jejich vlastnosti v severní části PVP Bukov II, v oblasti chodeb L4a a L4b, jsou blíže popsány ve zprávě zabývající se klasifikačním systémem horninového masivu (Soejono et al. 2025).



Obr. 64 Hlavní struktury 3D geologického modelu a prostor PVP Bukov II, z důvodu lepší přehlednosti zobrazeny v chodbách L4a, L4b a L5. Zeleně jsou zobrazeny zlomy, oranžově pak oblasti reaktivované foliace

Dále byla do modelu doplněna drobná tělesa hornin, zejména amfibolitů, tvořící lokalizované čočky nebo budiny zavrásněné do foliace (Obr. 65). Jejich výskyt je sporadický a dosahují velikosti prvních jednotek metrů. V rámci měřítka 3D strukturněgeologického modelu, např. pro účely navazujícího hydraulického modelování, nepředstavují výrazné nehomogenity nebo litologické přechody. Nicméně v měřítku jednotlivých zkušebních komor mohou přispět k lepší lokalizaci in-situ experimentů. Jsou modelované jako různě orientovaná tělesa doutníkovitého tvaru.



Obr. 65 Budiny a čočky amfibolitu ve zkušebních komorách chodby L8

Hlavní litologické hranice byly zkonstruovány primárně z podrobné petrologické dokumentace jednotlivých chodeb a představují hlavní základ geologického modelu, od kterého se petrologická dokumentace ve zkušebních komorách ani v nově dokumentovaných chodbách L4c a L4d neodchyluje. Historie vývoje 3D modelu je na Obr. 66.



Obr. 66 Porovnání vývoje 3D strukturněgeologického modelu v rámci postupu ražeb a dokumentace vyražených prostor po letech odevzdaných průběžných zpráv

2.4 Hydrogeologická charakterizace

2.4.1 Hydrogeologická dokumentace

Dokumentace přítoků

V průběhu postupujících ražeb byla prováděna hydrogeologická dokumentace průsaků podzemní vody do nově ražených prostor podzemní laboratoře a jejího okolí. U průsaků byly dokumentovány následující parametry:

- zdroj přítoku (puklina, poruchová zóna, návrt, vrt);
- lokalizace (komora, chodba, stěna, pozice nad počvou, metráž);
- u strukturních prvků typ, orientace, výplň, šířka;
- vydatnost v kategoriích 1) vlhnutí stěny, 2) kapky, 3) výtok;
- fyzikálně-chemické parametry podzemních vod (pH, měrná elektrická vodivost, obsah rozpuštěného kyslíku, Eh, teplota vody).

Do listopadu roku 2024 bylo celkem zdokumentováno 50 průsaků respektive výtoků (odběrů) z vrtů. Některé dokumentační body zahrnují cílené odběry podzemní vody pro izotopové analýzy. Vzhledem k potřebě většího množství neokysličené vody pro tyto analýzy jsou některé z těchto bodů ve větší vzdálenosti od PVP Bukov II. Plošná revize všech přítoků v nově ražených chodbách PVP Bukov II probíhala v intervalu cca 1× za rok od počátku roku 2023 (2/2023, 1/2024, 11/2024).

Počty dokumentovaných bodů v jednotlivých částech PVP Bukov II a v okolí uvádí Tab. 10. Počty vzorků vedené v tabulce nezahrnují vzorky odebírané při pravidelném monitoringu. Primární popis průsaků, jejich vývoj v čase, odběry vzorků podzemních vod, vazbu průsaků na struktury a výsledky terénních měření obsahuje tabulka v příloze (Elektronická příloha 6). Graficky jsou místa přítoků znázorněna na schématu PVP Bukov II (Obr. 67) a na schématu části 12. patra (Obr. 79). Pozice přítoků ve schématu na Obr. 67 odpovídá první dokumentaci. Přítoky, které v průběhu času vyschly zcela nebo z převážné části (aktuálně ve formě lokálních náznaků vlhkosti na stěnách a stropu), jsou vyznačeny šedou barvou.

chodba	počet bodů	počet vzorků celkem	metráže
L4a	6	6	3–4; 24–25; 29; 40–45; 50–60; 73
L4b	6	6	3–4; 8,5–11; 13,5–15; 22–26; 27,5; 32
L5	6	4	0,5; 4,5–5, 9,5–12,8; 12,8–16; 68
L6	5	4	25; 39; 54; 59–61,5;64–66,5
L7	7	7	45; 49–50; 53–54; 53–55; 55,5–57; 58–62
L8	6	4	54; 56,5–59; 60; 67–69; 76; 87,5–88;
PŠ1-123	9	22	750–751; 901; 918; 918,5–930; 928,8; 929,6; 930,2; 948–973; 2047
VCH5-6	2	0	20, 30–31,5
ZK72J	1	0	1
ZK62S	1	0	8
BZ-XIIS	1	1	129,3
Technologická voda		1	v L6 z vrtné soupravy

Tab. 10 Počty dokumentovaných hydrogeologických bodů a odběrů vzorků podzemních vod (mimo monitoring)

TZ811/2025



Obr. 67 Schéma zvodnění v prostoru PVP Bukov II

Chodba L4a

Na metráži 3 až 4 m byla na počátku roku 2024 zdokumentována vlhká zóna na pravé stěně (d. b. 296HCR0047) vybíhající do stropu. Při primární dokumentaci v době ražby chodby se tato zóna neprojevovala. Zóna je vázaná na křížení foliace s průběžnou puklinou ve stropě.

Souvislý vlhký pás ve stropě chodby L4a se nachází na metráži 22,5 až 35 m (střed výstroje chodby), vlhkost místy vybíhá do obou boků. Při primární dokumentaci (prosinec 2022) byl v této zóně dokumentován slabý průsak (d. b. 296HCR0031) ve stropě na metráži 24 až 25 m a průsak d. b. 296HCR0032 ve formě častých kapek v okolí zlomu na metráži 29 m. Průsaky se několik měsíců po vyražení postupně spojily do jedné zóny v okolí zlomu SG03 (označení zlomů viz kapitola 2.3, Obr. 68, Elektronická příloha 4). Součástí zóny je řada foliací a puklin rovnoběžných s chodbou. Zlom SG03 působí jako izolátor a odděluje výše zmíněné primárně dokumentované průsaky. Z hlediska hydrogeologie se jedná o kritickou strukturu. Větší intenzita kapek byla v listopadu 2024 zaznamenána na metráži 28 a 32 m.

Slabé průsaky byly v únoru 2023 dokumentovány v úseku 40 až 45 m ve stropě a na levé stěně chodby (d. b. 296HCR0036). Při následných dokumentacích byl úsek prakticky suchý, pouze s lokálními, velmi omezenými náznaky vlhkosti. V listopadu 2024 bylo zaznamenáno slabé zvlhnutí spodní části levé stěny v okolí poruchy SG08 a dále náznaky zamokření v okolí poruchy SG04 opět na levé stěně.

Široký slabě zvodnělý pás ve formě vlhkých skvrn s občasnou kapkou se vyskytoval při primární dokumentaci v únoru 2023 na metráži 50 až 60 m (d. b. 296HCR0037), zejména na levé stěně chodby. Lokálně vlhkost vybíhala do stropu. Při následných dokumentacích byl celý pás prakticky suchý s lokálními náznaky vlhkosti na velmi malých plochách. V listopadu 2024 byla zaznamenána slabá vlhkost na levé stěně na metráži 51 m poblíž křížení poruch SG09 a SG06.

Po odvrtání vrtů pro geotechnickou stanici v koncové části chodby L4a byl v květnu 2023 dokumentován výtok z vrtu L4a-72L (d. b. 296HCR0038). Následně byl zaznamenán slabý průsak ve formě kapek z dalších dvou vrtů, a to L4a-72U a L4a-72UL. Vrty je pravděpodobně drénována puklinová zóna, která se vyskytuje v okolí vrtů. Po uzavření vrtů L4a-72L a L4a-72UL pakrem tlak ve vrtech nastoupal na hodnotu 0,6, respektive 0,2 baru a voda začala výrazně prosakovat puklinovou zónou do chodby. Vrt L4a-72L byl v prosinci 2023 zařazen do monitorovací sítě. V lednu 2024 byla dokumentována vlhká skvrna na stropě mimo průsaky z vrtů na křížení foliací, reaktivovaných foliací a zlomu SG11. Jedná se o kritický přítok z hlediska hydrogeologie.



Obr. 68 Zlom SG03 v chodbě L4a působící jako izolátor mezi průsaky d. b. 296HCR0031 a 296HCR0032

Obr. 69 Široká zvodnělá zóna v chodbě L4b, v popředí pás reaktivované foliace SG02 – součást průsaku d. b. 296HCR0041

Chodba L4b

V chodbě L4b bylo při primární dokumentaci zaznamenáno šest lokálních průsaků. Při závěrečné revizní dokumentaci v listopadu 2024 do sebe navzájem jednotlivé průsaky přecházely a tvořily slabě zvodnělou zónu zejména ve stropě a levé stěně v rozsahu od 3 do 34 m (Obr. 69).

Průsaky v okolí jedné z větví zlomu SG03 byly na metráži 3 až 4 m (d. b. 296HCR0042). Vlhkost byla v době primární dokumentace výraznější na stropě. Na pravé stěně byly průsaky vázané na foliační plochy. V průběhu roku 2024 se zvýšila intenzita úkapů na metráži 3 m, intenzivnější úkapy umožnily odběr vzorku pro dokumentační analýzu. Jedná se o kritický průsak z hlediska hydrogeologie.

Zlom SG03 zasahuje současně na levé stěně na metráži 11 m do průsaku d. b. 296HCR0041. Průsak je dále dotován na metráži 9 až 10 m ze zóny reaktivované foliace SG02 (Obr. 69) ve formě intenzivních kapek. Zvodnění je vázáno také na příčnou průběžnou puklinu. Jedná se o kritický průsak z hlediska hydrogeologie.

V červnu 2023 byly dokumentovány slabé průsaky na levé stěně na 13,5 až 16 m (d. b. 296HCR0040). Jedná se o pás reaktivované foliace v kombinaci s průběžnou puklinou. V lednu 2024 měl průsak

charakter vlhké levé stěny o šířce 3 m, částečně vybíhající do stropu. V listopadu 2024 byl charakter obdobný na metráži 15 až 17 m na levé stěně.

Na metráži 22 až 26 m se nachází porušená zóna SG04 částečně stabilizovaná pletivem (Obr. 70). Na tuto strukturu je vázán průsak d. b. 296HCR0044. V září 2023 byly v této části zaznamenány intenzivní kapky ve formě slabého rozptýleného deště. Zvodnění se projevovalo zejména na pravé stěně na metráži 22 m, vlhkost vybíhala podél zlomu šikmo chodbou do stropu do úseku na 25–26 m (pletivo). Při revizní dokumentaci v lednu 2024 byl stav a rozsah obdobný, intenzita "deště" byla vyšší. V listopadu 2024 se kapky koncentrovaly do části vystrojené pletivem a nejbližšího okolí. Jedná se o nejvydatnější přítok do chodby L4b a z hlediska hydrogeologie o kritickou strukturu.



Obr. 70 Průsak d. b. 296HCR0044 v okolí poruchy SG04

Na křížení puklin a foliací se při primární dokumentaci vyskytovala vlhkost v pravé stěně v šířce cca 1 m na metráži 27,5 m (d. b. 296HCR0045). Vlhkost slabě vybíhala do stropu. V průběhu roku 2024 byla vlhká pravá stěna a částečně strop v šířce cca 2 m (26,5 až 28,5 m).

Na metráži 32 m byla zaznamenána slabá vlhkost na stropě v okolí návrtu na svorník (d. b. 296HCR0046). V roce 2024 byl průsak ve formě mokrého pruhu na pravé stěně (31,5 m) vybíhajícího do stropu (šířka cca 2 m). Na levé stěně byla vlhká skvrna na metráži 34 m. Vlhkost se vyskytuje v okolí zlomu SG06, který se ve stropě větví. Vlhké skvrny v okolí zlomu byly při závěrečné dokumentaci (11/2024) slabé, nevýrazné.

Chodba L5

První průsaky byly při ražbě chodby L5 dokumentovány v červnu 2021 hned v úvodní části. Slabý průsak ve formě občasných kapek (296HCR0013) vázaný na foliační plochu se vyskytoval na metráži 0,5 m. V druhé polovině roku 2021 se tento průsak nacházel za výstrojí (stříkaný beton) a jeho další sledování nebylo možné.

Poměrně výrazný průsak ze zlomu a z foliačních ploch v jeho těsné blízkosti byl na metráži 5,5 m (d. b. 296HCR0014, Obr. 71), z tohoto průsaku byl v roce 2021 odebrán vzorek podzemní vody. Průsak je aktuálně za výstrojí, obdobně jako předchozí dokumentační bod. Zlom na metráži 5,5 m odvodnil horizontální vrt BGS12-H, tlak ve vrtu poklesl na nulu. Z hlediska hydrogeologie se jedná o kritickou strukturu.



Obr. 71 Zlom s průsakem 296HCR0014, chodba L5

Obr. 72 Pás zvodnění podél zlomu SG04 ve stropě chodby L5 (d. b. 296HCR0017)

Dále v chodbě L5 následuje prakticky souvislá, slabě zvodněná zóna na metráži 9 až 17,5 m. V centrální části této zóny probíhá zlom SG04, který od sebe odděluje dva primárně dokumentované průsaky d. b. 296HCR0017 a 296HCR0018. Zóna se projevuje v intervalu 9 až 12,5 m vlhnutím zejména levé stěny s vybíháním vlhkosti do stropu (d. b. 296HCR0018). V intervalu 12,5 až 17,5 m podél zlomu SG04 běží 3 až 4 m široký zvodnělý pruh napříč chodbou (d. b 296HCR0017, Obr. 72). Zvodnění je ukončeno na zlomu SG06 na 17,5 m a dále chodbou nepokračuje. Nejvyšší míra zvodnění horninového prostředí byla zaznamenána v pásu mezi strukturami SG04 a SG06. Intenzita občasných úkapů z foliačních ploch a z puklinové zóny se po ukončení prací v chodbě L5 zvýšila, což umožnilo opakované odběry vzorků pozemní vody. Jedná se o kritický přítok/strukturu.

Slabé průsaky byly v chodbě L5 dále zaznamenány na metráži 21,5 až 26 m (d. b 296HCR0016). V únoru 2022 byl tento průsak zcela suchý, v září 2022 se projevoval pouze jako vlhká skvrna v okolí svorníku. V únoru 2023 měl průsak charakter vlhkých nevýrazných skvrn v širším intervalu, v lednu 2024 byly dokumentovány nevýrazné vlhké skvrny ve stropě na foliačních plochách. V listopadu 2024 se jednalo o náznaky vlhkosti ve stropě na 26 m.

Drobný průsak (d. b. 296HCR0022) vázaný na okolí zlomu SG19 byl dále na metráži 68 m. Opět se jednalo o průsak s minimální vydatností, který se projevoval vlhnutím stěny chodby. V průběhu roku 2022 byl charakter průsaku obdobný. V průběhu roku 2023 a 2024 byla zaznamenána slabá vlhkost v okolí zlomu SG19.

Chodba L6

Na metráži 25 m byl v roce 2021 dokumentován slabý průsak (vlhnutí levé stěny a stropu, d. b. 296HCR0021) na foliačních plochách. Při revizi v únoru 2023 se nově objevila malá vlhká skvrna ve stropě na metráži 20,5 m. V roce 2024 byl tento průsak zcela suchý.

Při dokumentaci čeleb byl zaznamenán mírně vlhký výrub v metráži 32,5 až 37 m. Zvodnění bylo částečně způsobené průsakem z vrtu S-22. Chodba L6 překřížila vrt S-22 na metráži 32 m. Tlak

monitorovaný na ústí vrtu S-22 byl po dobu ražby poměrně stabilní (hodnota přibližně 9 bar při manuálním odečtu). Pokles tlaku o dva bary byl zaznamenán 1. 12. 2021, kdy byla čelba na metráži 31,2 m. Dne 6. 12. 2021 (čelba na metráži 32,5 m) byl tlak na ústí vrtu nulový – vrt se objevil v pravé stěně těsně před čelbou. Ke snížení tlaku, tedy k tlakové komunikaci s nově raženou chodbou, došlo až v okamžiku, kdy vzdálenost chodby a vrtu byla přibližně 1 m. To svědčí o velmi nízké hydraulické vodivosti puklin v prostoru mezi vrtem S-22 a chodbou L6.

Počátkem roku 2022 byl dokumentován slabý přetok (d. b. 296HCR0023) z předvrtu pro plánovanou komoru na metráži 39 m. V květnu 2022 byl již vrt bez přetoku. Vrt byl suchý také při všech následných revizích.

Dále byla na metráži 54 m zaznamenána vlhkost (d. b 296HCR0024) v okolí dovrchního návrtu pro svorník a na foliačních plochách v okolí. V únoru 2023 byla na tomto místě zaznamenána vlhká skvrna na pomezí levé stěny a stropu. V místě průsaku byla vyražena komora ZK6-2S a v závěru roku 2024 se průsak projevoval jako pruh o šířce 0,7 m na foliačních plochách vybíhající z chodby do komory (*Obr.* 73).

Souvislý zvodnělý pruh o šířce 4 až 6 m je v chodbě L5 na metráži 58 až 64 m na levé stěně. Pruh vybíhá do stropu a dále na metráž cca 59 až 61 m na pravé stěně. Zvodnění je zde vázáno na zlom SG19. Primárně byly v tomto intervalu dokumentovány dva průsaky. Prvním z nich byl d. b. 296HCR0025 na pomezí levé stěny a stropu na metráži 59 až 61,5 m (primární dokumentace únor 2022). Vzhledem k poměrně vysoké vydatnosti byl průsak d. b. 296HCR0025 zařazen do monitorovací sítě, osazen svodnou plachtou a od srpna 2022 zde probíhají pravidelné čtvrtletní odběry vzorků podzemních vod (viz následující kapitola; Obr. 74). Vydatnost tohoto průsaku se pohybovala v rozmezí od 0,15 do 0,8 ml·s⁻¹, vyšší hodnoty byly zaznamenány v druhé polovině roku 2022 a v první polovině roku 2023. Dále zde byl popsán průsak d. b. 296HCR0026 na metráži 64 až 66,5 m s vlhkostí zejména podél foliačních ploch na levé stěně. Plošný rozsah obou průsaků se postupně zvyšoval a počátkem roku 2024 již do sebe průsaky navzájem přecházely. Jedná se o kritický přítok/strukturu.



Obr. 73 Průsak 296HCR0024 na foliačních Obr. 74 Zachycení průsaku 296HCR0025, plochách, chodba L6 chodba L6

Chodba L7

V chodbě L7 byla zastižena slabě zvodnělá zóna v úseku 45 až 62 m. Celkem bylo v této zóně v roce 2021 dokumentováno 6 průsaků (d. b. 296HCR0001 až 296HCR0004, 296HCR0006, 296HCR0019). U těchto průsaků převládala velmi nízká vydatnost, dokumentované průsaky byly ve formě vlhkých stěn a stropu s občasným výskytem kapek. Zcela převažovaly průsaky z nebo v okolí foliačních ploch a na křížení foliace s menšími puklinami.

Průsaky se projevují převážně vlhkými skvrnami na stěnách, jejich pozice a rozsah se mění, často v návaznosti na technické práce v chodbě. Průsak d. b. 296HCR0001 (45 m) dočasně vyschnul (září 2022), v letech 2023 a 2024 měl charakter malé vlhké skvrny na pravé, respektive na levé stěně chodby.

Průsaky d. b. 296HCR0002, 296HCR0003, 296HCR0004, 296HCR0006 a 296HCR0019 do sebe při revizních dokumentacích navzájem přecházely. Zvodnění dokumentované těmito průsaky je v úseku 49 až 60 m vázané na širokou zónu snížení seismických rychlostí (poloha porušené alterované foliace SG24; Obr. 75), tuto zónu ve stropě protínají příčné pukliny. Na metráži 50 m byla v místě průsaku d. b. 296HCR0002 vyražena komora ZK7-2J. Při revizní dokumentaci v listopadu 2024 byla zvodnělá celá levá stěna a čelba této komory.

Zónu alterované foliace kříží na přibližně 56 m zlom SG19 (Obr. 76). V okolí zlomu byl dokumentován průsak d. b. 296HCR0006. Tento průsak byl od primární dokumentace nejvydatnější z výše uvedených. Poměrně intenzivní úkapy v blízkém okolí zlomu umožňovaly opakovaný odběr vzorků podzemní vody. Průsak byl zařazen mezi kritické z hlediska hydrogeologie.

V únoru 2023 byl zaznamenán slabý průsak z šikmého vrtu geotechnické stanice (L7-87UL) na metráži 87 m (d. b. 296HCR0034). V roce 2024 byly v této části chodby L7 zaznamenány také malé vlhké skvrny ve stropě v okolí dalších vrtů geotechnické stanice a na foliačních plochách v okolí.



Obr. 75 Průsaky v zóně porušené alterované foliace SG24Obr. 76 Zvodnění v okolí zlomu SG19 ve
stropě, d. b 296HCR0006, chodba L7

Chodba L8

Obdobně jako v chodbě L7, také v chodbě L8 se nachází širší slabě zvodnělá zóna, a to na metráži 56 až 71 m. Součástí této zóny jsou tři samostatně dokumentované průsaky (d. b. 296HCR0011, 296HCR0012 a 296HCR0015).

Z dokumentovaných průsaků v této zóně je nejvýraznější průsak 296HCR0011 (Obr. 77), který je vázaný na blízké okolí zlomu SG19 na metráži 56–57 m. Při primární dokumentaci (červen 2021) a následných revizích měl tento průsak charakter srovnatelný s ostatními – vlhkost, občasné úkapy. V říjnu 2021 byl průsak intenzivnější a více koncentrovaný v jedné části zlomu (rozhraní pravé stěny a stropu), což umožnilo terénní měření i odběr vzorku podzemní vody. Přítok byl zařazen do monitorovací sítě, osazen svodnou plachtou a od srpna 2022 zde probíhají pravidelné čtvrtletní odběry vzorků podzemních vod (viz následující kapitola). V současnosti se jedná o nejvydatnější soustředěný průsak v rámci PVP Bukov II s vydatností mezi 0,7 až 1,5 ml.s⁻¹. Charakter přítoku byl při revizích v roce 2024 obdobný. Jedná se o kritický průsak/strukturu.

Průsak 296HCR0012 zcela vyschl a jeho aktivita se již neobnovila.

Charakter průsaku d. b. 296HCR0015 na metráži 67 až 71 m zůstával obdobný ve formě vlhkých skvrn na obou stěnách chodby v okolí foliačních ploch běžících šikmo chodbou. Průsak je součástí široké zóny snížení seismických rychlostí (poloha porušené alterované foliace SG24) spolu s průsakem d. b. 296HCR0033. Foliace v místě průsaku protíná zlom SG30, v místě zlomu se projevuje slabá vlhkost na levé i pravé stěně.

Na metráži 76 m byl v únoru 2023 zaznamenán slabý průsak na rozhraní levé stěny a stropu vázaný na foliace a příčné pukliny (d. b. 296HCR0033, SG24). Stav průsaku zůstává stejný.

Drobný průsak (d. b. 296HCR0020; Obr. 78) vázaný na zlom SG34 se dále nachází na metráži 87,5 až 88 m. Jedná se o vlhký pruh na levé stěně vybíhající podél zlomu do stropu.



Obr. 77 Zlom SG19 s výrazným průsakem v chodbě L8 (d. b. 296HCR0011)

Obr. 78 Průsak d. b. 296HCR0020 vázaný na zlom SG34 v chodbě L8

V5-6

Ve větrací chodbě mezi chodbami L5 a L6 byl v průběhu ražby v květnu 2022 zaznamenán pouze jeden slabý průsak (d. b. 296HCR0029) a to na metráži 30 až 31,5 m v okolí zlomu SG23/2. Při následných revizích byl tento průsak zcela suchý nebo se projevoval pouze nevýraznou vlhkou skvrnou při patě levé stěny.

Dále byl v této chodbě zaznamenán slabý průsak z vrtu S-22 (d. b 296HCR0033) na metráži 20 m ve formě občasných kapek.

ZK7-2J

Vlhké skvrny na levé stěně, pravděpodobně průsaky po foliaci (d. b. 296HCR0043) byly dokumentovány ve zkušební komoře na prvním metru.

ZK6-2S

Vlhký pruh o šířce 0,5 m na levé stěně a stropu na foliačních plochách byl zaznamenán na metráži 8 m (d. b. 296HCR0043).



Obr. 79 Pozice hydrogeologických dokumentačních bodů ležících mimo prostor PVP Bukov II

Dokumentace okolí PVP Bukov II, chodba PŠ1-123 a BZ-XIIS

V rámci rekognoskačních prací byly dokumentovány chodby na 12. patře do vzdálenosti 150 m od chodeb L4a až L8 (PVP Bukov II). Naprostá většina revidovaných chodeb je suchá s výjimkou chodby PŠ1-123 v úseku 918 až 973 m, jedná se o úsek přibližně mezi nově raženými chodbami L4a a L6, tedy v okolí chodby L5. Zvodnění je v této části chodby výrazné, místy se projevuje velmi intenzivními úkapy. Bohužel prakticky celý tento úsek je vystrojený, vlastní zdroj průsaků není tedy možné identifikovat. Podzemní voda vykapává či vytéká z pod plechů (Obr. 81).

Zvodnělá poruchová zóna za výstrojí byla dokumentována jako dva úseky a to úsek 918,5 až 930 m (d. b. 296HCR0010) a 940 až 973 m (d. b. 296HCR009). Z druhého úseku byly odebrány celkem 3 vzorky vod.

Současně do úseku chodby PŠ1-123 mezi chodbami L4a a L6 ústí/ústilo několik vrtů s výtokem. Jedná se jak o předvrty chodeb PVP Bukov II, tak o starší vrty z geotechnické stanice projektu Získání dat z hlubokých horizontů dolu Rožná. Tyto vrty byly v závislosti na technickém stavu postupně zařazovány do hydrogeologické dokumentace. V roce 2021 se jednalo o vrty BGS12-H, BGS12-VU a BGS12-I (d. b. 296HCR0005; 296HCR0007; 296HCR0008, Obr. 80). Z těchto vrtů byly odebrány v rámci rekognoskace vzorky podzemních vod. U vrtů BGS12-H a BGS12-VU byla, pokud to instalace manometrů na ústí vrtu dovolovala, měřena vydatnost výtoku z vrtu. Ze všech uvedených vrtů byly odebrány vzorky podzemní vody v roce 2021, z vrtů BGS12-VU a BGS12-I byly odebrány opakovaně vzorky podzemní vody (celkem 4 vzorky z každého vrtu).

Vydatnost výtoku z vrtu BGS12-H byla v první polovině roku 2021 přibližně 0,013 l·s⁻¹, v červnu 2021 tímto vrtem prošla ražba chodby L5, čímž byl výtok z tohoto vrtu přerušen. Vydatnost vrtu BGS12-VU se při primárních dokumentacích pohybovala mezi 0,0023 a 0,0030 l·s⁻¹, vrt byl zařazen do monitorovací sítě a osazen měřícím zařízením (viz kapitola monitoring). Vydatnost vrtu BGS12-I byla v první polovině roku v rozmezí 0,0023 až 0,0033 l·s⁻¹. Vrt byl posléze uzavřen pakrem.

V dubnu roku 2022 byly po dohodě se SÚRAO otevřeny vrty S-24 a S-33. Tyto vrty byly zařazeny do dokumentace (d. b. 296HCR0030, 296HCR0027), byla měřena vydatnost výtoku a opakovaně odebrány vzorky podzemní vody. Vydatnost výtoku z vrtu S-33 byla až do otevření vrtu pro karotážní měření a následné ražby chodby L4a cca 0,01 I·s⁻¹. Jednalo se o nejvydatnější přítok podzemní vody v bezprostředním okolí PVP Bukov II. V průběhu ražby chodby L4a vydatnost postupně klesala (viz kapitola 2.4.3). V roce 2023 byla v místě vrtu S-33 ražena chodba L4b.

Vrt S-24 byl po svém otevření zcela suchý, bez přetoku, v polovině května 2022 z vrtu začala přetékat voda. Vydatnost tohoto výtoku byla cca 0,0034 l·s⁻¹. V druhé polovině září 2022 byla v místě ústí zahájena ražba chodby L4a.



Obr. 80 Odběr vzorku z vrtu BGS12-I (d. b. 296HCR0008)

Obr. 81 Odběr vzorku z široké silně zvodněné zóny v chodbě PŠ1-123 (d. b. 296HCR0009)

Odběry vzorků, chemické složení podzemních vod

Vzorky pro základní dokumentační analýzy (ZDA, dle projektu prací Bukovská et al. 2021) byly odebírány v letech 2021 až 2024 při rekognoskační dokumentaci na hlavní chodbě PŠ1-123 a dále s postupující ražbou PVP Bukov II z průsaků na chodbách L4a až L8. Z průsaků/přítoků, jejichž vydatnost to umožňovala, byly dále odebrány vzorky pro stanovení obsahů stopových prvků (P, Mn, Li; As, Ba, Cu, Cr, Ni, Pb, Zn, Al, Mn, Sr, Mo), radioaktivity vod (U, Ra, Rn, celková aktivita β) a celkového obsahu organického uhlíku (TOC). Kontrolně byl také odebrán vzorek technické vody v chodbě L6. Celkem bylo v rámci dokumentace odebráno 44 vzorků podzemních vod pro tyto analýzy. Do tohoto počtu jsou u monitorovaných přítoků (296HCR0007, 296HCR0011, 296HCR0025, 296HCR0030) zahrnuty vzorky odebrané pracovníky ČGS do května 2022. Od září 2022 pravidelné odběry z těchto bodů zajištují pracovníci SG Geotechnika a.s. v rámci monitorovacích prací. Přítok 296HCR0038 byl do monitoringu zahrnutý později, také u něj jsou níže popisovány pouze odebrané dokumentační vzorky. Další vzorky byly odebrány pro stanovení izotopů (viz dále). Výsledky monitorovacích prací shrnuje kapitola 2.4.3.

Popis vzorkovaných hydrogeologických dokumentačních bodů je uveden v předchozí kapitole. Řada vzorků u slabých průsaků byla odebrána v delším časovém intervalu po instalaci provizorních záchytných zařízení. Na kvalitu stanovení neměl delší časový interval odběru významný vliv, tyto vzorky se zásadním způsobem neodlišují od ostatních.



Obr. 82 Durovův diagram chemického složení podzemních vod v prostoru PVP Bukov II a v jeho bezprostředním okolí

Výsledky chemických analýz shrnuje tabulka Elektronická příloha 7. Vzhledem k velkému množství odebraných vzorků je grafické vyjádření rozděleno do dvou částí. Na Obr. 82 jsou znázorněny výsledky analýz prvních odebraných vzorků ze vzorkovaných přítoků/průsaků. V legendě jsou průsaky rozčleněny podle své pozice v PVP Bukov II. Diagram na Obr. 83 znázorňuje průsaky, které nebyly zahrnuty do monitoringu a v rámci dokumentací byly odebírány opakovaně.

Podzemní vody v prostoru PVP Bukov II jsou typu Na-HCO₃ až Na-SO₄, převládají smíšené typy vod (Na-HCO₃-SO₄, Na-SO₄-HCO₃). Mezi kationty jednoznačně u všech odebraných vzorků převažuje sodík s více než 85 meq%. Značky jednotlivých odběrů se v poli kationtů na Durovově diagramu navzájem překrývají. Pouze podzemní voda jímaná z poruchy (296HCR0009) v chodbě PŠ1-123 má mírně snížený podíl sodíku mezi kationty ve srovnání s ostatními průsaky/přítoky. Voda odebíraná z tohoto přítoku protéká přes výstroj (viz výše), nelze tedy vyloučit slabou změnu složení podzemní vody v průběhu jejího toku po výstroji chodby.

V zastoupení aniontů jsou rozdíly vyšší, poměrné zastoupení chloridů je u všech vzorků mezi 10 a 20 meq%, u hydrogenuhličitanů je zastoupení 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 (296HCR0039) mimo prostor PVP Bukov II a vzorek odebraný čerpáním z vrtu L8-54DL (L8, 296HCR0050) s výraznou převahou hydrogenuhličitanů mezi anionty 81 meq%. Vzorky s převahou hydrogenuhličitanů byly odebrány také v prostoru chodby L8 a na konci chodby L4a z vrtu geotechnické stanice (296HCR0038).

Celkový obsah rozpuštěných látek (TDS) je v rozmezí od 200 do 370 mg.l⁻¹. Nižší hodnoty do 280 mg.l⁻¹ mají průsaky v chodbách L7 a L8, výtok z vrtu BGS12-H (296HCR0005) a S-24 (296HCR0030), průsak 296HCR0025 v chodbě L6 a výtoky z vrtů S-26 a geotechnické stanice v chodbě L4a. Jedná se současně o průsaky/výtoky s vyšším podílem hydrogenuhličitanů, je tedy možné předpokládat, že tyto podzemní vody jsou nejméně ovlivněny prostředím dolu. Podzemní vody mají zásaditý charakter, pH je v rozmezí 8,4 až 9,3. Obsahy SiO₂ se u vzorkovaných bodů pohybovaly v rozmezí od 11 do 17 mg.



Obr. 83 Durovův diagram chemického složení podzemních vod v prostoru PVP Bukov II – vývoj chemického složení u opakovaně vzorkovaných přítoků

Kontrolně byl na chodbě L6 odebrán vzorek technické vody (TVL6) používané při vrtání předvrtů a dalších vrtů v PVP Bukov II. Odběr vzorku technické vody není znázorněn v diagramu na Obr. 82. Vzhledem k velmi odlišnému chemickému složení (vysoká hodnota TDS) by se při jeho zobrazení zhoršila čitelnost diagramu. Odebraná technická vody je typu Ca-Mg-SO₄, s celkovým obsahem rozpuštěných látek 1260 mg.I⁻¹ a pH 8,03. Svým chemickým složením se technická voda velmi odlišuje od podzemních vod prosakujících do prostoru PVP Bukov II. Má přibližně čtyřikrát větší hodnotu TDS, poměrné zastoupení sodíku je zde 10 meq% (90 meq% Na u většiny průsaků do PVP Bukov II) a mezi anionty zcela převládají sírany.

V diagramu na Obr. 83 jsou znázorněny opakované odběry podzemní vody z bodů nezahrnutých do následného monitoringu. Opakované vzorkování se podařilo zrealizovat u celkem osmi průsaků/přítoků. Z diagramu je patrné, že poměrné zastoupení hlavních iontů ve vzorkovaných vodách se v průběhu výstavby PVP Bukov II příliš nezměnilo. Značky jednotlivých odběrů se v poli aniontů a kationtů prakticky překrývají. Menší změny byly zaznamenány v hodnotách pH a u celkového obsahu rozpuštěných látek. 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 mírně 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. Později odebrané podzemní vody mají současně nižší hodnoty pH, i zde je změna malá do 0,4.

Stopové prvky, radioaktivita, organický uhlík

U průsaků/přítoků s vydatností, která umožňovala odběr dostatečného množství vzorku pro laboratorní analýzy nad rámec ZDA, byly odebrány vzorky na stanovení stopových prvků, radioaktivity a celkového organického uhlíku (TOC). V průběhu projektu došlo ke změně laboratoře analyzující vzorky. Laboratoř firmy Aquatest, která ukončila svou činnost, byla od května 2023 nahrazena laboratoří ALS Czech Republic. Limity stanovení laboratoří se u několika prvků liší. Výsledky stanovení jsou v přehledné tabulce Elektronická příloha 6. Do přílohy byly zahrnuty odběry provedené mimo monitoring.

Obsahy **lithia** byly u všech odebraných průsaků v poměrně malém rozptylu do 2 do 8,5 μg.l⁻¹. U technické vody (TVL6) se jednalo o hodnotu 23,6 μg.l⁻¹,

Obsahy **manganu** byly v rozmezí od 0,6 do 5,2 μ g.l⁻¹, se střední hodnotou 2 μ g.l⁻¹. vyšší hodnoty byly zaznamenány pouze u odběru z přítoku 296HCR0011 v prosinci 2022 (20,4 μ g.l⁻¹) a u TVL6 (32,1 μ g.l⁻¹).

Obsahy celkového **železa** byly s výjimkou dvou výše uvedených odběrů v rozmezí od 54 do 292 μg.l⁻¹. Řádově vyšší obsahy byly zjištěny u odběru z přítoku 296HCR0011 v prosinci 2022 (1320 μg.l⁻¹) a u TVL6 (1340 μg.l⁻¹). Medián nadlimitních obsahů Fe je 55 μg.l⁻¹. celkem u čtyř vzorků byl obsah Fe pod 10 μg.l⁻¹.

Obsahy **arzenu** byly u většiny vzorků do 10 μ g.l⁻¹, s vyššími obsahy u přítoků 296HCR0011 (16,2 μ g.l⁻¹) a 296HCR0025 (32,1 μ g.l⁻¹).

Obsahy **barya** byly u 11 odebraných vzorků pod limit stanovení (0,5 μg.l⁻¹). U většiny ostatních přítoků se hodnoty pohybovaly do 10 μg.l⁻¹. Poměrně vysoké hodnoty barya byly opakovaně zjištěny u 296HCR0007 (výtok z vrtu BGS12-VU) a to v rozmezí 55 až 65 μg.l⁻¹ a zvýšené hodnoty Ba okolo 20 μg.l⁻¹ byly zjištěny také u 296HCR0008 (vrt BGS12-I), 296HCR0009 a TVL6.

Obsahy **hliniku** se pohybují v širokém rozmezí od 25 do 830 μg.l⁻¹, hodnoty nad 100 μg.l⁻¹ se vyskytly jen u 2 přítoků (296HCR0011 a 296HCR0025). Medián obsahů hliníku je 25 μg.l⁻¹.

Obsahy **chromu** byly u převážné většiny vzorků pod limit laboratoře (0,5, respektive 1 μ g.l⁻¹). Obsahy nad 1 μ g.l⁻¹ byly zaznamenány pouze u 296HCR0011 (4,7 μ g.l⁻¹) a 296HCR0027 (1,9 μ g.l⁻¹).

U **olova** zcela převládaly podlimitní obsahy (méně než 0,5, respektive 5 μg.l⁻¹). Nejvyšší hodnota 5,6 μg.l⁻¹ byly zjištěna u 296HCR0049 (vrt S-25 mimo PVP Bukov II).

Také obsahy **mědi** byly převážně podlimitní (pod 0,5, respektive 1 μg.l⁻¹) s maximem 3,4 μg.l⁻¹ u 296HCR0049.

Obsahy **molybdenu** byly u všech vzorků v úzkém rozmezí od 1,1 do 2,7 μg.l⁻¹. U TVL6 byla změřena hodnota 16 μg.l⁻¹.

U **niklu** zcela převládaly podlimitní obsahy (méně než 0,5, respektive 2 µg.l⁻¹). Vyšší obsah Ni byl zjištěn pouze u 296HCR0049 a to 47,4 µg.l⁻¹.

Hodnoty obsahů **stroncia** ve vodách jsou u většiny průsaků od 23 do 75 µg.l⁻¹, vyšší hodnoty stroncia byly obdobně jako u barya opakovaně zjištěny u 296HCR0007 (výtok z vrtu BGS12-VU) a to v rozmezí 133 do 160 µg.l⁻¹ u 296HCR0008 (102 µg.l⁻¹) a 296HCR0009 (193 µg.l⁻¹).

Také u **zinku** převažovaly podlimitní obsahy (pod 5 μg.l⁻¹) nebo obsahy těsně nad limitem do 7,2 μg.l⁻¹ s výjimkou 296HCR0049, kde byl stanoven obsah zinku ve vodě 266 μg.l⁻¹.

Obsahy **uranu** byly téměř u všech vzorků podlimitní (pod 1, respektive 2 μg.l⁻¹) nebo na hranici limitu použitého stanovení s výjimkou odběru mezi pakry 296HCR0027 (vrt S-33, odběr Posiva) a TVL6, kde byl změřen velmi vysoký obsah uranu, a to 918 μg.l⁻¹.

Obdobně při stanoveních **celkové objemové aktivity** β a aktivity **radia** byly všechny hodnoty až na výjimky pod limitem stanovení příslušné laboratoře. Změřené hodnoty byly nízké 0,1 (limit metody) až 0,5 Bq.l⁻¹ u aktivity β a 0,05 (limit metody) až 0,11 Bq.l⁻¹ u aktivity radia.

Aktivita radonu byla sledována jen u přítoků (výtoků z vrtů), které svou vydatností umožňovaly relativně rychlý odběr vzorku (omezení úniku radonu z vody). Hodnoty se pohybují v rozmezí od 20 do 50 Bq.l⁻¹.

Uvedené výsledky ukazují, že radioaktivita podzemních vod v prostoru PVP Bukov II je nízká. Naopak v technické vodě byl zjištěn vysoký obsah uranu. Mohlo se jednat o dočasný jev. Pravidelné sledování kvality technické vody nebylo součástí projektu.

Také obsahy dalších stopových prvků jsou převážně nízké. Z jednotlivých odběrů se pozaďovým hodnotám vymyká vzorek z přítoku 296HCR0011 odebraný v prosinci 2022 a to vysokými obsahy železa, hliníku a chromu a měřitelnými obsahy zinku, niklu a aktivitami β a radia.

Vyšší hodnoty barya a stroncia byly zaznamenány, i u opakovaných odběrů výtoků z vrtů projektu Získání dat z hlubokých horizontů dolu Rožná ústících na hlavní chodbě PŠ1-123. Jedná se o 296HCR0007 (výtok z vrtu BGS12-VU) a 296HCR0008 (vrt BGS12-I). Zvýšené hodnoty těchto prvků byly zjištěny také z průsaku 296HCR0009 na hlavní chodbě.

2.4.2 Studium původu a stáří vod

Za účelem studia původu a stáří vod byly v lednu, červnu a srpnu 2024 odebrány vzorky podzemní vody dohromady ze 4 objektů situovaných v hlavní chodbě PŠ1-123, v chodbě L4a a v chodbě spojující PVP Bukov I a PVP Bukov II. Jsou jimi vrt 296HCR0007 (BGS-12VD; dovrchní vrt na staničení 928,8 m chodby PŠ1-123), vrt 296HCR0038 (L4a-72L; 15 m dlouhý vrt v geotechnické stanici), vrt 296HCR0049 (S-25; 166,5 m dlouhý horizontální vrt na staničení 2047,3 m chodby PŠ-123) a vrt 296HCR0050 (L8-54DL; 30,3 m dlouhý úpadní vrt pod úhlem 45° na staničení 54 m chodby L8). Vrt 296HCR0050 byl cca 2 měsíce před vzorkováním sčerpán, aby do něj byl podpořen přítok vody z horninového prostředí. V předchozích etapách vzorkované vrty 296HCR0027 a 296HCR0030 v současnosti již neexistují, jednalo se o předvrty pro již vyražené chodby. Pro zjištění zdroje antropogenního ovlivnění byl odebrán vzorek technické vody (TVL6), používané pro výplach při vrtání a čištění vrtů, a při dalších technických pracích.

Z objektů 296HCR0007, 296HCR0038, 296HCR0049 a 296HCR0050 byly odebrány vzorky podzemní vody na analýzu izotopických poměrů stabilních izotopů kyslíku (δ^{18} O), vodíku (δ^{2} H), uhlíku (δ^{13} C) a síry (δ^{34} S). Pro tyto analýzy byl odebrán i vzorek TVL6 z rozvodů technické vody. Vzorky byly pro analýzu zadány do laboratoří ČGS Praha. Analýzy stabilních izotopů kyslíku a vodíku byly provedeny na přístroji LWIA (Liquid Water Isotope Analyser 3000, LGR Inc.). Analýzy stabilních izotopů uhlíku (δ^{13} C a δ^{34} S) byly měřeny na spektometrech Delta V Advantage a Finnigan Mat 251.

U analýzy δ^{13} C vzorku z objektu 296HCR0007 byla zjištěna nekonzistence v porovnání s doprovodnou analýzou δ^{13} C pro stanovení stáří metodou AMS (viz níže). Pravděpodobně došlo k ovlivnění odebraného vzorku. Z analýz δ^{34} S z roku 2022, 2023 a 2024 u objektů 296HCR0007, 296HCR0027, 296HCR0038 a 296HCR0049 ukazuje různé trendy. Zatímco hodnota δ^{34} S u objektů 296HCR0007, 296HCR0027 a 296HCR0038 různou měrou vzrostla, u objektu 296HCR0049 naopak poklesla. Pravděpodobně se jedná o důsledek redoxních procesů (s vlivem mikrobiálního osídlení) v těchto vrtech. Výsledky analýz jsou uvedeny v Tab. 11. Tab. 11 Výsledky stanovení poměrů stabilních izotopů vodíku (δ^{2} H), kyslíku (δ^{18} O), uhlíku (δ^{13} C) a síry (δ^{34} S), včetně měření z roku 2022 a 2023 (kurzivou). VSMOW = Vienna Standard Mean Ocean Water, V-PDB = standard Vienna Peedee Belemnite, CDT = standard troititu meteoritu Cañon Diablo; *nekonzistentní analýza, zřejmě došlo k ovlivnění vzorku

	δ²Η	δ ¹⁸ Ο (‰	Deuterium	δ ¹³ C ‰ vs. V-	δ ³⁴ S (‰ vs CDT)
	(‰VSMOW)	VSMOW)	excess	PDB ±0,2	±0,15‰
296HCR0007 (24. 8 .2022)	-75,3	-10,6	9,7	-7,1*	-3,1
296HCR0027 (24. 8. 2022)	-75	-10,7	10,3	-16	-2,1
296HCR0030 (24. 8. 2022)	-77,7	-11	10,6	-14,1	-1,8
296HCR0007 (11. 5. 2023)	-75	-10,6	10,2	-16,7	-0,2
296HCR0027 (4. 5. 2023)	-75,5	-10,8	10,9	-16,6	-0,9
296HCR0038 (13. 6. 2023)	-77,8	-11,1	11,2	-13,9	-0,9
296HCR0039 (12. 6. 2023)	-77,5	-11,1	11,4	-16,5	2,6
296HCR0007 (24. 1. 2024)	-74,9	-10,5	8,8	-15,1	-1,2
296HCR0038 (24. 1. 2024)	-77,6	-11,1	11,5	-13,8	-0,5
296HCR0049 (24. 1. 2024)	-78,5	-10,8	8,1	-15,3	0,9
TVL6 (24.1.2024)	-67,3	-9,5	8,3	-7,6	-3,8
296HCR0007 (26.6.2024)	-75,5	-10,4	8	-16,4	-0,6
296HCR0038 (26.6.2024)	-77,8	-11,2	11,7	-13,5	-0,4
296HCR0049 (26.6.2024)	-78,5	-11,1	10,5	-15,4	-0,4
296HCR0050 (12.8.2024)	-79	-11,2	10,5	-13,2	-1,5

Z objektů 296HCR0049 a 296HCR0050 a z rozvodů technické vody (TVL6) byly v roce 2024 rovněž odebrány vzorky vody na analýzu obsahů tritia (³H) a radiouhlíku (¹⁴C). Vzorky pro analýzu tritia byly po nabohacení analyzovány na kapalinovém scintilačním spektrometru na Přírodovědecké fakultě UK v Praze. Vzorky pro analýzu radiouhlíku byly zpracovány v Poznaňské radiokarbonové laboratoři (Polsko) metodou AMS hmotnostní spektrometrie. Výsledky datování ¹⁴C a analýz tritia jsou uvedeny v Tab. 12. Předběžné výsledky ukazují přibližně negativní korelaci mezi modelovým stářím radiouhlíku ¹⁴C a obsahem tritia (Obr. 84), což naznačuje míchání velmi starých vod (> 10 000 let) a mladších vod z prostředí dolu, které byly smíseny se srážkovými vodami infiltrovanými po roce 1950. Vzorek technické vody je směsí důlních vod z různých důlních pater a pravděpodobně také srážkových vod. V rámci sedmi vrtů, které se nachází nedaleko od sebe, je zjevná vysoká variabilita v míře antropogenního ovlivnění důlními vodami.

Tab. 12 Výsledky datování ¹⁴C a analýz tritia (³H) včetně měření z roku 2022 (kurzivou). TU = Tritium Unit = 1 atom ³H na 10¹⁸ atomů vodíku. *hodnota δ^{13} C se liší od hodnoty změřené v laboratořích ČGS, pravděpodobně došlo k ovlivnění odebraného vzorku zaslaného do laboratoře ČGS, **dohotovená analýza z minulé etapy prací

	Stáří ¹⁴C (rok)	δ ¹³ C (‰)	TU
296HCR0007 (24. 8. 2022)	5310 ± 40	-17,5 ± 0,2*	2,6 ± 0,5
296HCR0027 (24. 8. 2022)	6520 ± 40	-17,2 ± 0,2	2,3 ± 0,5
296HCR0030 (24. 8. 2022)	10280 ± 60	-14.9 ± 0,2	1 ± 0,5
296HCR0038 (13. 6. 2023)	12480 ± 70	-15,2 ± 0,2	2,7 ± 0,5**
296HCR0039 (12. 6. 2023)	19340 ± 130	-16,7 ± 0,2	$0,4 \pm 0,3$
296HCR0049 (24. 1. 2024)	20760 ± 130	-15,5 ± 0,1	1,9 ± 0,5
TVL6 (24. 1. 2024)	3080 ± 30	-8,2 ± 0,2	6,1 ± 0,8
296HCR0050 (12. 8. 2024)	20870 ± 130	-13,5 ± 0,2	1,9 ± 0,5



Obr. 84 Negativní korelace mezi stářím (¹⁴C) a obsahem tritia (³H). TU = Tritium Unit = 1 atom ³H na 10¹⁸ atomů vodíku

V roce 2024 nebyly odebrány nové vzorky podzemní vody pro analýzu freonů CFC-11, CFC-12, CFC-113 a SF₆.

Nejstarší vzorkované vody o stáří kolem 20 tisíc let (podle ¹⁴C) byly zachyceny ve vrtech 296HCR0039, 296HCR0049 a 296HCR0050. U vody z vrtu 296HCR0039 (vrt S-26) nebyla zjištěna kontaminace freony a SF₆ a obsah tritia (³H) je na hranici detekce. Vrt S-26 se nachází mimo PVP Bukov II na chodbě spojující PVP Bukov I a PVP Bukov II. Jedná se o vrt s velkou vydatností a tato voda z hlediska analýz nejeví známky kontaminace. Vrty 296HCR0049 (vrt S-25) a 296HCR0050 (vrt L8-54DL) ukazují poněkud zvýšený obsah tritia (³H). Důkladnější interpretace výsledků datování a původu vod budou provedeny v závěrečné zprávě z projektu.

2.4.3 Hydrogeologický monitoring

V rámci hydrogeologického mapování byly vybrány celkem čtyři přítoky, které byly doporučeny ke sledování. Jedná se o přítoky z poruchových zón v chodbách L6 ve staničení 60 m (296HCR0025) a L8 ve staničení 57 m (296HCR0011) a přítoky z vrtů BGS12-VU (296HCR0007) a S-33 (296HCR0027). Hydrogeologický monitoring v prostoru PVP Bukov II byl zahájen v první polovině roku 2022 měřením přítoků z poruchových zón v chodbách L6 a L8. První odběry vzorků z těchto přítoků byly realizovány 5. 9. 2022 společně pracovníky SGG a ČGS, a tak navázaly na pravidelné vzorkování realizované v rámci hydrogeologického mapování PVP Bukov ČGS. Z důvodu ražby chodby L4b byl v květnu 2023 vrt S-33 zrušen a tím bod 296HCR0027 zanikl. V listopadu 2023 byl naopak do monitoringu přidán vrt L4a-72L (296HCR0038).

2.4.3.1 Monitoring přítoků

V roce 2024 byl monitoring realizován na čtyřech výše zmíněných přítocích. Přítoky z poruchových zón byly z důvodu technických prací spojených s ražbou opakovaně osazeny lapači, které soustřeďují úkapy z poruchových zón do jednoho místa a umožňují tak měření a odběr vzorků (Obr. 85). Měření průtoku bylo realizováno pomocí stopek a odměrné nádoby třídy přesnosti A. Vrt BGS12-VU, který je v blízkosti elektrické sítě, byl z důvodu kontinuálního měření osazen průtokoměrem GHM-Honsberg Omni-Fin s datalogerrem Comet System S7021 (Obr. 86).

Výsledky měření jsou zachyceny v následujících grafech (Obr. 87, Obr. 88, Obr. 89, Obr. 90). Z grafů je patrné, že v L6 se přítok pohyboval mezi 0,1 a 1,2 ml.s⁻¹, v L8 mezi 0,1 a 1,6 ml.s⁻¹, v L4a-72L mezi 3,3 a 5,2 ml.s⁻¹ a v BGS12-VU mezi 0,8 a 3,9 ml.s⁻¹. Ve vrtu BGS12-VU byl mezi 16. 5. 2023 a 26. 9. 2023 z důvodu ražby L4b průtokoměr demontován a průtok byl měřen manuálně. Rozkyv hodnoty průtoku ve vrtu BGS12-VU je způsoben vzduchem přítomným ve vodě, který v hadicích uvolňuje bubliny.

Ve vrtu BGS12-VU je patrný vliv ražby chodeb důlního díla, který se projevoval poklesem průtoku vrtu.





Obr. 86 Průtokoměr GHM-Honsberg Omni-Fin

Obr. 85 Lapač vody v chodbě L6 staničení 60 m



Obr. 87 Průtok v L6 60 m (296HCR0025)



Obr. 88 Průtok v L8 57 m (296HCR0011)



Obr. 89 Průtok v L4a-72L (296HCR0038)



Obr. 90 Průtok v BGS12-VU (296HCR0007)

2.4.3.2 Laboratorní analýzy vod

Odběry vod byly realizovány pravidelně po čtvrt roce. Během odběrů byly měřeny fyzikálně-chemické vlastností vod pomocí digitálních multimetrů WTW 340i a HQ-40d Hach-Lange. Do dubna 2023 byly analýzy prováděny v akreditované laboratoři Aquatest, poté v akreditované laboratoři ALS Czech Republic, s. r. o. V rámci monitoringu probíhala komplexní chemická analýza, která se skládá ze základní dokumentační analýzy, stanovení stopových prvků a forem uhlíku. Stanovení radioaktivních látek probíhalo jednou ročně. Výsledky stanovení hlavních iontů a fyzikálně-chemických vlastností jsou shrnuty v následujících grafech (Obr. 91, Obr. 92, Obr. 93, Obr. 94, Obr. 95, Obr. 96, Obr. 97, Obr. 98, Obr. 99, Obr. 100, Obr. 101, Obr. 102, Obr. 103, Obr. 104, Obr. 105, Obr. 106). Z grafů je patrné, že všechny čtyři monitorované přítoky mají podobné vlastnosti a trend vývoje parametrů v čase. Výjimku tvoří čtyřnásobný obsah fluoridů ve vrtu L4a-72L (296HCR0038). Nejmarkantnější je průběžný pokles pH a nárůst hydrogenuhličitanů. Odběr v chodbě L6 7. 12. 2023 nebyl realizován z důvodů hornických prací na místě. Výsledky stopových prvků, Fe²⁺ a radioaktivních látek jsou uvedeny v protokolech laboratorních zkoušek, které jsou obsahem samostatné přílohy (Elektronická příloha 8).

Chemické složení odebraných vzorků vod a jeho vývoj v čase je obsahem Elektronická příloha 9.



Obr. 91 Obsah sodíku ve vodách PVP Bukov II



Obr. 92 Obsah draslíku ve vodách PVP Bukov II



Obr. 93 Obsah hořčíku ve vodách PVP Bukov II



Obr. 94 Obsah vápníku ve vodách PVP Bukov II



Obr. 95 Obsah železa ve vodách PVP Bukov II



Obr. 96 Obsah manganu ve vodách PVP Bukov II



Obr. 97 Obsah lithia ve vodách PVP Bukov II



Obr. 98 Obsah chloridů ve vodách PVP Bukov II



Obr. 99 Obsah fluoridů ve vodách PVP Bukov II



Obr. 100 Obsah hydrogenuhličitanů ve vodách PVP Bukov II



Obr. 101 Obsah síranů ve vodách PVP Bukov II



Obr. 102 Obsah oxidu křemičitého ve vodách PVP Bukov II



Obr. 103 Vodíkový exponent vod PVP Bukov II



Obr. 104 Elektrická vodivost vod PVP Bukov II



Obr. 105 Chemická spotřeba kyslíku vod PVP Bukov II



Obr. 106 Celkový organický uhlík ve vodách PVP Bukov II

2.5 Transportní vlastnosti

Transportní charakteristiky určují zádržné vlastnosti horninového prostředí, které hrají důležitou roli pro vlastní bezpečnost HÚ a je potřeba jim věnovat pozornost. Z pohledu geologie lze konstatovat, že v puklinovém horninovém prostředí se jako nejdůležitější jeví správná identifikace zvodnělých puklin včetně určení poměru zvodnělých a nezvodnělých puklin. K tomu mimo jiné přistupuje i studium sorpčních a difúzních vlastností jednotlivých hornin, a právě prostředí PVP Bukov velmi dobře umožňuje tyto vlastnosti hornin zkoumat. V rámci této charakterizační etapy byly studovány transportní vlastnosti vybraných horninových typu z části pracoviště PVP Bukov II. Na základě požadavku byly pro transportní parametry vybrány vzorky ze dvou rozdílných litologií: amfibolitu a migmatitu (biotitický migmatit) z chodby L5.

Práce provedené ÚJV, a.s. byly zaměřeny na srovnání transportních charakteristik hornin vybraných vzorků amfibolitu a migmatitů zaměřené především na difúzní experimenty pro stanovení difúzního efektivního koeficientu D_e (³H, ³⁶Cl) a stanovení rozdělovacího (sorpčního) distribučního koeficientu K_d pro cesium (¹³⁷Cs) a stroncium (⁸⁶Sr) pomocí sorpčních experimentů. Na vybraných vzorcích migmatitu a amfibolitu byl tak doplněn soubor dat z předchozích projektů Komplexní charakterizace PVP Bukov (Bukovská et al. 2017) a Získání dat z hlubokých horizontů dolu Rožná (Bukovská et al. 2020).

2.5.1 Příprava horninových vzorků

Pro studium sorpčních a difúzních parametrů horninového prostředí byly vybrány vzorky z velkoobjemových vrtů dodané řešiteli projektu SG Geotechnika a ÚGN na základě zadání ČGS. Pro úvodní testování byly připraveny vzorky z dodaných velkoobjemových vzorků ze zkušebních komor L4 a L5 a to vzorky L5_62L, L5_32P a L4a_47R. Na základě charakterizace dodaných vzorků byly následně transportní experimenty prováděny na vzorcích z chodby L5 (L5_62L, L5_32P). Pro difuzní experimenty bylo provedeno formátování vzorků jak v paralelním, tak kolmém směru k foliaci.

S ohledem na návaznost prací byly pro sorpční experimenty a difuzní experimenty použity vzorky v těsné blízkosti vzorků pro stanovení FMV hornin odebraných z vrtných jader. Pro sorpční experimenty byly využity vzorky vybrané litologie z horninového jádra (min. 1 kg) z těsné blízkosti odebraných vzorků pro difuzní experimenty. Vzorky byly nadrceny na čelisťovém drtiči BB 200 (Retsch) a následně vytvořen vzorek pomocí kvartace. Sítování bylo následně provedeno na analytickém sítovacím stroji AS 300 (Retsch), kdy bylo u některých frakcí nutné přemletí vzorku na požadované množství dané frakce. Mletí vzorku bylo prováděno na planetárním kulovém mlýnu PM 200 (Retsch). Pro možné srovnání s předešlými výsledky (Bukovská et al. 2017, Havlová et al. 2018, Bukovská et al. 2020) byly pro sorpční experimenty použity frakce C (0,63–0,125 mm) a D (0,8–0,63 mm).

Z dodaných vzorků horninových jader o délce cca 80–100 mm a průměru kolem 48 mm, byly naformátovány vzorky pro difuzní experimenty pomocí diamantové pily Cutlam 1.1. Pro chlazení byla použita voda SGW2. Z každého vzorku byly připraveny tři disky o tloušťce 10 mm, a to pro vzorky s paralelním usměrněním, i kolmo k usměrnění foliace. Po naformátování byly vzorky zaevidovány, provedena fotodokumentace a provedeno měření pórovitosti a hustoty (Tab. 17). Vybrané vzorky byly následně použity pro difuzní průnikové experimenty.

2.5.2 Charakterizace horninových vzorků

2.5.2.1 Mineralogické složení

Vzorky horniny byly homogenizovány v mlýnku McCroneMill (7 min, třetí stupeň mletí) a následně analyzovány rtg difrakcí na práškovém rtg difraktometru Bruker D8 Advance v Bragg-Brentanově uspořádání na pracovišti ČGS (F. Laufek).

Bylo použito CuKα záření a 10 mm automatické divergenční clony (ADS). Difrakční data byla detekována pomocí pozičně citlivého detektoru Lynx Eye XE. Práškový vzorek byl připraven metodou tzv. bočního plnění. Difrakční záznam byl pořízen v úhlovém rozsahu 4–80° 2Θ s krokem 0,015° a načítacím časem 1 s na krok.

Získané rtg difrakční záznamy byly kvalitativně vyhodnoceny v programu Difrac.Eva (Bruker AXS 2015) za pomoci databáze ICDD PDF-2 (ICDD 2018). Následná semikvantitativní fázová analýza byla provedena pomocí Rietveldovy metody (Bish a Post 1989) v programu Topas 5 (Bruker AXS 2014). Modely krystalových struktur jednotlivých fází byly získány z databáze ICSD (FIZ 2023). Během Rietveldovy analýzy byly upřesňovány škálové faktory jednotlivých fází, jejich mřížkové parametry a velikost koherentně difraktujících domén. Byla použita korekce na přednostní orientaci u vybraných fází. Pozadí bylo proloženo Čebyšovovým polynomem 5. stupně.

Limit detekce metody se pohybuje v závislosti na charakteru fáze a její krystalinitě v rozmezí cca 0,2–2 hm. %.

Výsledky a vyhodnocení

Výsledky semikvantitativních analýz vybraných frakcí C (0,63–0,125 mm), D (0,8–0,63 mm) a WR (whole rock) hornin jsou uvedeny v Tab. 13. Vybrané frakce (C, D) vzorků (L5_62L, L5_32P) byly následně použity pro sorpční experimenty.

Tab. 13 Mineralogické složení použitých horninových vzorků (hm. %), frakce C: 0,63–0,125 mm, frakce D: 0,8–0,63 mm, wr: celková hornina

Vzorek	Křemen	Plagioklas	Chlorit	Granát	Biotit	Amfibol	Pozn.: fáze na hranici limitu detekce
L5_62L, WR	31,7	47,4	0,8	1	19,1		
L5_62L_frakce C	29,5	41,1	0,7	0,5	28,2		
L5, 62L_frakce D	31,3	56,3	0,6	0,9	10,9		
L5_32P, WR	8,4	35,5	1,5		0,2	54,4	kalcit
L5_32P_frakce C	9,8	38,4	1,5		0,6	49,7	kalcit, magnetit?
L5_32P_frakce D	9,6	42,7	1,8		0,2	45,7	kalcit?
L4a_47R, WR	3,7	49	1,6			45,7	kalcit, dolomit?
L4a_47R_frakce C	3,1	54,5	2,6			39,8	kalcit, dolomit?
L4a_47R_frakce D	3,4	57,9	2,2			36,5	kalcit, dolomit?

XRD semikvantitativní fázová analýza (v hm.%)



■ Křemen ■ Na-Ca-živec ■ Chlorit ■ Granát ■ Biotit ■ Amfibol

Obr. 107 XRD semikvantitativní fázová analýza (v hm.%) – mineralogické zastoupení

2.5.2.2 Silikátová analýza

Chemické složení studovaných vzorků jednotlivých frakcí bylo provedeno v Laboratořích geologických ústavů Přf UK. Hlavní prvky byly stanoveny pomocí celkového rozkladu minerálními kyselinami (HF-HClO₄) a/nebo slinováním vzorku (obojí v Pt kelímcích) a následnou chemickou analýzou: Al₂O₃, Fe₂O₃, FeO, MgO, CaO byly stanoveny objemovými analýzami, obsah P₂O₅ a TiO₂ byl stanoven spektrofotometricky (paralelně bylo použito stanovení ICP OES), SiO₂, H₂O byly stanoveny gravimetricky, C_{tot} a S_{tot} byly stanoveny spalováním s IČ detekcí a Na₂O, K₂O, MnO pomocí plamenové atomové absorpční spektrometrie (FAAS a/nebo ICP OES). Podrobné metody jsou popsány např. v Johnson a Maxwell (1981) nebo Potts (1995). Výsledky silikátové analýzy pro studované vzorky jsou uvedeny v Tab. 14.

Tab. 14 Výsledky	silikátové	analýzy	horninových	vzorků	L5-32P	a L5-62L,	frakce	C: 0,63-	-0,125	тт,
frakce D: 0,8-0,63	3 mm									

vzorek	L5-32P 0,125-0,63	L5-32P 0,63-0,8	L5-62L 0,125-0,63	L5-62L 0,63-0,8
	(hm %)	(hm %)	(hm %)	(hm %)
SiO ₂	53,80	53,94	61,91	64,96
TiO ₂	0,530	0,502	0,843	0,396
Al ₂ O ₃	15,30	16,01	15,72	17,20
Fe ₂ O ₃	2,34	3,04	2,07	1,17
FeO	6,58	5,69	5,47	2,99
MnO	0,17	0,15	0,17	0,14
MgO	6,28	5,92	2,59	1,31
CaO	9,73	9,77	4,15	5,70
Na ₂ O	2,69	2,75	2,43	3,26
K ₂ O	0,55	0,48	2,39	1,20
P ₂ O ₅	0,030	0,031	0,048	0,087
Zž	1,35	1,22	1,26	0,69
BaO	0,02	0,02	0,10	0,05
SrO	0,032	0,035	0,030	0,041
suma	99,38	99,56	99,18	99,20

2.5.2.3 Specifický povrch (BET)

Cílem měření bylo stanovit hodnotu specifického povrchu pomocí metody BET u čtyř horninových vzorků L5_62L_C (vzorek 1), L5_62L_D (vzorek 2), L5_32P_C (vzorek 3) a L5_32P_D (vzorek 4).

Použité analytické metody

Měření specifického povrchu bylo provedeno na pracovišti (VŠCHT, doc. Lhotka) za využití přístroje ASAP 2020, který využívá pro své měření adsorpční izotermu N₂ (adsorpční izoterma – závislost adsorbovaného množství složky na jejím tlaku nad pevnou látkou za konstantní teploty). Z této závislosti se pak získává specifický povrch mezopórů pomocí např. metody BET. Pro měření takto malých povrchů (kolem 1 m²/g) byl jako adsorpční plyn použit krypton (Kr).

Výsledky

Specifický povrch jednotlivých vzorků byl stanoven podle metody (SSA BET) a to z měření pomocí kryptonu (Kr). Celkové výsledky z měření na přístroji ASAP 2020 jsou uvedeny v příloze (Elektronická

příloha 10). Jsou zde uvedena data části adsorpční izotermy, která se využívá pro stanovení specifického povrchu. Výsledky jsou uvedeny v Tab. 15.

Tab. 15 Specifický povrch jednotlivých vzorků

Vzorek	Specifický povrch BET Kr (m²/g)
L5_62L_C (0,63-0,125 mm)	0,2191 ± 0,0008
L5_62L_D (0,8-0,63 mm)	0,1237 ± 0,0004
L5_32P_C (0,63-0,125 mm)	0,1421 ± 0,0005
L5_32P_D (0,8-0,63 mm)	0,0872 ± 0,0001

2.5.2.4 Kationtová výměnná kapacita (CEC)

Metodika

Stanovení kationtové výměnné kapacity horninových materiálů poskytuje cenné informace o sorpčním chování radionuklidů na krystalinických horninách. Tato analýza přináší doplňující údaje potřebné při diskusi o sorpci sledovaných stopovačů a identifikuje dominantní sorpční minerály v horninové matrici (Havlová et al. 2018). Fylosilikáty (například slídy a jíly), které mají vrstvenou strukturu, hrají významnou roli jako sorbenty v horninových materiálech, protože nabízejí více sorpčních míst (Bradbury a Baeyens 1999). Vysoká hodnota kationtové výměnné kapacity ukazuje na přítomnost iontově výměnných procesů spojených s těmito sorpčními místy.

Dále je třeba zdůraznit, že stanovení CEC pro horninové vzorky nemá standardizovanou metodu, což je dáno především rozdíly v počtu výměnných míst, které jsou řízeny mineralogickým složením. V technické zprávě Neubecka (2016) bylo použito několik metod stanovení CEC, zahrnujících BaCl₂, NH₄Ac a komplexy CO(NH₃)₆³⁺ v kolonových experimentech s horninovými vzorky obsahujícími puklinové výplně z lokalit Äspö/Laxemar. Výsledky ukázaly, že metoda s komplexem CO(NH₃)₆³⁺ poskytla nejkonzistentnější výsledky.

Kationtová výměnná kapacita (CEC) a obsazení kationtů na výměnných místech byly stanoveny dle certifikované metodiky s registračním číslem SÚJB/ONRV/15452/2014 (Červinka 2014). Metodika využívala komplex mědi Cu(II)-triethylentetraminu (Cu(II)-trien) pro výměnu kationtů ve vrstvách fylosilikátů za kationty Cu²⁺. Výsledkem analýzy byla hodnota CEC (v meq 100 g⁻¹) horninového materiálu, která představuje množství mědi, které bylo navázáno (tj. vyměněno za kationty) na horninový materiál, spolu s hodnotou CECsum (v meq 100 g⁻¹), která představuje celkové množství vyměněných a uvolněných kationtů. Tento standardizovaný postup se běžně používá pro stanovení CEC jílů, zejména bentonitů, jejichž hodnoty CEC se obvykle pohybují v desítkách meq 100 g⁻¹ v závislosti na konkrétních vlastnostech bentonitu. CEC vybraných bentonitů, jako jsou Rokle (80 meq 100 g⁻¹), B75 (56,8 meq 100 g⁻¹) a S65 (71,5 meq 100 g⁻¹), byla určena v rámci různých projektů, jako je TIP (Gondolli et al. 2013) nebo pro ilustraci ve zprávě Havlová et al. (2018).

Roztok Cu(II)-trien byl připraven podle standardizovaného postupu, přičemž pro jílové materiály se obvykle vyžaduje koncentrace Cu(II)-trienu 0,01 mol/l. Na základě analýzy specifického povrchu použitých horninových vzorků však bylo zřejmé, že počet výměnných míst bude výrazně nižší. Proto byla pro tyto konkrétní vzorky koncentrace Cu(II)-trienu snížena o jeden řád na 0,001 mol/l. Horninové vzorky o hmotnosti přibližně 2 g byly pečlivě umístěny do 50ml polyetylenových lahviček. Objem přidaného roztoku Cu(II)-trienu (20 ml) byl upraven tak, aby kompenzoval očekávaný pokles koncentrace, který bylo možné přesně stanovit pomocí atomového absorpčního spektrometru (AAS) nebo měřením na UV-VIS spektrometrií.

Vzorky byly poté míchány na orbitální třepačce (IKA HS 260, IKA®-Werke GmbH & Co., DEU) po požadovanou dobu. Po uplynutí stanoveného času byly celé lahvičky se vzorky centrifugovány při
9 000 otáčkách za minutu po dobu 15 minut (MPW 352, MPW Med.Instruments, POL). Výsledný roztok byl pečlivě odebrán a potřebný objem byl přenesen do polyetylenových lahviček. Do těchto lahviček bylo přidáno odpovídající množství kyseliny dusičné pro následné měření koncentrací kationtů Cu, Na, Ca, Mg a K pomocí dvoupaprskového plamenového atomového absorpčního spektrometru (SavantAA Σ, GBC Scientific Equipment, Pty Ltd, Australia), který byl vybaven deuterovou lampou pro korekci pozadí a zajištění vyšší přesnosti, a také na UV-VIS spektrometru, kde probíhalo měření Absorbance při charakteristické vlnové délce. Koncentrace kationtů byly určeny metodou integrace vyhodnocenou pomocí lineární regrese nejmenších čtverců (LLS). Jako kalibrační standardy byly použity certifikované referenční materiály dodané společností Analytika, spol. s r.o., Česká republika.

Výsledky

Výsledky CEC v meq/100 g jsou pro studované materiály uvedeny v Tab. 16 a graficky znázorněny na Obr. 108 a Obr. 109.

		CEC (meq/100g)	
Vzorek	UV-VIS	SUM	AAS-Cu
L5 62L C			
(0, 6 3-0,125 mm)	0,26±0,02	0,58±0,04	0,30±0,02
L5 62L D			
(0,8-0,63 mm)	0,21±0,02	0,44±0,08	0,22±0,04
L5_32P_C			
(0, 6 3-0,125 mm)	0,26±0,02	0,61±0,04	0,28±0,05
L5 32P D			
(0,8-0,63 mm)	0,20±0,05	0,57±0,02	0,25±0,06

Tab. 16 Kationtová výměnná kapacita (CEC) vybraných vzorků

Z výsledků vyplývá, že tyto materiály vykazují 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, které jsou však téměř zanedbatelné. Stanovení CEC metodami UV-VIS a AAS-Cu vykazuje téměř shodné výsledky s minimálními odchylkami, což naznačuje, že tyto metody odpovídají kvantitativnímu stanovení výměnných míst v analyzovaných vzorcích (Obr. 108).

Naopak při stanovení CEC na základě sumy uvolněných kationtů byly hodnoty CEC přibližně dvojnásobně vyšší (Obr. 108). Tento rozdíl lze přičíst nejen výměnným procesům, ale také rozpouštění některých minerálů. Pravděpodobným mechanismem je rozpouštění karbonátů, což se odráží v procentuálním zastoupení uvolněných kationtů – u všech vzorků je vápník dominantním uvolněným kationtem (viz Obr. 109). Tento poznatek podtrhuje význam výběru vhodné metody pro stanovení CEC v závislosti na složení a povaze zkoumaných materiálů, přičemž jednotlivé přístupy mohou poskytovat různé informace o mechanismech výměny a rozpouštění.



Obr. 108 CEC vybraných vzorků stanovená pomocí UV-VIS, AAS-Cu a součtem uvolněných kationtů SUM



Obr. 109 Procentuální zastoupení uvolněných kationtů stanovené metodou AAS

2.5.2.5 Pórovitost ε a hustota ρ hornin

Stanovení celkové efektivní pórovitosti jednotlivých vzorků je nezbytné pro vyhodnocení efektivních difúzních koeficientů. Pórovitost hornin je možno studovat celou řadou metod. Jednou z nich je metodika stanovení pórovitosti metodou nasycení vodou a osychání. Tuto metodiku je možno využít jako srovnávací postup ke klasickému postupu měření metodou rtuťové porozimetrie (MIP). Metodika stanovení je podrobně popsána např. v Havlová et al. (2018), Bukovská et al. (2020).

Převzaté vzorky vrtných jader byly odebrány z velkoobjemových horninových vzorků a naformátovány na 10mm disky, na kterých bylo provedeno měření porozity a hustoty hornin. Hodnoty byly stanoveny na připravených vzorcích disků o průměru 48,3 mm a tloušťce 10 mm. Následně byly vybrané vzorky předány na difúzní experimenty a pro ekvilibraci byly syceny syntetickou podzemní vodou (SGW2). Výsledky naměřených pórovitostí a objemové hustoty jsou uvedeny v Tab. 17.

	Pórovitost ε	Max. porozita	Miner. hustota	Obj. hustota
Vzorek	%	%	(kg/m³)	(kg/m³)
L4a_47R_K_1	0,53	0,90	2832	2817
L4a_47R_K_2	0,95	1,29	2819	2792
L4a_47R_K_3	0,41	0,66	2840	2828
L4a_47R_P_2	0,51	0,84	2833	2819
L4a_47R_P_3	0,55	0,91	2826	2810
L5_62L_K_1	0,35	0,70	2744	2734
L5_62L_K_2	1,09	1,50	2698	2668
L5_62L_K_3	0,28	0,64	2687	2679
L5_62L_P_1	0,30	0,67	2714	2705
L5_62L_P_2	0,20	0,58	2706	2701
L5_32P_K26_1	0,39	0,84	2949	2937
L5_32P_K26_2	0,81	1,22	2878	2855
L5_32P_K26_3	0,61	0,99	2901	2884
L5_32P_P29_1	0,48	0,95	2976	2962
L5_32P_P29_2	0,37	0,91	2976	2965
L5_32P_P29_3	0,48	0,98	2967	2953

Tab. 17 Výsledky pórovitosti a hustoty vzorků (amfibolit a biotitický migmatit)

Hodnoty pórovitosti naměřené na vzorcích (disky 10 mm) se pohybovaly v rozmezí hodnot 0,20–1,09 %. Nejvyšší pórovitosti byly naměřeny na vzorcích s patrnou nehomogenitou (např. vyhojenou puklinou), kdy se pórovitost dosahovala až kolem 1,1 % (L5_62L_K_2). Naopak nejnižší hodnoty kolem 0,25 \pm 0,07 % byly zjištěny u vzorku biotitického migmatitu s leukosomem (L5_62L_P), kdy část vzorku je tvořena drobnozrnným křemen-živcovým páskem. Průměrné hodnoty pórovitosti pro amfibolit (vzorky L5_32P a L4a_47R) se pohybovaly mezi 0,44–0,63 %. Naměřené hodnoty jsou ve shodě s měřeními ze rtuťové porozimetrie, kdy byly naměřeny hodnoty pórovitosti amfibolitu 0,74–0,81 % (vzorek L5_32P, ÚGN) a 0,24–0,30 % pro vzorek biotitického migmatitu (vzorek L5_62L, SG Geotechnika).



Obr. 110 Výsledky pórovitosti a hustoty vzorků z chodeb L4 a L5 (metodou nasycení vodou)

	Porozita	Max. porozita	Hustota celková	Hornina
Vzorek	%	%	kg/m ³	
L4a_47R_K	0,63 ± 0,28	0,95 ± 0,32	2813 ± 18	amfibolit
L4a_47R_P	0,53 ± 0,03	0,88 ± 0,05	2814 ± 6	amfibolit
L5_62L_K	0,57 ± 0,45	0,95 ± 0,48	2694 ± 35	biotitický migmatit
L5_62L_P	0,25 ± 0,07	0,63 ± 0,06	2703 ± 3	biotitický migmatit/leukosom
L5_32P_K26	0,60 ± 0,21	1,02 ± 0,19	2892 ± 42	amfibolit
L5_32P_P29	0,44 ± 0,06	0,95 ± 0,04	2960 ± 6	amfibolit

Tab. 18 Průměrné hodnoty porozity a hustoty pro vzorky horniny (kolmé_K/paralelní_P)

2.5.2.6 Petrologická charakteristika vybraných litologických typů hornin

Ze vzorků L5-32P-P29; L5-32P-K26 a L5-62L-P-3; L5-62L-K-3 byly připraveny petrologické výbrusy a proveden petrologický popis (ČGS, T. Zelinková).

Horninové vzorky **L5-32P-P29; L5-32P-K26** (Obr. 111) je možné popsat jako **amfibolity** s masivní texturou, drobnozrnné (L5-32P-P29) až jemnozrnné (L5-32P-K26). Základní hmota studovaných výbrusů je tvořena převážně amfibolem a dále plagioklasem a menším množstvím křemene. Amfibol bývá místy v asociaci s biotitem. Granát nebyl ve výbrusech pozorován. Ve výbruse L5-32P-K26 jsou hojnou akcesorickou fází opakní rudní minerály. Biotit často podléhá přeměně na chlorit. Horniny nevykazují známky jiné významnější alterace.



Obr. 111 Mikrofotografie amfibolitů: (a, b) vzorek L5-32P-P29, (c, d) vzorek L5-32P-K26. IIN – pozorování s rovnoběžnými nikoly, XN: pozorování se zkříženými nikoly

Výbrusy vzorků **L5-62L-P-3**; **L5-62L-K-3** (Obr. 112) jsou charakterizovány jako **biotitický migmatit**, s páskovanou texturou, jemnozrnné až drobnozrnné zrnitosti. Základní hmota studovaných výbrusů je křemen-živcová s paralelně uspořádanými pásky, které jsou tvořeny biotitem. V této základní hmotě se vyskytují rozpadlá zrna granátu, která jsou již z velké míry nahrazena biotitem. Tyto granátové relikty místy dosahují rozměrů až 1,8 mm. Přibližně polovina výbrusu L5-62L-P-3 je tvořena drobnozrnným křemen-živcovým páskem s minoritním obsahem biotitu. Tato hmota obsahuje zachovalá zrna granátu o velikosti do 2 mm. Biotit místy podléhá přeměně na chlorit. Horniny nevykazují známky jiné významnější alterace.



Obr. 112 Mikrofotografie biotitických migmatitů: (a–d) vzorek L5-62L-P-3, (e, f) vzorek L5-62L-K-3. IIN – pozorování s rovnoběžnými nikoly, XN: pozorování se zkříženými nikoly

2.5.3 Difuzní experimenty

Stanovení difuzního efektivního koeficientu D_e bylo provedeno pro ³H jako pro konzervativní nesorbující se stopovač a pro ³⁶Cl jako konzervativní nesorbující se aniont metodou průnikových difúzních experimentů podle pracovního postupu ÚJV PP 213-04 v radiochemických laboratořích ÚJV Řež, a.s. (Havlová et al. 2018).

2.5.3.1 Metodika difuzních experimentu

Teoretický základ popisující difuzní procesy, včetně přípravy, provedení a vyhodnocení průnikových difuzních experimentů, je podrobně uveden v Havlová et al. (2018). V rámci této studie byly jako stopovače použity tritium (³H) ve formě tritiové vody (HTO) a chlór (³⁶Cl) ve formě chloridu. Je důležité zdůraznit, že pro oba stopovače nebyl do systému přidáván žádný neaktivní nosič. Chloridové ionty

(Cl⁻) byly přirozeně přítomny ve složení syntetické podzemní vody SGW2, která sloužila jako kapalná fáze, v koncentraci přibližně 3,5 mg/l. Výsledná data jsou prezentována ve formě efektivních difuzních koeficientů (D_e) pro stopovače ³H a ³⁶Cl, stanovených analytickým řešením a metodou time-lag, více v práci Havlová et al. (2018).

Syntetická podzemní voda SGW2 byla vybrána jako kapalná fáze pro studium transportních parametrů na základě předchozí domluvy, především s ohledem na možnost porovnání výsledků s předchozími studiemi (Bukovská et al. 2017, Havlová et al. 2018). Volba této varianty byla také ovlivněna skutečností, že v době provádění experimentů nebyly k dispozici podrobnější výsledky nových hydrochemických měření. Na základě výsledků hydrochemického monitoringu byla následně pro sorpční experimenty použita i voda SGW3 s vyšším zastoupením Na⁺.

Syntetická podzemní voda je využívána především pro zajištění stejných hydrochemických okrajových podmínek při experimentech, tj. i možnost opakovaní experimentů, porovnání výsledků experimentů z různých lokalit apod. Složení podzemní vody není stejné v prostoru a často dochází ke změnám i v průběhu času. Současně přírodní voda odebraná z vrtu může být ovlivněna samotnými odběry, změnou podmínek (např. teplota par, tlak plynů), mikrobiologickou aktivitou, ekvilibrací apod., a tím vnáší nejistoty do následného vyhodnocení. Složení navržených syntetických podzemních vod SGW2 a SGW3 (Tab. 19) bylo provedeno dle metodiky Červinka et al. (2016).

		SGW2	SGW3
	<i>M</i> r (g/mol)	<i>c</i> (mg/l)	<i>c</i> (mg/l)
Na⁺	23	16,5	89,4
K⁺	39	2,1	0,7
Mg ²⁺	24	8,3	0,1
Ca ²⁺	40	37,4	1,3
Cŀ	35	3,5	18,7
NO₃ ⁻	62	0	0
SO4 ²⁻	96	21,9	10,5
HCO₃ ⁻	61	168,7	163,5
CO32-	60	0	0
OH-	17	0	0
F-	19	0	9,9
l (mol/l)		0,0048	0,0041
pН		8,2	8,5

Tab. 19 Navržené chemické složení syntetické podzemní vody (Červinka el al. 2016)

2.5.3.2 Výsledky a diskuze

Průnikové křivky pro oba použité stopovače HTO, ³⁶Cl jsou zobrazeny na Obr. 113 pro všechny studované vzorky. Data jsou obsahem Elektronická příloha 10.



Obr. 113 Průnikové křivky (znázorňující vývoj relativní objemové aktivity ve výstupních rezervoárech) pro difuzní experimenty s HTO (³H) a chloridem (³⁶Cl⁻)

Analýza průnikových křivek ukazuje, že nejvyšší difuzivitu pro oba stopovače vykazují vzorky L5_32P_P29, u nichž byl pozorován významně vyšší průnik stopovačů v průběhu experimentu. Tento nárůst však může být ovlivněn nehomogenitou vzorku, kdy u vzorků L5_32P_P29 byla patrna drobná nehomogenita (pásek plagioklasu/křemen). U ostatních vzorků nepřesáhl průnik více než 1 % původní aktivity stopovačů ve zdrojovém rezervoáru, což vypovídá o jejich výrazně nižší difuzivitě. Je nutné zdůraznit, že nízká difuzivita většiny vzorků (s výjimkou L5_32P_P29) značně ztěžovala kvantifikaci aktivity stopovačů v cílových rezervoárech. Tento problém byl zvláště patrný u aniontového stopovače chloridu ³⁶Cl, kde nízké koncentrace vedly ke zvýšenému rozptylu hodnot, čímž se některé výsledky průnikových křivek odchýlily od očekávané linearity.

Navzdory těmto nízkým difuzivitám bylo možné identifikovat konzistentní trendy i pro ³⁶Cl. Tyto trendy umožnily spolehlivé stanovení efektivních difuzních koeficientů D_e , jejichž hodnoty jsou uvedeny v Tab. 20 a graficky znázorněny na Obr. 114. U některých vzorků nebylo možné stanovit hodnoty D_e pro chlorid ³⁶Cl pomocí analytického řešení, ale pouze metodou time-lag. Tento problém byl způsoben vyšší variabilitou naměřených hodnot, která pramenila z velmi nízké difuzivity těchto vzorků.

Hodnoty D_e ukazují, že nejvyšší difuzivitu vykazují vzorky L5_32P_P29 (amfibolit, paralelní usměrnění), následované vzorky orientovanými kolmo na usměrnění, konkrétně L5_32P_K26. U velké části vzorků z jádra L5_32P byly zachyceny drobné nehomogenity (např. mikrotrhliny, páskování plagioklasu). Přestože pro difuzní experimenty byly vybrány vzorky bez patrných výraznějších nehomogenit, není možné tyto vlivy vyloučit. Tyto nehomogenity však byly zjištěny v okolních discích (10 mm), které byly následně pro difuzní experimenty vyřazeny. Na možný vliv "preferenční" cesty u vzorku L5_32P_P29 poukazuje i výrazně vyšší hodnota D_e pro aniontovou formu (³⁶Cl⁻). Podobné hodnoty D_e jako u kolmo orientovaných amfibolitů byly pozorovány u paralelně orientovaných biotitických migmatitů (L5_62L_P). Nejnižší hodnoty D_e a nejnižší difuzivita byly zaznamenány u biotitických migmatitů orientovaných kolmo k usměrnění (L5_62L_K; Tab. 20).

		<i>D</i> _e ·10	⁻¹³ (m²/s)		
	Analytic	cké řešení	Time-lag	D _e (³ H)	
Vzorek	нто	³⁶ CI	НТО	³⁶ CI	D _e (³⁶ CI)
L5_62L_K_2	1,23±0,57	Х	1,19±0,16	Х	Х
L5_62L_K_3	1,14±0,20	Х	1,08±0,08	0,12±0,07	9
L5_62L_P_1	1,99±0,20	Х	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	Х	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

Tab. 20 Hodnoty efektivních difuzních koeficientů D_e stanovené analytickým řešením a metodou timelag spolu s jejich odchylkami, poměr difúzních koeficientů $D_e({}^{3}H)/D_e({}^{36}CI)$.

Tato pozorování naznačují trend vyšší difuzivity u vzorků s paralelním usměrněním k hlavnímu strukturálnímu směru ve srovnání s vzorky s kolmým usměrněním. Podobný trend byl do jisté míry pozorován také u experimentů prováděných na vzorcích z lokality PVP Bukov I. Na lokalitě PVP Bukov I byl testován vliv rozdílné orientace usměrnění (kolmá, šikmá, paralelní) u 8 vzorků biotitického migmatitu. Z výsledků je možné pozorovat určitý trend nižších difuzivit (průměr D_e pro ³H je $1,5 \cdot 10^{-13}$ m² s⁻¹) u vzorků s kolmou magnetickou foliací než u vzorků s šikmou orientací (D_e pro ³H je $2,7 \cdot 10^{-13}$ m² s⁻¹) a nejvyšší difuzivita u vzorků byla sledována u vzorků s šikmou až paralelní orientací (De pro ³H je $5,9 \cdot 10^{-13}$ m² s⁻¹). Pro reprezentativní zhodnocení a generalizování trendu se však jedná o malý soubor dat (Bukovská et al. 2017).



Obr. 114 Poměry efektivních difuzních koeficientů (time-lag metoda) pro tritium (³H) ve srovnání s chloridem (³⁶Cl)

Nižší hodnoty D_e pro chlorid ³⁶Cl lze přisoudit jevu aniontové exkluze, což je faktor limitující transport aniontů v porézních materiálech a krystalinických horninách. Tento efekt byl konzistentně pozorován u všech zkoumaných vzorků, přičemž hodnoty D_e pro HTO byly násobně vyšší ve srovnání s hodnotami získanými pro ³⁶Cl. Výsledné hodnoty D_e pro zkoumané vzorky jsou v souladu s dříve publikovanými daty získanými během charakterizace vzorků z lokality PVP Bukov I. V rámci charakterizace PVP Bukov I byly prováděny difuzní experimenty na hlavních horninových typech. Vzorky amfibolitu vykazovaly nízké hodnoty difúzních koeficientů jak pro tritium $(1,2-2,9\cdot10^{-13} m^2\cdot s^{-1}, n=8)$, tak pro aniontové stopovače (³⁶Cl; 0,3–7,5 10⁻¹⁴ m²·s⁻¹). Také poměr efektivních difúzních koeficientů aniontu a tritia (aniont/³H) je nízký (°~0,14), což ukazuje na výraznější vliv aniontové exkluze. Vyšší hodnoty D_e byly sledovány u vzorků s paralelní stavbou. Rozdílný průběh difúzí aniontů (³⁶Cl, popř. ¹²⁵I) je možné sledovat především u vzorků amfibolitů, která mají nejnižší poměry (³⁶Cl–¹²⁵I/³H (Bukovská et al. 2017). Oproti studovanému vzorku amfibolitu (L5_32P) z PVP Bukov II mají studované amfibolity z PVP Bukov I vyšší obsah biotitu. Naměřené vyšší hodnoty D_e u amfibolitu mohou souviset s nehomogenní stavbou u vzorků z L5_32P, která často obsahuje pásky plagioklasu a křemene, které mohou přispívat ke zvýšené difuzivitě.

Na základě výsledků hydrochemického monitoringu v průběhu projektu bylo zjištěno, že podzemní voda na lokalitě odpovídá svým složením (do určité míry) spíše syntetické podzemní vodě SGW3 (typ Na-HCO₃). Nicméně je nutné poznamenat, že v rámci jednotlivých částí PVP Bukov je možné sledovat variabilní složení, a to i v rámci lokality PVP Bukov II. Na lokalitě byly zaznamenány i rozdíly ve složení vod u odběrových bodů v rámci jednotlivých chodeb (viz kapitola 2.4). U difuzních experimentů nebylo možné provést doplňující měření s vodou SGW3, jak tomu bylo v případě sorpčních experimentů. Důvodem je značná časová náročnost difuzních experimentů vyplývající z nutnosti saturace, dosažení rovnováhy a měření nízkých difuzních toků, zejména u vzorků s takto nízkou difuzivitou.

Při hodnocení použití vod SGW2 a SGW3 jako kapalných fází pro difuzní experimenty je zásadní uvědomit si, že jejich hlavní rozdíl spočívá v rozdílných koncentracích kationtů (Ca²⁺/Na⁺), zatímco jejich iontová síla zůstává velmi podobná (I: SWG2: 0,0048 mol/l; SGW3: 0,0041 mol/l). Iontová síla je klíčovým parametrem ovlivňujícím potlačení aniontové exkluze, která hraje významnou roli při difuzních procesech chloridu ³⁶CI. Tento jev byl podrobně analyzován například ve studiích Ohlsson a Neretnieks

(1997), které ukazují, že v prostředí vysocesalinních vod (I > 0,5 mol/l) může být D_e pro Cl⁻ až desetkrát vyšší a prakticky identický s D_e pro HTO ve srovnání s nízkosalinními vodami. lontová síly podzemní vody na lokalitě PVP Bukov II se v hlavních chodbách pohybuje mezi 0,0033 mol/l (chodba L8) a 0,0053 mol/l (chodba L5). Vzhledem k podobné iontové síle SGW2 (0,0048 mol/l) a SGW3 (0,0041 mol/l) je možné s vysokou mírou jistoty předpokládat, že použití SGW3 nebude mít významný vliv na hodnoty D_e pro dané vzorky. Tento závěr platí jak pro tritiovou vodu HTO, tak pro chlorid ³⁶Cl. To naznačuje, že z hlediska difuzních procesů lze tyto dvě syntetické vody považovat za funkčně ekvivalentní v rámci daných experimentálních podmínek.

2.5.4 Sorpční experimenty

Stanovení rozdělovacího (sorpčního) distribučního koeficientu K_d bylo provedeno dle pracovního postupu ÚJV PP213-03 pro drcené vzorky ze zvolené litologie metodou vsádkových sorpčních experimentů pro screeningové radionuklidy (Cs, Sr), které byly použity i pro stanovení sorpčních vlastností na vzorcích z potenciálních lokalit pro umístění HÚ.

K získání potřebných dat pro výpočet distribučních sorpčních koeficientů K_d nebo sorpčních izoterem byla použita metoda statických vsádkových (tzv. batch) experimentů. Při těchto experimentech je sorpce radionuklidu na pevný materiál popsána hodnotou distribučního koeficientu K_d , který je definován jako poměr koncentrace radionuklidu zachyceného na pevné fázi a koncentrace radionuklidu v okolní vodné fázi. Principem statického sorpčního experimentu je interakce známého množství pevné fáze (sorbentu) a známého objemu kapalné fáze obsahující definovanou koncentraci (aktivitu) studovaného radionuklidu.

2.5.4.1 Metodika sorpčních experimentů

Sorpční experimenty byly provedeny metodikou vsádkových sorpčních experimentů (více v Havlová et al. 2018, Bukovská et al. 2017). Tato metodika byla na základě předešlých výsledků optimalizována, přičemž byly změněny postupy přípravy hornin, poměr pevné a kapalné fáze a délka trvání experimentu.

Před samotným sorpčním experimentem byly horninové vzorky promyty destilovanou vodou za účelem odstranění prachu vzniklého při drcení. Následně byly promyté vzorky ekvilibrovány s vybranou kapalnou fází (SGW2 i SGW3) v poměru 1 : 25 g/ml. Tento postup měl zajistit ekvilibraci mezi danou kapalnou fází a horninovým materiálem tak, aby sorpční experiment probíhal již v ekvilibrovaném systému (Lehto et al. 2019). Po ekvilibraci byly fáze odděleny, kapalná fáze přefiltrována a použita jako ekvilibrovaná fáze pro sorpční experimenty. Kromě toho byla ekvilibrována kapalná fáze kvantitativně analyzována pro změny koncentrací iontů (Tab. 21). Výsledky ukázaly, že dochází k ustalování rovnováhy mezi fázemi, což se projevuje změnami koncentrací sledovaných iontů ve srovnání s čistými kapalnými fázemi.

Obě fáze byly následně použity pro sorpční experimenty, kde poměr *m*/V činil 1 : 4 g/ml. Nižší poměr byl zvolen s cílem umožnit sorpci i při vyšších koncentracích neaktivního nosiče daného stopovače. Sorpční experimenty byly prováděny metodikou izoterm, kdy při fixním m/V byla měněna koncentrace neaktivního nosiče (10^{-8} , 10^{-7} , 10^{-5} , 10^{-3} mol/l). Pro každou koncentraci byl připraven triplikát a následně vyhodnocena průměrná výsledná hodnota. Pro oba stopovače, ¹³⁷CsCl ($T_{1/2}$ =30,17 roků) i ⁸⁵SrCl₂ ($T_{1/2}$ =64,9 dnů), byly použity jejich neaktivní chloridové formy (CsCl a SrCl₂). Před zahájením sorpčních experimentů byly roztoky stopovačů připraveny tak, aby jejich přídavky do ekvilibrovaných kapalných fází výrazně nezměnily pH a složení dané kapalné fáze. Po zahájení a dokončení sorpčních experimentů (doba trváni 18 dnů) byly supernatanty filtrovány přes 0,2 µm filtr. Objemové aktivity v těchto supernatantech byly následně kvantitativně stanoveny pomocí gama spektrometru Wizard2® 2480, Perkin Elmer Inc., USA. Výsledky jsou prezentovány buď ve formě distribučních koeficientů K_d (Tab. 22, Tab. 23), nebo ve formě procentuální sorpce na daný materiál.

Syntetická granitická voda SGW2 byla vybrána jako kapalná fáze pro sorpční experimenty na základě předchozího schválení, především s ohledem na možnost porovnání výsledků s předchozími studiemi. Volba této varianty byla také ovlivněna skutečností, že v době provádění experimentů nebyly k dispozici výsledky nových hydrochemických měření. Na základě hydrochemického monitoringu v průběhu projektu bylo zjištěno, že podzemní voda na lokalitě odpovídá svým složením do určité míry spíše syntetické podzemní vodě SGW3 (Na-HCO₃), proto byly po dohodě sorpční experimenty doplněny i o sorpční experimenty na C frakcích sledovaných horninových vzorků ve vodě SGW3. Nicméně je nutné poznamenat, že v rámci jednotlivých částí PVP Bukov II je možné sledovat variabilní složení, kdy např. složení vody v rozrážce L5 je rozdílné od vody v chodbách L6, L7, L8 (více viz kapitola 2.4.1).

2.5.4.2 Výsledky a diskuze

Analýza ekvilibrovaných kapalných fází

Výsledky kvantitativního stanovení jednotlivých iontů v ekvilibrované kapalné fázi, stejně jako pro čisté syntetické vody (SGW2, SGW3), jsou uvedeny v Tab. 21 a znázorněny na Obr. 115. Tato data slouží k porovnání chemického složení obou systémů a umožňují identifikovat změny způsobené interakcí mezi horninovým materiálem a kapalnou fází.

Tab. 21 Analýza kapalných fází po ekvilibraci syntetické vody (SGW2, SGW3) a zvoleného horninového vzorku

Vzorek	nH	C (mg/l)								
	pri	Mg ²⁺	K⁺	Na⁺	Ca ²⁺	CI	SO42-	NO ₃ -	F-	HCO ₃ -
L5_32P_D+SGW2	8,65	8,2	3,9	16,7	31,8	3,4	23,0	n.d.	n.d.	173
L5_32P_C+SGW2	8,62	8,3	5,5	16,9	31,1	3,3	23,3	n.d.	n.d.	173
L5_32P_C+SGW3	8,67	0,4	2,2	81,3	3,4	17,9	12,6	1,22	9,9	173
L5_62L_D+SGW2	8,66	8,1	5,5	16,6	31,5	3,0	22,4	n.d.	n.d.	173
L5_62L_C+SGW2	8,66	8,1	7,6	16,8	30,8	3,3	22,3	n.d.	n.d.	173
L5_62L_C+SGW3	8,69	0,3	3,3	83,1	2,8	18,1	12,8	1,46	9,9	173
Voda SGW2	8,2	8,7	2,2	16,3	37,7	4,7	22,7	n.d.	n.d.	172
Voda SGW3	8,0	n.d.	0,6	85,2	1,1	18,4	10,5	<1	9,7	174

*n.d. – nedetekovatelné množství

Z výsledků vyplývá, že dochází k ustálení rovnováhy mezi horninovými vzorky a použitými syntetickými vodami. Tento proces je doprovázen zvýšením hodnoty pH, což lze přisuzovat změnám v mineralogickém složení systému, zejména procesům rozpouštění a srážení minerálů nebo procesům výměny jednotlivých kationtů. Tyto změny se odrážejí ve variacích koncentrací vybraných iontů ve srovnání s počátečním stavem syntetických vod. Rovněž je zřejmé, že horninová matrice a syntetické vody vykazují (vlivem HCO₃) během experimentu dostatečnou pufrační kapacitu, což umožňuje stabilizaci chemického prostředí. Z tohoto důvodu je nezbytné před zahájením sorpčních experimentů

provést ekvilibraci systému, aby byla zajištěna tato ekvilibrace. To umožní, aby v průběhu sorpčního experimentu byly sledované stopovače zachytávány výhradně procesy vyvolanými jejich přídavkem do rovnovážného systému. Data jsou obsahem Elektronická příloha 10.



Obr. 115 Analýza kapalných fází po ekvilibraci syntetické vody a zvoleného horninového vzorku

Sorpce stroncia (Sr)

Výsledky ve formě distribučních koeficientů K_d (Sr) pro jednotlivé kapalné fáze a horninové vzorky v Tab. 22 a na Obr. 116 a Obr. 117. Pro každou koncentraci byl připraven triplikát.

Tab. 22	2 Průměrná	hodnota	K _d (Sr)	pro da	né horr	ninové	vzorky	a kapaln	é fáze,	uvedena	spolu :	s 95%
interva	lem spolehli	ivosti										

	Ekvil.	K _d (ml/g)						
Vzorek	kapalná fáze	10 ⁻⁹ mol/l neak. SrCl₂	10 ⁻⁷ mol/l neak. SrCl₂	10 ⁻⁵ mol/l neak. SrCl₂	10 ⁻³ mol/l neak. SrCl₂			
15.62L C	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	SGW2	3,56±0,14	3,47±0,11	3,17±0,04	1,23±0,03			
15 32P C	SGW2	3,00±0,19	3,22±0,33	2,98±0,15	1,31±0,20			
L3_32F_0	SGW3	13,30±1,73	13,53±1,68	11,88±0,90	1,85±0,13			
L5_32P_D	SGW2	2,80±0,76	2,72±0,45	2,35±0,08	1,07±0,28			

Analýza výsledků sorpce Sr ukazuje, že rozdíly v sorpci Sr na frakce C a D jsou statisticky nevýznamné a pohybují se v rámci 95% intervalu spolehlivosti. Tento závěr platí konzistentně pro oba zkoumané horninové materiály v prostředí ekvilibrované SGW2 vody. Sorpcí Sr se rovněž ukázalo, že rozdíly mezi jednotlivými materiály jsou minimální, přičemž vzorky L5_62L (biotitický migmatit) vykazují mírně vyšší afinitu k sorpci Sr ve srovnání se vzorky L5_32P (amfibolit). Tento jev je zřetelnější v oblasti nižších

koncentrací, zatímco při koncentraci neaktivního nosiče 1·10⁻³ mol/l dochází k úplnému nasycení sorpčních míst neaktivním nosičem.

Podobné trendy byly pozorovány také v experimentech provedených v prostředí vody SGW3. V těchto experimentech byla při nízkých koncentracích neaktivního nosiče zjištěna vyšší míra sorpce Sr (hodnota K_d byla přibližně pětinásobná a procentuální sorpce dosáhla až 80 %) v porovnání s vodou SGW2. Tento očekávaný rozdíl lze přičíst absenci vápenatých a hořečnatých kationtů v ekvilibrované SGW3 vodě, což výrazně usnadňuje proces kationtové výměny Sr na povrchu horninových vzorků.

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, jak dokládají Tab. 21 a Obr. 115).

Porovnání sorpčních dat pro Sr na vzorcích PVP Bukov I (Bukovská et al. 2017) a vzorcích z potenciálních lokalit (Havlová et al. 2018) při koncentraci neaktivního stopovače $1 \cdot 10^{-5}$ mol/l, kde byla stanovena hodnota Kd 4,9 ± 0,7 ml/g (průměr všech hodnot K_d pro dané materiály), ukazuje, že tyto výsledky jsou srovnatelné s naměřenými hodnotami sorpce Sr na studovaných vzorcích L5_62L a L5_32P. Je však nutné zdůraznit, že experimentální podmínky v uvedených studiích se do určité míry lišily, což může ovlivnit přímou porovnatelnost získaných hodnot (např. odlišné chemické složení použitých roztoků, minerální složení horninových vzorků a experimentální design jednotlivých experimentů).



Obr. 116 Průměrná hodnota K_d (Sr) pro dané horninové vzorky a kapalné fáze (SGW2, SGW3), chybové úsečky vyjadřují 95% interval spolehlivosti



Obr. 117 Procentuální sorpce Sr na dané horninové materiály v zvolených kapalných fázích, chybové úsečky vyjadřují 95% interval spolehlivosti

Sorpce cesia (Cs)

Výsledky ve formě distribučních koeficientů K_d (Cs) pro jednotlivé kapalné fáze a horninové vzorky jsou uvedeny v Tab. 23 a na Obr. 118. Pro každou koncentraci byl připraven triplikát.

Tab. 23 Průměrná	hodnota K _d (Cs) pro dané	horninové	vzorky a	kapalné	fáze,	uvedena	spolu s	s 95%
intervalem spolehli	ivosti								

		K _d (ml/g)							
Vzorek	Kapalná fáze	10 ⁻⁹ mol/l neak. CsCl	10 ⁻⁷ mol/l neak. CsCl	10 ⁻⁵ mol/l neak. CsCl	10 ⁻³ mol/l neak. CsCl				
	SGW2	818±100	602±100	25±2	4±1				
	SGW3	857±374	601±185	45±28	3±1				
L5_62L_D	SGW2	293±72	237±76	28±2	5±1				
	SGW2	61±6	48±5	8±1	3±1				
L0_32F_C	SGW3	109±67	60±8	22±13	3±2				
L5_32P_D	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. Přestože rozdíly v hodnotách K_d mohou být při některých koncentracích výrazné (až mnohonásobní), je nutné zdůraznit, že procentuální rozdíly v sorpci zůstávají marginální a nepřesahují 1 % u obou frakcí při koncentracích nižších než 1·10⁻³ mol/l.

Amfibolit (L5_32P) vykazuje nižší sorpční kapacitu, kdy se hodnoty K_d (Cs) pohybují mezi 2–61 ml/g (SGW2) a 3–109 ml/g (SGW3). Biotitický migmatit (L5_62L) vykazuje výrazně vyšší sorpci, což dokládají hodnoty Kd pro cesium v rozmezí 3–857 ml/g (SGW3). Nejvyšší hodnoty K_d byly naměřeny pro nízké koncentrace neaktivního nosiče 1·10⁻⁹ mol/l.

Podobně jako u Sr vykazuje sorpce Cs při koncentraci neaktivního nosiče 1·10⁻³ mol/l (CsCl) srovnatelné hodnoty napříč všemi testovanými materiály a kapalnými fázemi. Tento jev je důsledkem saturace sorpčních míst neaktivním nosičem, což vede k eliminaci rozdílů v sorpční kapacitě mezi jednotlivými materiály a experimentálními podmínkami. Tato saturace potvrzuje omezení sorpční

kapacity při vysokých koncentracích neaktivních nosičů. Výsledky ukazují, že zkoumané materiály vykazují zvýšenou schopnost sorpce Cs při nízkých koncentracích. Při koncentracích nižších než 1·10⁻⁷ mol/l dosahuje sorpce více než 95 %. Tento jev je pravděpodobně důsledkem interakce Cs s vysoce afinitními sorpčními místy (tzv. FES sites, vyskytujících se na vrstevnatých fylosilikátech, např. biotit, muskovit, chlorit aj.), která hrají klíčovou roli při nízkých koncentracích a zajišťují selektivní a účinnou sorpci tohoto iontu. Vyšší sorpční kapacita u biotitického migmatitu je tak pravděpodobně dána přítomností afinitních sorpčních míst na biotitu (~30 hm%), oproti amfibolitu, který obsahuje pouze kolem 0,6 hm. % biotitu.

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 %, což lze z hlediska sorpčních procesů považovat za zanedbatelné.

Mírně vyšší průměrné hodnoty *K*_d a průměrné procentuální sorpce pozorované v prostředí ekvilibrované SGW3 ve srovnání s vodou SGW2 (i při zachování překryvu 95% intervalů spolehlivosti) pro vzorku L5_32P v C frakci mohou být vysvětleny rozdíly v chemickém složení těchto roztoků. Vyšší koncentrace draslíku v SGW2 pravděpodobně ovlivňuje sorpci Cs na vysoce selektivní sorpční místa, kde draslík působí jako konkurenční kationt, jak popisuje Fuller et al. (2014). Podobně přítomnost vápníku v SGW2 může snižovat dostupnost nízkoafinitních sorpčních míst pro Cs tím, že zvyšuje konkurenční interakce. Na základě výsledků sorpčních experimentů lze konstatovat, že vliv SGW3 ekvilibrované s horninovými vzorky je prakticky totožný s vlivem SGW2. Nebyly pozorovány statisticky významné rozdíly v sorpci mezi těmito dvěma kapalnými fázemi.

Podobně jako v případě Sr ukazuje srovnání dat z Bukovská et al. (2017) a Havlová et al. (2018), že K_d naměřené pro vzorky L5_32P a L5_62L pro koncentraci 10⁻⁵ mol/l jsou srovnatelné s průměrnou hodnotou K_d uvedenou pro všechny zkoumané horniny v těchto studiích, která činila 33 ± 14 ml/g. Je však vhodné poznamenat, že experimentální podmínky uvedené v citovaných zprávách se mírně lišily od podmínek sorpčních experimentů provedených v této zprávě. Tyto rozdíly mohou ovlivnit přímou porovnatelnost získaných výsledků, zejména vzhledem k odlišnostem v chemickém složení použitých roztoků, mineralogickém složení horninových vzorků a metodologii provedených experimentů



Obr. 118 Průměrná hodnota K_d (Cs; vlevo) a procentuální sorpce Cs (vpravo) pro dané horninové vzorky a kapalné fáze, chybové úsečky vyjadřují 95% interval spolehlivosti

2.5.5 Závěr zhodnocení

Na vybraných vzorcích amfibolitu a biotitického migmatitu z oblasti PVP Bukov II byly studovány transportní vlastnosti se zaměřením na difuzní a sorpční charakteristiky. Distribuční sorpční koeficient (K_d) byl stanoven pomocí vsádkových sorpčních experimentů pro screeningové radionuklidy ¹³⁷Cs a ⁸⁶Sr na základě sorpčních izoterm. Difuzní efektivní koeficient (De) byl určen metodou difúzních experimentů pro konzervativní stopovač ³H (HTO) a pro ³⁶Cl, který byl použit jako konzervativní nesorbující aniont.

Horninové vzorky byly připraveny pro jednotlivé analýzy a provedena úvodní charakterizace studovaného materiálu, která zahrnovala: mineralogické a petrologické složení, silikátovou analýzu, specifický povrch (SSA BET), kationtovou výměnnou kapacitu (CEC). U připravených vzorků na difuzní experimenty byla stanovena i pórovitost a hustota. Pro studium případného vlivu usměrnění na difuzivitu, byly připraveny jak vzorky s paralelní, tak kolmou stavbou.

Hodnoty efektivních difuzních koeficientů D_e stanovené analytickým řešením a metodou time-lag se u studovaných vzorků pohybovaly mezi 1,08 a 9,07·10⁻¹³ m²·s⁻¹ (HTO) a 0,12 až 4,10·10⁻¹³ m²·s⁻¹ pro aniontovou formu (³⁶Cl). Biotitický migmatit obecně vykazuje nižší hodnoty D_e , které dosahují maxima 2,1·10⁻¹³ m²·s⁻¹ (HTO) a 0,45·10⁻¹³ m²·s⁻¹ (³⁶Cl) u vzorků s paralelní orientací usměrnění. Amfibolit vykazuje hodnoty D_e mezi 1,71–9,07·10⁻¹³ m²·s⁻¹ (HTO) a 0,12–4,10·10⁻¹³ m²·s⁻¹ (³⁶Cl) s vyšší difuzivitou vzorků orientovaných paralelně k usměrnění. Naopak vzorky orientované kolmo k foliaci dosahují nižší difuzivity, což poukazuje na vliv strukturní stavby na difuzní koeficient. Chloridové ionty (³⁶Cl) mají nižší difuzivitu kvůli jevu aniontové exkluze, což je společné pro oba typy hornin. Výrazněji je tento efekt pozorován u vzorků amfibolitu, které vykazují nízké poměry D_e (HTO/³⁶Cl). Sledované vyšší hodnoty D_e pro amfibolit však mohou odrážet nehomogenní stavbu studovaných vzorků amfibolitů.

Při sorpčních experimentech byly analyzovány distribuční koeficienty (K_d) pro cesium (¹³⁷Cs) a stroncium (⁸⁶Sr). Amfibolit vykazuje obecně nižší sorpční kapacitu, kdy se hodnoty K_d pro cesium pohybují mezi 2–109 ml/g, zatímco pro stroncium se hodnoty K_d pohybují mezi 1,07–13,3 ml/g. Biotitický migmatit má výrazně vyšší sorpční kapacitu, což dokládají hodnoty K_d pro cesium v rozmezí 3–857 ml/g, a pro stroncium 1,1 až 20,37 ml/g. Nejvyšší hodnoty K_d byly naměřeny pro nízké koncentrace stopovače 1·10⁻⁹ mol/l, kdy byly naměřeny maximální hodnoty K_d pro Cs (857±374 ml/g) a pro stroncium (20,37±3,74 ml/g) ve vodě SGW3. Zatímco při koncentraci neaktivního nosiče 1·10⁻³ mol/l dochází k úplnému nasycení sorpčních míst neaktivním nosičem. Porovnáním hodnot sorpce Cs mezi prostředími s ekvilibrovanými SGW2 a SGW3 nebyly identifikovány statisticky významné rozdíly. V procentuálním vyjádření sorpce se rozdíly pohybují v rozmezí 2–3 %. 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, přičemž hodnoty K_d v prostředí SGW3 jsou mírně vyšší díky absenci konkurenčních kationtů, jako je vápník a hořčík.

Fyzikální vlastnosti hornin potvrzují rozdílný charakter obou typů. Amfibolit je tvořen dominantním podílem amfibolu a plagioklasu, s pórovitostí (0,37–0,81 %) a hustotou přibližně 2941 kg/m³. Naproti tomu biotitický migmatit je jemnozrnný až drobnozrnný s páskovanou strukturou, obsahující vyšší podíly biotitu a křemene. Pórovitost migmatitu se pohybuje mezi 0,2–1,09 % a hustota kolem 2 709 kg/m³.

2.6 Stanovení fyzikálně mechanických a geotechnických vlastností hornin laboratorními testy

V rámci laboratorního stanovení fyzikálně-mechanických a geotechnických vlastností (FMV) hornin byly Ústavem geoniky AV ČR, v.v.i. (ÚGN), společností SG Geotechnika, a.s. (SGG) a dodavatelem J. Hanákem v průběhu roku 2024, v souladu s harmonogramem prací uvedeným v kap. 3 Realizačního projektu, uskutečněny tyto níže uvedené práce.

V první polovině měsíce září 2023 byly ve staničení 32 m chodby L5, 62 m L5 a 47 m L4a odvrtány širokoprofilové jádrové vrty o průměru 300 mm, označené jako L5-32P, L5/62L a L4a/47R. Jednotlivé kusy získaného vrtného jádra byly následně pracovníky DIAMO, s.p., o.z. GEAM vyvezeny na povrch a uskladněny v areálu dolu Rožná I. Ve dnech 21.–23. 9. 2023 pak byly velkoobjemové vzorky (VO) transportovány do laboratoří ÚGN a SGG. Zde proběhla příprava laboratorních zkušebních tělísek pro jednotlivé zkoušky FMV a bylo provedeno stanovení FMV dle jejich výčtu uvedeného v kap. 2.7.1 Realizačního projektu (Bukovská et al. 2021). Zkušební tělíska o průměru cca 47–50 mm a štíhlostním poměru 2 : 1, 1 : 1 a 0,7 : 1 byly vrtány ve dvou základních směrech vůči texturním prvkům horniny – ve směru kolmém k metamorfní foliaci (tzv. směr K) a ve směru rovnoběžném s metamorfní foliací (tzv. směr P). Část FMV VO vzorku L5-32P, konkrétně objemová hmotnost, rychlost šíření podélných ultrazvukových vln, nasákavost po 48 hodinách, tepelná vodivost, tepelná kapacita, tepelná difuzivita a pevnost v příčném tahu byly prezentovány v průběžné zprávě za rok 2023 (Soejono et al. 2024). Výsledky provedených stanovení zbývajících FMV VO vzorku z chodby L5 (evid. č. ÚGN 17363) jsou pak přehlednou tabelární formou prezentovány v této průběžné zprávě, a to v následujících podkapitolách 2.6.1. až 2.6.4.

Po stanovení příslušných FMV byl na většině z celkem 102 připravených zkušebních tělísek makropetrograficky stanoven typ horniny, určení provedla dr. Tereza Zelinková z ČGS. Výsledky petrografického zařazení jsou schematicky prezentovány v Tab. 24.

K1	K11	K21	K31	P1	P11	P21	P31	B1	B11	B21
K2	K12	K22	K32	P2	P12	P22	P32	B2	B12	B22
K3	K13	K23	K33	P3	P13	P23	P33	В3	B13	B23
K4	K14	K24	K34	P4	P14	P24	P34	B4	B14	B24
K5	K15	K25		P5	P15	P25	P35	B5	B15	B25
K6	K16	K26		P6	P16	P26	P36	B6	B16	B26
K7	K17	K27		P7	P17	P27	P38	B7	B17	B27
K8	K18	K28		P8	P18	P28	P38	B8	B18	B28
K9	K19	K29		P9	P19	P29		B9	B19	B29
K10	K20	K30		P10	P20	P30		B10	B20	B30

Tab. 24 Petrografické zařazení jednotlivých zkušebních tělísek VO vzorku z vrtu L5-32P (evid. č. ÚGN 17363)

<u>Vysvětlivky</u>: **světle zeleně** – amfibolit, **žlutohnědě** – migmatitizovaný amfibolit, **červeně** – migmatit, K – tělíska navrtaná kolmo k foliaci (štíhlostní poměr 2 : 1), P – tělíska navrtaná rovnoběžně s foliací (štíhlostní poměr 2 : 1), B – tělíska na tzv. brazilskou zkoušku, navrtána // s foliací (štíhlostní poměr 0,7 : 1)

Jak vyplývá z Tab. 24, zcela dominantně zastoupenými horninovými typy ve VO vzorku z vrtu L5-32P jsou amfibolity (58 tělísek, tj. 57 % z celkového počtu petrograficky určených zkušebních tělísek) a migmatitizované amfibolity (43, cca 42 %), naprosto okrajově pak migmatity (1, cca 1 %).

Vzorky L5/62L (laboratorní čísla 86207 a 86208) a L4a/47R (laboratorní čísla 86205 a 86206) byly popsány jako středně zrnitý biotitický migmatit, resp. středně zrnitý slabě migmatitizovaný amfibolit.

2.6.1 Fyzikální vlastnosti

2.6.1.1 Vzorek L5-32P

Na zkušebních tělíscích připravených z VO vzorku z vrtu L5-32P byly v průběhu roku 2024 stanoveny následující fyzikální vlastnosti hornin: měrná hmotnost, celková pórovitost, nasákavost po 96 hodinách a do ustálení hmotnosti, otevřená (zdánlivá) pórovitost, charakterizace pórového prostoru pomocí rtuťové porozimetrie (MIP), koeficient hydraulické vodivosti horniny a plynopropustnost horniny při různých plášťových tlacích. Výsledky stanovení jsou uvedeny v Tab. 25, Tab. 26, Tab. 27,

Tab. 28, Tab. 29, Obr. 119, Obr. 120 a Obr. 121.

Tab. 25 Výsledky stanovení základních fyzikálních vlastností horniny VO vzorku z vrtu L5-32P (evid. č. ÚGN 17363)

Vlastnost	Jednotka	Počet stanovení	Minimální hodnota	Maximální hodnota	Ø	S.D.	C.V. [%]
Měrná hmotnost	kg⋅m ⁻³	17	2863	2988	2933	43	1,5
Celková pórovitost	%	17	0,07	1,47	0,76	0,47	61,8
Nasákavost po 96 hodinách	%	8	0,12	0,15	0,13	0,01	7,7
Nasákavost do ustálení hmotnosti	%	8	0,13	0,16	0,15	0,01	6,7
Otevřená pórovitost	%	8	0,38	0,50	0,45	0,04	8,9

Vysvětlivky: Ø - aritmetický průměr, S.D. – směrodatná odchylka, C.V. – variační koeficient

Tab. 26 Parametry pórovitosti horniny VO vzorku z vrtu L5-32P (evid. č. ÚGN 17363)

Označení	Celkový obiem	Průměrná Pórovitost		mocí MIP [%]
zkušebního tělíska	pórů [cm ³ .g ⁻¹]	velikost póru (4V/A) [µm]	dílčí hodnoty	průměr
17363/K8B/6	0,0030	0,0163	0,82	0.70
17363/P8B/1	0,0027	0,0125	0,74	0,78

11000)					
Označení zkušebního tělíska	Objemová hmotnost [kg.m ⁻³]	Průměr k ₁₀ [m.s ⁻¹]	Směrodatná odchylka [m.s ⁻¹]	Variační koeficient [%]	Počet měření
17363/K7A	2927	průtok pod mezí detekce			5
17363/K7B	2908	průt	5		
17363/K8A	2923	průt	5		
17363/P7A	2948	průtok pod mezí detekce			5
17363/P7B	2952	průtok pod mezí detekce			4
17363/P8A	2948	průtok pod mezí detekce			4

Tab. 27 Koeficient hydraulické vodivosti při 10°C (k_{10}) horniny VO vzorku z vrtu L5-32P (evid. č. ÚGN 17363)

Tab. 28 Koeficient plynopropustnosti horniny VO vzorku z vrtu L5-32P (evid. č. ÚGN 17363)

Označení zkušebního tělíska	Objemová hmotnost [kg.m ⁻³]	Boční tlak [MPa]	Objemový průtok [m³.s ⁻¹]	Koeficient plynopropustnosti k _p [m²]
		3	2,0E-06	1,9E-17
		4	6,7E-09	6,5E-20
17363/K17	2927	5	4,0E-09	3,9E-20
		7,5	1,9E-09	1,9E-20
		10	1,1E-09	1,1E-20
		3	1,5E-06	1,4E-17
		4	2,5E-07	2,4E-18
		4,5	1,5E-08	1,4E-19
17363/P17	2964	5	1,1E-08	1,0E-19
		7,5	3,7E-09	3,5E-20
		10	1,2E-09	1,1E-20
		12,5	3,3E-10	3,2E-21
		3	4,2E-06	4,0E-17
		4	4,4E-08	4,3E-19
		5	2,5E-08	2,4E-19
		7,5	1,4E-08	1,3E-19
17363/P18	2967	10	1,0E-08	9,7E-20
		12,5	6,9E-09	6,7E-20
		15	4,8E-09	4,6E-20
		17,5	3,3E-09	3,2E-20
		20	2,9E-09	2,8E-20



Obr. 119 Plynopropustnost horniny VO vzorku z vrtu L5-32P (evid. č. ÚGN 17363, zkušební tělísko K17 navrtáno kolmo k foliaci)



Obr. 120 Plynopropustnost horniny VO vzorku z vrtu L5-32P (evid. č. ÚGN 17363, zkušební tělísko P17 navrtáno rovnoběžně s foliací)



Obr. 121 Plynopropustnost horniny VO vzorku z vrtu L5-32P (evid. č. ÚGN 17363, zkušební tělísko P18 navrtáno rovnoběžně s foliací)

2.6.1.2 Vzorek L5/62L

Výsledky laboratorních zkoušek fyzikálních vlastností realizovaných v laboratoři SG Geotechnika jsou obsahem následující tabulky (Tab. 29). Z výsledků je patrná nízká pórovitost a s ní související propustnost horninové matrice. Objemová hmotnost se pohybuje mezi 2700 a 2800 kg.m⁻³. Rychlost průchodu P-vln ve směru kolmo na foliaci je o 13 až 19 % nižší než ve směru paralelním s foliací.

Vzorek	Nasákavost [%]	Otevřená pórovitost [%]	Celková pórovitost [%]	Specifická hmotnost [kg.m ^{.3}]	Objemová hmotnost [kg.m ^{.3}] min/max	Rychlost P-vln [km.s ⁻¹] min/max	Plynopropustn ost [m²] při 3 MPa	Koeficient hydraulické vodivosti [m.s ^{.1}]
86207 kolmo	0,11	0,24	0,92- 5,07*	2840	2696/ 2814	4,658/ 5,732	3,5 ×10 ⁻¹⁷	<1,0 ×10 ⁻¹⁴
86208 paraleln ě	0,09	0,30	2,08- 5,31*	2842	2691/ 2783	5,067/ 5,819	3,5 ×10 ⁻¹⁷	<1,0 ×10 ⁻¹⁴

Tab. 29 Výsledky stanovení fyzikálních vlastností horniny VO vzorku ze staničení 62 m chodby L5

* Pozn. Nelze vyhodnotit. Hodnota specifické hustoty je nižší než hodnota suché objemové hmotnosti.

Označení	Celkový obiem	Průměrná	Pórovitost pomocí MIP [%]		
zkušebního tělíska	pórů [cm³.g⁻¹]	velikost póru [µm]	dílčí hodnoty	průměr	
L5/62L/K	0,0005	3,9036	0,14	0.40	
L5/62L/P	0,0008	16,9249	0,22	0,18	

Tab. 30 Výsledky stanovení rtuťové porozimetrie vzorku L5/62L

Detaily vyhodnocení rtuťové porozimetrie jsou součástí elektronické přílohy (Elektronická příloha 11).

2.6.1.3 Vzorek L4a/47R

Výsledky laboratorních zkoušek fyzikálních vlastností realizovaných v laboratoři SG Geotechnika jsou obsahem následující tabulky (Tab. 31). Z výsledků je patrná nízká pórovitost a s ní související propustnost horninové matrice. Objemová hmotnost se pohybuje mezi 2850 a 2950 kg.m⁻³. Rychlost průchodu P-vln ve směru kolmo na foliaci je o 5 až 8 % nižší než ve směru paralelním s foliací.

Tab. 31 Výsledky stanovení fyzikálních vlastností horniny VO vzorku ze staničení 47 m chodby L4a

Vzorek	Nasákavost [%]	Otevřená pórovitost [%]	Celková pórovitost [%]	Specifická hmotnost [kg.m ^{.3}]	Objemová hmotnost [kg.m ⁻³]	Rychlost P-vln [km.s ⁻¹]	Plynopropustn ost [m²] při 3 MPa	Koeficient hydraulické vodivosti [m.s ^{.1}]
86205 kolmo	0,16	0,37	2,59*	2970	2893/ 2979	6,003/ 6,500	8,6 ×10 ⁻¹⁷	<1,0 ×10 ⁻¹⁴
86206 paraleln ě	0,14	0,34	2,80*	2928	2846/ 2931	6,003/ 6,332	2,0 ×10 ⁻¹⁷	<1,0 ×10 ⁻¹⁴

* Pozn. Nelze vyhodnotit. Hodnota specifické hustoty je nižší než hodnota suché objemové hmotnosti.

Tab. 32 Výsledky stanovení rtuťové porozimetrie vzorku L4a/47R

Označení Celkový obiem Průměrná		Pórovitost pomocí MIP [%]		
zkušebního tělíska	pórů [cm ³ .g ⁻¹]	velikost póru [µm]	dílčí hodnoty	průměr
L4a/47R/K	0,0003	5,5845	0,09	0.01
L4a/47R/P	0,0011	14,1260	0,33	0,21

Detaily vyhodnocení rtuťové porozimetrie jsou součástí elektronické přílohy (Elektronická příloha 11).

2.6.2 Tepelné vlastnosti

2.6.2.1 Vzorek L5-32P

V rámci studia tepelných vlastností horniny z vrtu L5-32P byla v roce 2024 studována teplotní roztažnost. Zde je třeba poznamenat, že na rozdíl od VO vzorků ev. č. ÚGN 16962 a 17074, jejichž teplotní roztažnost byla prezentována v průběžných zprávách za roky 2021 (Bukovská et al. 2022) a 2022 (Bukovská et al. 2023), byl u vzorku z vrtu L5-32P tento parametr stanoven na větších vzorcích tvaru válečku o průměru cca 48mm a délce cca 96mm, a to subdodavatelsky na Experimentálním centru Fakulty stavební ČVUT v Praze. Důvodem této skutečnosti byla dlouhodobá porucha dilatometru na ÚGN. Výsledky stanovení jsou uvedeny v Obr. 122, Obr. 123 a Tab. 33.



Obr. 122 Závislost absolutního a poměrného délkového přetvoření na teplotě u tělíska 17363/K18 (ohřev do 150 °C, válcový vzorek o průměru 48 mm a délce 96 mm, vzorek vyvrtán kolmo na foliaci)



Obr. 123 Závislost absolutního a poměrného délkového přetvoření na teplotě u tělíska 17363/P27 (ohřev do 150 °C, válcový vzorek o průměru 48 mm a délce 96 mm, vzorek vyvrtán rovnoběžně s foliací)

Tab 00 Kasfisis at tablatai	re-teže esti le ereire r	$1/0$ $\cdot \cdot \cdot \cdot \cdot - \cdot $		1 × 110N1 47060
	m_{2}	V(J)VZOYKIJZVITIJI	5-3/P (PVIO	C 11(-1) 1/3031

Označení zkušebního tělíska	Rozměry zkušebního tělíska [mm]	Teplota ohřevu [ºC]	Rychlost ohřevu [°C/min]	Orientace vůči foliaci	α [K ⁻¹]
17363/K18	96 x 48	150	1	\perp	4,5·10 ⁻⁶
17363/P27	96 x 48	150	1		4,6·10 ⁻⁶

2.6.2.2 Vzorek L5/62L

Výsledky laboratorních zkoušek tepelných vlastností realizovaných v laboratoři SG Geotechnika jsou obsahem následující tabulky (Tab. 34). Z výsledků je patrné, že je tepelná vodivost vyšší ve směru paralelním s foliací než ve směru kolmo na ní.

Tab. 34 Výsledky stanovení tepelných vlastností horniny VO vzorku ze staničení 62 m chodby L5

Vzorek	Tepelná vodivost [W.m ^{.1} .K ^{.1}]	Tepelná kapacita [MJ.m ⁻³ .K ⁻¹]	Teplotní roztažnost [μm.m⁻¹]
86207 kolmo	2,08	2,02	9
86208 paralelně	2,47	2,16	9

2.6.2.3 Vzorek L4a/47R

Výsledky laboratorních zkoušek tepelných vlastností realizovaných v laboratoři SG Geotechnika jsou obsahem následující tabulky (Tab. 35). Z výsledků je patrné, že je tepelná vodivost ve směru paralelním s foliací a ve směru kolmo na ní podobná.

Tab. 35 Výsledky stanovení tepelných vlastností horniny VO vzorku	ze staničení 47 m chodby L4a
---	------------------------------

Vzorek	Tepelná vodivost [W.m ^{.1} .K ^{.1}]	Tepelná kapacita [MJ.m ⁻³ .K ⁻¹]	Teplotní roztažnost [μm.m ⁻¹]
86205 kolmo	2,08	2,11	5
86206 paralelně	2,09	2,10	6

2.6.3 Pevnostní a deformační vlastnosti

2.6.3.1 Vzorek L5-32P

Ve smyslu kap. 2.7.1 Realizačního projektu (Bukovská et al. 2021) byly stanoveny tyto pevnostní a deformační vlastnosti horniny VO vzorku z vrtu L5-32P: pevnost v prostém tlaku, modul přetvárnosti a Poissonovo číslo při zkoušce v prostém tlaku, modul přetvárnosti a elasticity při cyklickém zatěžování a pevnost v tlaku a modul přetvárnosti za trojosého stavu napjatosti. Pevnostní a deformační vlastnosti v prostém tlaku byly stanoveny jak v laboratořích ÚGN, tak také ve Zkušební laboratoři Výzkumného centra hornin Hornicko-geologické fakulty VŠB-TU Ostrava (ZLVCH HGF VŠB-TUO). Provedení těchto srovnávacích zkoušek v nezávislé laboratoři je jedním z požadavků, uvedených v kap. 2.7.1 Realizačního projektu (Bukovská et al. 2021). Výsledky veškerých stanovení jsou prezentovány v Tab. 36, Tab. 37, Tab. 38 a Tab. 39. Výzkumná zpráva o výsledcích stanovení mechanických vlastností hornin, vypracovaná ZLVCH HGF VŠB-TUO, je pak obsahem Elektronická příloha 15.

Vlastnost	Jednotka	Počet stanovení	Minimální hodnota	Maximální hodnota	Ø	S.D.	C.V . [%]
б _{Рd} – <i>směr K</i>	MPa	6	184	250	215	26	12,2
б _{Рd} – <i>směr P</i>	MPa	6	123	228	190	39	20,3
E _{20-40%} – <i>směr K</i>	GPa	6	58,7	75,6	71,0	5,7	8,0
E _{20-40%} – <i>směr P</i>	GPa	6	69,4	93,5	78,7	8,6	10,9
µ – směr K	-	6	0,16	0,21	0,18	0,02	8,9
µ – směr P	_	6	0,20	0,21	0,21	0,01	2,4

Tab. 36 Hodnoty základních pevnostních a přetvárných vlastností horniny VO vzorku z vrtu L5-32P (evid. č. ÚGN 17363) – stanovení provedeno na ÚGN

<u>Vysvětlivky</u>: 6_{Pd} – pevnost v prostém tlaku, E_{20-40%} – modul přetvárnosti stanovený v rozsahu 20–40 % maximální působící síly, µ – Poisonovo číslo, Ø - aritmetický průměr, S.D. – směrodatná odchylka, C.V. – variační koeficient

Tab. 37 Hodnoty základních pevnostních a přetvárných vlastností horniny VO vzorku z vrtu L5-32P (evid. č. ÚGN 17363) – stanovení provedeno v ZLVCH HGF VŠB-TUO

Vlastnost	Jednotka	Počet stanovení	Minimální hodnota	Maximální hodnota	Ø	S.D.	C.V. [%]
б _{Рd} – <i>směr K</i>	MPa	6	195	249	221	21	9,5
б _{Рd} – <i>směr P</i>	MPa	6	124	237	194	44	22,7
E _{20-40%} – <i>směr K</i>	GPa	6	67,0	78,1	71,3	3,3	4,6
E _{20-40%} – <i>směr P</i>	GPa	6	63,1	92,9	81,6	10,0	12,3
μ – směr K	-	6	0,19	0,29	0,23	0,04	17,4
µ – směr P	_	6	0,02	0,37	0,23	0,12	52,2

<u>Vysvětlivky</u>: 6Pd – pevnost v prostém tlaku, E_{20-40%} – modul přetvárnosti stanovený v rozsahu 20–40 % maximální působící síly, µ – Poisonovo číslo, Ø - aritmetický průměr, S.D. – směrodatná odchylka, C.V. – variační koeficient

Tab. 38 Hodnoty pevnosti v prostém tlaku G_{Pd} , modulu přetvárnosti E_{1def} , E_{2def} a modulu pružnosti E_{1el} a E_{2el} a jejich poměrů na VO vzorku z vrtu L5-32P (evid. č. ÚGN 17363) v různých směrech zatěžování vůči metamorfní foliaci stanovené v režimu cyklického zatěžování

Označení zkušebního tělíska	б _{Рd} [MPa]	30 % maximálního tlakového zatížení		0 % 60 % málního maximálního ového tlakového tížení zatížení		Poměr E _{1def} /E _{1e} [-]	Poměr E _{2def} /E _{2e} [-]
		E _{1def} [GPa]	E _{1el} [GPa]	E _{2def} [GPa]	E _{2el} [GPa]		
17363/K9	262	64,1	70,5	71,0	77,2	0,91	0,92
17363/K10	214	67,0	72,2	72,5	77,6	0,92	0,93
17363/P9	245	80,3	82,5	85,3	87,0	0,97	0,98
17363/P10	229	83,1	84,9	83,5	87,6	0,98	0,95

Tab. 39 Hodnoty pevnosti a modulu přetvárnosti (20–40 % F_{max}) hornin VO vzorku z vrtu L5-32P (evid. č. ÚGN 17363) v trojosém stavu napjatosti při různém plášťovém tlaku v různých směrech zatěžování vůči metamorfní foliaci

Označení	Orientace zkušebního	Plášťový	Pevnost v trojosém stavu napjatosti [MPa]		Modul přetvárnosti	
tělíska	tělíska vůči foliaci	elíska vůči tlak [MPa] foliaci		Průměr	napjatosti [GPa]	
17363/K11			207		-	
17363/K12			195	-	_	
17363/K28		5	206	219	80,0	
17363/K29			243	-	74,9	
17363/K34			245	-	77,6	
17363/K15		7	258	260	_	
17363/K16		7	262	200	_	
17363/K13		10	331	210	_	
17363/K14		10	307	319	_	
17363/K30		45	305	202	82,1	
17363/K31		15	301	303	83,6	
17363/K32		20	331	338	83,5	
17363/K33		30	345		84,4	
17363/P12			193	210	_	
17363/P13		E	223		_	
17363/P31		5	153		78,9	
17363/P32			272		89,6	
17363/P19		7	221	060	_	
17363/P26		7	304	203	_	
17363/P14			283		_	
17363/P15	//	10	320	306	_	
17363/P16			316		_	
17363/P33			206		91,8	
17363/P34		15	316	272	85,9	
17363/P37			294		87,5	
17363/P35			360		98,8	
17363/P36		30	359	392	87,2	
17363/P38			457		87,8	

Jak vyplývá ze srovnání hodnot FMV uvedených v Tab. 33 a Tab. 34 byla dosažena velmi dobrá shoda výsledků ÚGN a ZLVCH HGF VŠB-TUO. Rozdíly jsou způsobeny přirozenou variabilitou hornin a v případě E a µ i rozdílným způsobem měření deformací (LVDT snímače vers. lepené tenzometry).

2.6.3.2 Vzorek L5/62L

Výsledky laboratorních zkoušek pevnostních a deformačních vlastností realizovaných v laboratoři SG Geotechnika jsou obsahem následující tabulky (Tab. 40). Z výsledků je patrné, že pevnost horniny je vyšší ve směru paralelně s foliací než kolmo k ní.

Pevnostní a deformační vlastnosti v prostém tlaku byly stanoveny jak v laboratořích SG Geotechnika, tak v laboratoři Geologického ústavu Akademie věd České republiky. Provedení těchto srovnávacích zkoušek v nezávislé laboratoři je jedním z požadavků, uvedených v kap. 2.7.1 Realizačního projektu (Bukovská et al. 2021). Z výsledků uvedených v tabulkách (Tab. 40, Tab. 41) je patrné, že v laboratoři ÚGN byly naměřeny nižší hodnoty přetvárných modulů i pevností v prostém tlaku. Důvodem může být heterogenita dodaného materiálu. Detaily výsledků jsou obsahem elektronické přílohy (Elektronická příloha 12). V této příloze jsou rovněž obsaženy výsledky pevnosti v triaxiálním tlaku všech třech vzorků, které byly testovány v laboratoři SG Geotechnika. Důvodem je, že vlastní laboratoř nedisponuje triaxiální komorou.

Tab. 40 Výsledky stanovení pevnostních a deformačních vlastností horniny VO vzorku ze staničení 62 m chodby L5

Vzorek	Pevnost v příčném tahu [MPa]	Pevnost v prostém tlaku [MPa]	Pevnost v triaxiálním tlaku m [-]	Modul pružnosti [GPa]*	Modul přetvárnosti [GPa]*	Poissonovo číslo [-]*
86207 kolmo	16,0	136,3	11,1	72,6	71,1	0,23
86208 paralelně	10,2	144,1	13,5	89,2	85,8	0,24

*Pozn. Vyhodnoceno v oboru napětí 20-40 % UCS.

Tab. 41 Výsledky stanovení pevnostních a deformačních vlastností horniny VO vzorku ze staničení 62 m chodby L5 v laboratoři Geologického ústavu Akademie věd České republiky

Vzorek	Pevnost v prostém tlaku [MPa]	Modul přetvárnosti [GPa]	Poissonovo číslo [-]
L5/62L/K	87,3	42,0	0,12
L5/62L/P	87,8	71,4	0,25

2.6.3.3 Vzorek L4a/47R

Výsledky laboratorních zkoušek pevnostních a deformačních vlastností realizovaných v laboratoři SG Geotechnika jsou obsahem následující tabulky (Tab. 42). Z výsledků je patrné, že pevnost horniny je vyšší ve směru kolmém na foliaci než paralelně s ní.

Tab. 42 Výsledky stanovení pevnostních a deformačních vlastností horniny VO vzorku ze staničení 47 m chodby L4a

Vzorek	Pevnost v příčném tahu [MPa]	Pevnost v prostém tlaku [MPa]	Pevnost v triaxiálním tlaku m [-]	Modul pružnosti [GPa]*	Modul přetvárnosti [GPa]*	Poissonovo číslo [-]*
86205 kolmo	16,6	182,5	12,1	82,5	83,4	0,23
86206 paralelně	15,4	166,1	14,7	75,6	69,2	0,26

*Pozn. Vyhodnoceno v oboru napětí 20-40 % UCS.

2.6.4 Technologické vlastnosti

2.6.4.1 Vzorek L5-32P

Z technologických vlastností byla na dvou zkušebních tělíscích, připravených z VO vzorku z vrtu L5-32P, stanovena abrazivnost metodou CERCHAR. Měření bylo provedeno v laboratořích fy. SG Geotechnika, a.s., výsledky jsou uvedeny v Tab. 43.

Tab. 43 Hodnoty parametru CAI (CERCHAR Abrasivity Index), stanovené na horninách VO vzorku z vrtu L5-32P (evid. č. ÚGN 17363)

Označení zkušebního tělíska	Orientace vůči foliaci	Objemová hmotnost [kg⋅m⁻³]	Abrazivnost CAI	Klasifikace abrazivnosti podle CAI
17363/K19	\perp	2881	4,58	extrémně vysoká
17363/P28		3009	3,46	vysoká

2.6.4.2 Vzorek L5/62L

Výsledky laboratorních zkoušek technologických vlastností realizovaných v laboratoři SG Geotechnika jsou obsahem následující tabulky (Tab. 44). Z výsledků je patrné, že abrazivnost horniny je vysoká.

Tab. 44 Výsledky stanovení technologických vlastností horniny VO vzorku ze staničení 42,3 m chodby L8

Vzorek	Abrazivnost CAI [-]
86207 kolmo	3,3
86208 paralelně	3,5

2.6.4.3 Vzorek L4a/47R

Výsledky laboratorních zkoušek technologických vlastností realizovaných v laboratoři SG Geotechnika jsou obsahem následující tabulky (Tab. 45). Z výsledků je patrné, že abrazivnost horniny je extrémně vysoká.

Tab. 45 Výsledky stanovení technologických vlastností horniny VO vzorku ze staničení 42,3 m chodby L8

Vzorek	Abrazivnost CAI [-]
86205 kolmo	4,0
86206 paralelně	4,2

2.6.5 Petrofyzikální vlastnosti

V roce 2024 byly petrofyzikální parametry stanoveny na vzorcích ze tří lokalit velkoobjemových vzorků v chodbách L4a a L5. Vzorky z lokalit L4a–47R a L5–62L reprezentují migmatity až migmatitizované pararuly a vzorky z lokality L5–32P jsou amfibolit až amfibolická rula. Na těchto vzorcích byly stanoveny hustotní parametry (objemová a mineralogická hustota a pórovitost), dále magnetická susceptibilita, elektrická konduktivita, radioaktivita a anizotropie magnetické susceptibility. Úpravy vzorků, metodiky měření a výsledky jsou popsány v následujících kapitolách.

2.6.5.1 Úpravy vzorků a metodika měření

Z kusových velkoobjemových vzorků L4a–47R, L5–32P a L5–62L byla odvrtána jádra o průměru 48 mm, a to ve směrech kolmo na foliaci a rovnoběžně s foliací. Vzorky byly dále upraveny na délku 40 mm, která je požadována pro metodiku petrofyzikálních měření. Metodiky jsou blíže specifikovány v práci Hanák et al. (2017). Celkem bylo připraveno 14 vzorků, na nichž byly stanoveny hustotní parametry a magnetická susceptibilita. Podle relativní látkové homogenity určené z těchto měření byly vybrány tři vzorky orientované kolmo na foliaci pro stanovení anizotropie magnetické susceptibility. Tyto byly pak také použity pro stanovení elektrické konduktivity, kde byly doplněny o další tři rovnoběžně s foliací.

Odřezky vzorků z každého z VO vzorků byly pak využity pro stanovení obsahů přirozených radioaktivních prvků. Radioaktivní parametry byly měřeny na RT-50 – Laboratorní scintilační spektrometr, výrobce Georadis, s.r.o., Brno. Stanovené měřidlo č. 007, platnost ověření ČMI do 31.12.2022, etalony IAEA Vídeň (RG set) + etalon U (Georadis), měření provedl Ing. Ivan Kašparec. Ve stejné firmě byla provedena stanovení elektrické konduktivity – Mgr. Jindřich Žižka, Ph.D. Zde byla použita metoda vyžadující podrcení vzorků na frakci pod 3 mm. Důvodem bylo snaha stanovit radioaktivní nerovnováhu mezi U a eU. Tato měření byla vždy opakována nejméně devětkrát z důvodů citlivosti použité metody. Radioaktivní nerovnováha je důležitým indikátorem recentních a subrecentních procesů v hornině.

Z obsahů radioaktivních prvků byla vypočtena tepelná produkce (HPU). Formule námi používaná (převzato z Hanák et al. 2017) má podobu:

$$HPU = Do^{*}(ekvTh^{*}26, 61 + ekvURa^{*}96, 96 + K^{*}35, 8/1000)$$
(35)

kde obsahy eTh a eU jsou udány v ppm, K v %, Do znamená objemovou hustotu v g.cm-3.

Objemová hustota potřebná pro výpočet je průměr ze stanovení objemových hustot odpovídajících sloučeným vzorkům pro stanovení radioaktivity. Z jednotlivých lokalit tak byly použity aritmetické průměry AM:

VO vzorek L4a-47R, objemová hustota 2,872 (g.cm⁻³),

VO vzorek L5-32P, objemová hustota 2,89 (g.cm⁻³),

VO vzorek L5-62L, objemová hustota 2,788 (g.cm⁻³).

Přehled všech provedených laboratorních stanovení z VO vzorků L4a–47R, L5–32P, L5–62L udává Tab. 46.

Tab	46 Seznam	n měřených	vzorků z lokal	it I 4a_47R I	15-32P	15-62La	stanovené	narametrv
Tab.	TO SEZHAN	i inci ci iyon	vzorku z lokal	ι μπα-πιπ, μ	LU-JZI,	L0-02L a	Stanovene	parametry

Pořadové		Orientace vzorku							
vzorku	VO vzorek – vzorek	foliaci	Použité petrofyzikální metody	Poznámka					
1	L4a-47R-K	К	Do, Dm, p, k	kontrolní vzorek					
2	L4a-47R-P	Р	Do, Dm, p, k	kontrolní vzorek					
3	L4a-47R-1 P	Р	Do, Dm, p, k, EL						
4	L4a-47R-2 P	Р	Do, Dm, p, k						
5	L4a-47R-1 K	К	Do, Dm, p, k, AMS, EL						
6	L4a-47R-2 K	К	Do, Dm, p, k	*R					
7	L5-32P-1 K	Р	Do, Dm, p, k, AMS, EL						
8	L5-32P-2 K	К	Do, Dm, p, k						
9	L5-32P-1 P	Р	Do, Dm, p, k, EL						
10	L5-32P-2 P	Р	Do, Dm, p, k	*R					
11	L5-62L-1 K	К	Do, Dm, p, k, AMS, EL						
12	L5-62L-2 K	К	Do, Dm, p, k						
13	L5-62L-1 P	Р	Do, Dm, p, k						
14	L5-62L-2 P	Р	Do, Dm, p, k, EL	*R					
	Vysvětlivka: D	o – objemová	hustota, Dm – mineralogická hustota,	<i></i>					
	p – pórovitost, k – magnetická susceptibilita, EL – elektrická vodivost,								
	R – radioaktivita, AMS – anizotropie magnetické susceptibility.								
	* na radioaktivitu	byly vždy slou	učeny odřezky ze vzorků příslušné lokalit	У					

2.6.5.2 Výsledky stanovení hustotních parametrů, magnetické susceptibility, obsahů radioaktivních prvků a elektrické konduktivity

Stanovené fyzikální parametry jsou hodnoceny podle jednotlivých vzorků v kapitole 0. Anizotropie magnetické susceptibility je hodnocena v kapitole 2.6.5.3, závěry a vzájemné porovnání vzorků z hlediska fyzikálních parametrů je pak v kapitole 2.6.1.

VO vzorek L4a–47R

Studované vzorky z tohoto VO vzorku (výrubu) lze předběžně charakterizovat jako migmatity až migmatitizované ruly. Tab. 47 udává hodnoty hustotních parametrů a magnetické susceptibility u 6 vzorků včetně základních statistických údajů. V Tab. 48 jsou uvedeny hodnoty obsahů radioaktivních prvků s vypočtenou tepelnou produkcí (HPU). Na Obr. 124 jsou graficky zobrazeny hodnoty mineralogických hustot (Dm), pórovitosti (p) a magnetické susceptibility (k). Hodnoty elektrické konduktivity, která je měřena ve spektru několika frekvencí, jsou uvedeny v tabulce a grafu v Obr. 125.

Hustotní parametry a magnetická susceptibilita

Tab. 47 Objemová hustota Do (g.cm⁻³), mineralogická hustota Dm (g.cm⁻³), pórovitosti p (%) a magnetická susceptibilit k (10⁻⁶ j.SI) – naměřené hodnoty, VO vzorek L4a–47R

VO vzorek L4a – 47R			Hustotní parametry a magnetická susceptibilita				
Pořadové číslo vzorku	Vzorek	Orientace vzorku vůči foliaci	Objemová hustota (Do)	Mineralogická hustota (Dm)	Pórovitost (p)	Magnetická susceptibilita (k)	
			[g.cm ⁻³]	[g.cm ⁻³]	[%]	[10 ⁻⁶ j. SI]	
1	L4a-47R *	K	2,716	2,723	0,24	3140,47	
2	L4a-47R *	Р	2,757	2,765	0,27	1736,38	
aritmetický průměr		AM	2,737	2,744	2,744 0,255		
počet hodnot		Ν	2	2 2		2	
3	L4a-47R	1 P	2,865	2,873	0,26	372,40	
4	L4a-47R	2 P	2,899	2,904	0,20	404,57	
5	L4a-47R	1 K	2,829	2,834	0,18	302,22	
6	L4a-47R	2 K	2,893	2,898	0,17	410,65	
aritmeticky	ý průměr	AM	2,872	2,877	0,20	372,46	
směrodatná odchylka		SD	0,027	0,028	0,03	43,08	
minimální hodnota		MIN	2,829	2,834 0,17		302,22	
maximální hodnota		MAX	2,899	2,904 0,26		410,65	
počet hodnot		N	4	4	4	4	
Vysvětlivka	řětlivka *Kontrolní vzorky více migmatitizované, K – kolmo, P – paralelně s foliací						



Obr. 124 Porovnání hodnot mineralogických hustot Dm (g.cm⁻³), pórovitosti p (%) a magnetických susceptibilit k (10⁻⁶ j.SI) u hornin z VO vzorku L4a–47R

Radioaktivita

VO vzorek L4a–47R			Obsahy radioaktivních prvků			
L4a-47R	Hmotnost (m)	Obsahy (K)	Obsahy (U)	Obsahy (eU)	Obsahy (eTh)	Tepelná produkce (HPU)
Spektrum	(g)	(%)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(µW.m ⁻³)
H23.001	248	0,66	2,7	4,3	8,8	1,94
H23.002	248	0,43	3,9	3,9	9,6	1,86
H23.003	248	0,50	3,7	4,2	8,7	1,89
H23.010	248	0,50	3,7	4,0	9,7	1,91
H23.011	248	0,63	3,2	3,8	9,7	1,86
H23.012	248	0,64	2,7	4,3	8,7	1,93
H23.018	248	0,69	3,1	4,0	9,5	1,91
H23.019	248	0,77	3,0	4,7	8,1	2,01
H23.020	248	0,66	3,0	4,2	9,3	1,95
aritmetick	ý průměr AM	0,61	3,22	4,16	9,12	1,92
směrodatná odchylka SD		0,10	0,42	0,25	0,53	0,04
minimální hodnota MIN		0,43	2,70	3,80	8,10	1,86
maximální hodnota MAX		0,77	3,90	4,70	9,70	2,01
počet hodnot N		9	9	9	9	9
Vysvětlivka	5	Směsný vzore	∍k z odřezků l	hustotních vzo	orků, měřeno 9 spe	kter

Tab. 48 Obsahy radioaktivních prvků K (%), U (ppm), eU (ppm) a eTh (ppm) a vypočtená tepelná produkce HPU (μW.m⁻³) u vzorků hornin z VO vzorku L4a–47R



Elektrická konduktivita (vodivost)

Obr. 125 Elektrická konduktivita stanovená na vzorcích z VO vzorku L4a–47R 1K (kolmo k foliaci) a 1P (rovnoběžně s foliací)

Vyhodnocení naměřených dat z VO vzorku L4a-47R

<u>Hustotní parametry (Do, Dm, p) a magnetická susceptibilita (k)</u> pro horniny z VO vzorku označené jako L4a–47R jsou uvedeny v Tab. 47 a graficky znázorněny na Obr. 124. V měřené sérii hornin z této lokality je nutné odděleně hodnotit vzorky L4a–47R*K a L4a–47R*P. Vzorky jsou silněji migmatitizované s menším podílem metatektu. Hodnoty mineralogických hustot jsou významně nižší než u zbývajících vzorků měřené série (AM = 2,744 g.cm⁻³). Hodnoty magnetické susceptibility jsou řádově vyšší (AM = 2438,42 10⁻⁶ j. SI) a zčásti (snad převážné) jsou dány přítomností feromagnetických minerálů (pravděpodobně magnetit).

Hodnoty mineralogických hustot u zbývajících vzorků série se pohybují mezi 2,834 g.cm⁻³ až po 2,904 g.cm⁻³, magnetická susceptibilita je poměrně nízká a vykazuje hodnoty mezi 302,22 10⁻⁶ j. SI až po 410,65 10⁻⁶ j. SI. Lze usoudit, že susceptibilita studovaných vzorků je převážně nesena paramagnetickými minerály (tmavé silikáty). Hustotně odpovídají tyto vzorky amfibolickým až amfibolicko-biotitickým rulám.

Hodnoty pórovitostí se pohybují mezi 0,17 až 0,26 %.

<u>Obsahy přirozených radioaktivních prvků</u> byly stanoveny na jednom vzorku (jak je zdůvodněno výše) - viz Tab. 48. Vlastní měření byla provedena devětkrát, a to z důvodů posouzení možné radioaktivní nerovnováhy mezi U a eU. Aritmetické průměry u obsahů K (0,61 %), U (3,22 ppm), eU (4,16 ppm), eTh (9,12 ppm). Tepelná produkce HPU (1,92 µW.m⁻³).

Porušení radioaktivní rovnováhy mezi obsahy U a eU je z poměru hodnot naznačeno, ale z těchto měření na jednom vzorku je nelze prokázat.

<u>Pro stanovení elektrické konduktivity</u> byly vzorky měřeny ve směru foliace (P) a kolmo na foliaci (K). Na grafu na Obr. 125 je zřejmé, že ve směru foliace jsou hodnoty elektrické konduktivity téměř dvakrát nižší než ve směru kolmém. U hornin tohoto petrografického typu to většinou bývá opačně, objasnění by přinesl podrobnější petrografický rozbor. Při frekvenci 1000 Hz má elektrická konduktivita ve směru

foliace hodnotu 2,999 (µS.m⁻¹), ve směru kolmém pak 4,697 (µS.m⁻¹). U jiných vzorků se mohou konduktivity významně lišit v závislosti na minerálním složení. Vzorky jsou měřeny tzv. v suchém stavu, tedy základním faktorem ovlivňujícím elektrickou konduktivitu je matrix horniny, vliv pórovitostí na vodivost by se projevil až po nasycení vzorků elektrolytem.

VO vzorek L5–32P

Studované vzorky z tohoto VO vzorku lze předběžně charakterizovat jako amfibolity až amfibolické ruly.

Tab. 49 udává hodnoty hustotních parametrů a magnetické susceptibility u 4 vzorků včetně základních statistických údajů. Na Obr. 126 je znázorněna distribuce hodnot mineralogické hustoty (Dm), magnetické susceptibility (k) a pórovitosti (p). V Tab. 50 jsou uvedeny hodnoty obsahů radioaktivních prvků s vypočtenou tepelnou produkcí (HPU) — směsný vzorek sestavený z odřezků z jednotlivých v hustotních vzorků.

Hodnoty elektrické konduktivity, která je měřena ve spektru několika frekvencí, jsou uvedeny v tabulce grafu Obr. 127

VO vzorek L5–32P			Hustotní parametry a magnetická susceptibilita				
Pořadové číslo vzorku	Vzorek	Orientace vzorku vůči foliaci	Objemová hustota (Do)	Mineralogická hustota (Dm)	Pórovitost (p)	Magnetická susceptibilita (k)	
			[g.cm ⁻³]	[g.cm ⁻³]	[%]	[10 ⁻⁶ j. SI]	
7	L5-32P	1 K	2,880	2,892	0,42	506,39	
8	L5-32P	2 K	2,920	2,934 0,48		544,44	
9	L5-32P	1 P	2,885	2,900 0,51		460,00	
10	L5-32P	2 P	2,874	2,887	0,47	519,91	
aritmetický průměr		AM	2,890	2,903	2,903 0,47		
směrodatná odchylka		SD	0,018	0,019	0,03	30,73	
minimální hodnota		MIN	2,874	2,887	0,42	460,00	
maximální hodnota		MAX	2,920	2,934 0,51		544,44	
počet hodnot		N	4	4	4	4	
Vysvětlivka	K – kolmo, P – paralelně s foliací						

Tab. 49 Objemová hustota Do (g.cm⁻³), mineralogická hustota Dm (g.cm⁻³), pórovitosti p (%) a magnetická susceptibilit k (10⁻⁶ j.SI) – naměřené hodnoty, VO vzorek L5–32P



Obr. 126 Porovnání hodnot mineralogických hustot Dm (g.cm⁻³), pórovitosti p (%) a magnetických susceptibilit k (10⁻⁶ j.SI) u hornin z VO vzorku L5–32P

Radioaktivita

Tab. 50 Obsahy radioaktivních prvků K (%), U (ppm), eU (ppm) a eTh (ppm) a vypočtená tepelná produkce HPU (μW.m⁻³) u vzorků hornin z VO vzorku L5–32P

VO vzorek L5 – 32P			Obsahy radioaktivních prvků				
L5-32P	Hmotnost (m)	Obsahy (K)	Obsahy (U)	Obsahy (eU)	Obsahy (eTh)	Tepelná produkce (HPU)	
spektrum	(g)	(%)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(µW.m ⁻³)	
H23.007	311	0,92	2,2	2,6	1,6	0,95	
H23.008	311	0,88	1,9	2,3	2,1	0,90	
H23.009	311	0,71	0,5	2,5	2,3	0,95	
H23.016	311	0,81	1,2	2,3	2,4	0,91	
H23.017	311	0,89	1,3	2,4	2,0	0,92	
H23.033	311	0,70	2,2	2,5	1,7	0,90	
H23.024	311	0,81	1,8	2,5	1,7	0,92	
H23.025	311	0,64	1,1	2,5	1,8	0,91	
H23.026	311	0,92	1,2	2,5	1,3	0,90	
aritmetický průměr AM		0,81	1,49	2,46	1,88	0,92	
směrodatná odchylka SD		0,10	0,54	0,10	0,33	0,02	
minimální hodnota MIN		0,64	0,50	2,30	1,30	0,90	
maximální hodnota MAX		0,92	2,20	2,60	2,40	0,95	
počet hodnot N		9	9	9	9	9	
Vysvětlivka	Směsný vzorek z odřezků hustotních vzorků, měřeno 9 spekter						


Elektrická konduktivita (vodivost)

Obr. 127 Elektrická konduktivita stanovená na vzorcích z VO vzorku L5–32P 1K (kolmo k foliaci) a 1P (rovnoběžně s foliací)

Vyhodnocení naměřených dat z VO vzorku L5–32P

<u>Hustotní parametry (Do, Dm, p) a magnetická susceptibilita (k)</u> pro horniny z VO vzorku označeného L5–32P jsou uvedeny v Tab. 49 a graficky znázorněny na Obr. 126.

Hodnoty mineralogických hustot se pohybují mezi 2,887 g.cm⁻³ až po 2,934 g.cm⁻³.

Magnetická susceptibilita vykazuje hodnoty mezi 460 10⁻⁶ j. SI až po 544,44 10⁻⁶ j. SI. Lze usoudit, že susceptibilita studovaných vzorků je převážně nesena paramagnetickými minerály (tmavé silikáty). Hustotně odpovídají tyto vzorky amfibolitům až amfibolicko-biotitickým rulám. Hodnoty pórovitostí se pohybují mezi 0,42 až 0,51 %.

Pórovitost je mírně vyšší, upozorňuje tak na možnou "alteraci" hornin. Obecně pórovitost kolem 0,5 % je považována jako indikátor možného postižení horniny druhotnými procesy. S vyšší pórovitostí klesá obvykle objemová hustota.

<u>Obsahy přirozených radioaktivních prvků</u> byly stanoveny na jednom vzorku (jak je zdůvodněno výše) – viz Tab. 50. Aritmetické průměry u obsahů radioaktivních prvků jsou vypočteny z 9 měření a jsou relativně nízké – K (0,81 %), U (1,49 ppm), eU (2,46 ppm), eTh (1,88 ppm). Tomu odpovídá i nízká tepelná produkce HPU 0,92 (µW.m⁻³).

Porušení radioaktivní rovnováhy mezi obsahy U a eU z těchto měření na jednom vzorku nelze potvrdit.

<u>Pro stanovení elektrické konduktivity</u> byly vzorky měřeny ve směru foliace (P) a kolmo na foliaci (K). Naměřená data a jejich závislost na frekvenci je součástí Obr. 127. Při frekvenci 1000 Hz má elektrická konduktivita ve směru kolmém hodnotu 0,6 (µS.m⁻¹), ve směru rovnoběžně s foliací pak 1,105 (µS.m⁻¹). Naměřené vodivosti jsou nízké, u jiných vzorků z tohoto výrubu (lokality) se však mohou konduktivity významně lišit v závislosti na minerálním složení.

VO vzorek L5–62L

Studované vzorky 0z této lokality byly charakterizovány jako migmatity. Tab. 51 udává hodnoty hustotních parametrů a magnetické susceptibility u 4 vzorků včetně základních statistických údajů. V Tab. 52 jsou uvedeny hodnoty obsahů radioaktivních prvků s vypočtenou tepelnou produkcí (HPU). Na Obr. 128 jsou graficky zobrazeny hodnoty mineralogických hustot a magnetické susceptibility. Hodnoty elektrické konduktivity jsou uvedeny v tabulce a grafu Obr. 129.

Tab.	51	Objemová	hustota	Do	(g.cm ⁻³),	mineralogická	hustota	Dm	(g.cm⁻³),	pórovitosti	р	(%)	а
magr	netic	ká suscepti	bilit k (10) ⁻⁶ j.S	sl) – name	ěřené hodnoty,	VO vzore	k L5	–62L				

VO vzo	orek L5 –	62L	Hustotní parametry a magnetická susceptibilita					
Pořadové číslo vzorku	Vzorek	Orientace vzorku vůči foliaci	Objemová hustota (Do)	Mineralogická hustota (Dm)	Pórovitost (p)	Magnetická susceptibilita (k)		
			[g.cm ⁻³]	[g.cm ⁻³]	[%]	[10 ⁻⁶ j. SI]		
11	L5-62L	1 K	2,752	2,758	0,20	1274,16		
12	L5-62L	2 K	2,855	2,858	0,10	534,30		
13	L5-62L	1 P	2,774	2,777	0,10	833,48		
14	L5-62L	2 P	2,772	2,776	0,16	8233,91		
aritmetický p	orůměr	AM	2,788	2,792	0,14	2718,96		
směrodatná o	dchylka	SD	0,040	0,039	0,04	3194,91		
minimální hodnota		MIN	2,752	2,758	0,10	534,30		
maximální hodnota		MAX	2,855	2,858	0,20	8233,91		
počet hodnot		N	4	4	4	4		
Vysvětlivka			K – koln	no, P – paralelně s t	foliací			



Obr. 128 Porovnání hodnot mineralogických hustot Dm (g.cm⁻³), pórovitosti p (%) a magnetických susceptibilit k (10⁻⁶ j. SI) u hornin z VO vzorku L5–62L

Radioaktivita

Tab. 52 Obsahy radioaktivních prvků K (%), U (ppm), eU (ppm) a eTh (ppm) a vypočtená tepelná produkce HPU (μW.m⁻³) u vzorků hornin z VO vzorku L5–62L

vo) vzorek L5 – 62	L	Obsahy radioaktivních prvků					
L5-32P	Hmotnost (m)	Obsahy (K)	Obsahy (U)	Obsahy (eU)	Obsahy (eTh)	Tepelná produkce (HPU)		
spektrum	(g)	(%)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(µW.m ⁻³)		
H23.004	305	1,62	1,0	1,8	7,8	1,23		
H23.005	305	1,64	1,1	2,5	6,8	1,34		
H23.006	305	1,62	1,8	2,1	7,2	1,26		
H23.013	305	1,69	2,5	2,2	6,6	1,25		
H23.014	305	1,63	1,9	2,6	6,2	1,33		
H23.015	305	1,52	3,8	2,2	6,9	1,26		
H23.021	305	1,54	1,2	2,1	7,1	1,25		
H23.022	305	1,59	2,5	2,1	7,4	1,28		
H23.023	305	1,72	1,2	2,2	7,1	1,29		
aritmeti	cký průměr	1,62	1,89	2,20	7,01	1,28		
směrodat	tná odchylka	0,06	0,87	0,22	0,44	0,04		
minimál	ní hodnota	1,52	1,00	1,80	6,20	1,23		
maximální hodnota		1,72	3,80	2,60	7,80	1,34		
poče	t hodnot	N	9	9	9	9		
Vysvětlivka Směsný vzorek z odřezků hustotních vzorků, měřeno 9 spekter						kter		

Elektrická konduktivita (vodivost)



Obr. 129 Elektrická konduktivita stanovená na vzorcích z VO vzorku L5–62L1K (kolmo k foliaci) a 2P (rovnoběžně s foliací)

Vyhodnocení naměřených dat z VO vzorku L5–62L

<u>Hustotní parametry (Do, Dm, p) a magnetická susceptibilita (k)</u> pro horniny z VO vzorku označeného L5–62 L jsou uvedeny v Tab. 51 a graficky znázorněny na Obr. 128.

Hodnoty mineralogických hustot u vzorků této série se pohybují mezi 2,758 g.cm⁻³ až po 2,858 g.cm⁻³. Ovšem magnetická susceptibilita vykazuje hodnoty s velkým rozptylem a to mezi 534,30 10⁻⁶ j.SI až po 8233,91 10⁻⁶ j. SI. Susceptibilita studovaných vzorků je pravděpodobně ovlivněna přítomností magnetitu – vzorky s vysokou susceptibilitou by si vyžadovaly bližší výzkum, např. použití termomagnetické analýzy k identifikaci nositelů magnetismu.

Hodnoty pórovitostí se pohybují mezi 0,10 až 0,20 %.

<u>Obsahy přirozených radioaktivních prvků</u> byly stanoveny na jednom vzorku (jak je zdůvodněno výše) - viz Tab. 52. Aritmetické průměry u obsahů radioaktivních prvků jsou vypočteny z 9 měření a jsou relativně nízké – K (1,62 %), U (1,89 ppm), eU (2,20 ppm), eTh (7,01 ppm). Tomu odpovídá i nízká tepelná produkce HPU 1,28 (µW.m⁻³).

Porušení radioaktivní rovnováhy mezi obsahy U a eU z těchto měření na jednom vzorku nelze potvrdit.

<u>Pro stanovení elektrické konduktivity</u> byly vzorky měřeny ve směru foliace (P) a kolmo na foliaci (K). Distribuce hodnot a tabulka naměřených vodivostí jsou součástí Obr. 129. Při frekvenci 1000 Hz má elektrická konduktivita ve směru kolmo na foliaci hodnotu 0,555 (µS.m⁻¹), ve směru paralelním pak 2,62 (µS.m⁻¹). Naměřené vodivosti jsou relativně nízké, se zvyšující frekvencí vodivost významně narůstá. U jiných vzorků z tohoto výrubu (lokality) se však mohou konduktivity významně lišit v závislosti na minerálním složení.

Fyzikálně odpovídají horniny z této lokality spíše migmatitizovaným amfibolickým rulám. Příčinou vyšších hodnot mineralogické hustoty u některých vzorků by mohl být přítomný granát.

2.6.5.3 Magnetická anizotropie VO vzorků L4a–47R, L5–32P a L5–62L

Metodika měření AMS

Měření a vyhodnocení magnetické anizotropie provedl prof. RNDr. František Hrouda, CSc. Vzorky byly měřeny pomocí střídavého můstku MFK1-FA ve firmě AGICO s.r.o. Brno. Byly měřeny válcové vzorky určené pro měření jiných fyzikálních vlastností hornin. Cílem bylo zjistit, jak jsou tyto vzorky orientovány vzhledem ke strukturním směrům horniny definovaným magnetickou vnitřní stavbou. Magnetická vnitřní stavba tak pomůže lépe identifikovat vnitřní stavbu horniny, která není makroskopicky příliš dobře viditelná. AMS orientovaných vzorků upravených do tvaru válce o průměru 48 mm a výšce 40 mm byla měřena pomocí střídavého můstku MFK1-FA (Pokorný et al. 2011) a vyhodnocena pomocí programů SAFYR a ANISOFT (autor M. Chadima). AMS horniny měřená ve slabém magnetickém poli je reprezentována symetrickým tenzorem druhého řádu, který ve svém tvaru odráží přednostní orientaci magnetických minerálů v hornině – magnetickou vnitřní stavbu horniny. Tato reprezentace, ač matematicky velmi výhodná, je však nenázorná a není užívána v geofyzikálních a geologických interpretacích. Místo tenzorového vyjádření se užívá tzv. geometrické reprezentace, která je založena na tom, že symetrický tenzor druhého řádu je možno převést na elipsoid, v našem případě elipsoid AMS. Tento elipsoid svou excentricitou, tvarem a orientací charakterizuje velmi názorně přednostní orientaci magnetických minerálů. Pro číselnou charakteristiku excentricity a tvaru elipsoidu susceptibility se užívá tzv. parametrů anizotropie, které jsou odvozeny z délek poloos elipsoidu a jsou definovány následovně

$$P = k_1/k_3$$
(36),

$$T = 2 \ln (k_2/k_3)/\ln (k_1/k_3) - 1,$$
(37),

kde $k_1 \ge k_2 \ge k_3$ jsou hodnoty hlavních susceptibilit.

Parametr *P*, zvaný stupeň magnetické anizotropie, indikuje intenzitu přednostní orientace magnetických minerálů v hornině a zvyšuje se s rostoucí intenzitou. Tvarový parametr *T* indikuje typ přednostní orientace magnetických minerálů. Parametr *T* dosahuje hodnot od -1 (dokonale lineární stavba magnetických minerálů), přes nulu (přechod od lineární k planární stavbě) po +1 (dokonale planární stavba). Oba parametry je výhodné graficky prezentovat v tzv. diagramu magnetické anizotropie (*T* vs. *P*). Kromě těchto dvou parametrů, které jsou základní důležitosti, se někdy pracuje ještě s dalšími parametry definovanými následovně

$L = k_1/k_2$	(38),
$F = k_2/k_3$	(39),
$U = (2 k_2 - k_1 - k_3) / (k_1 - k_3)$	(40).

Parametr *L* se nazývá magnetická lineace a udává intenzitu lineárního uspořádání v rovině proložené směry k_1 a k_2 a parametr L se nazývá magnetická foliace a udává intenzitu planárního uspořádání v rovině proložené směry k_2 a k_3 . Parametr *U* je určitá obdoba parametru *T*.

Kromě těchto parametrů se často užívá také hodnota střední susceptibility

$$K_m = (k_1 + k_2 + k_3) \tag{41},$$

která není parametrem AMS, ale její hodnota závisí na kvalitě a množství magnetických minerálů v hornině. Orientace os elipsoidu susceptibility definuje plochu magnetické foliace a směr magnetické lineace. Magnetická foliace je plocha, která prochází směrem maximální a prostřední susceptibility, a určuje průměrnou rovinu přednostní orientace větších ploch magnetických minerálů. Magnetická lineace je přímka daná směrem maximální susceptibility a určuje střední směr lineární orientace magnetických minerálů v hornině. Orientace magnetické foliace a lineace se standardně prezentují v plochojevné projekci na spodní polokouli.

Vyhodnocení výsledků stanovení AMS, VO vzorky L4a-47R, L5-32P a L5-62L

<u>Vyhodnocení výsledků stanovení AMS</u> je znázorněno na Obr. 130. Střední susceptibilita (*Kmean*) je střední, v řádu 10⁻³ (v systému SI). Z těchto hodnot můžeme soudit, že susceptibilita studovaných vzorků je zčásti nesena paramagnetickými (tmavé silikáty) a zčásti feromagnetickými minerály. Takovéto hodnoty susceptibility jsou charakteristické pro některé granitoidní horniny (zejména I – typu) a některé ortometamorfity. Stupeň anizotropie (P) je střední (P = 1,08, P = 1,12 a P = 1,34). Indikuje poměrně intenzívní přednostní orientaci magnetických minerálů. Magnetická vnitřní stavba vzorku L5–62–1K je téměř dokonale lineárně–planární, u vzorků L5–32P–1K a L4a–47R–1K je středně planární. Orientace magnetické foliace a lineace je prezentována v souřadné soustavě vzorku (osa válce leží ve středu plochojevné projekce). Pól magnetické foliace vzorku L5–62L–1K je dobře rovnoběžný s osou válcového vzorku, což svědčí o tom, že válec byl vyvrtán kolmo na horninovou foliaci. V případě vzorků L5–32P–1K a L4a–47R–1K a L4a–47R–1K se pól magnetické foliace mírně odchyluje od pólu horninové foliace. Magnetická lineace je podle definice AMS elipsoidu kolmá na pól magnetické foliace. U všech vzorků je blízká ploše foliace. Střední susceptibilita měřených vzorků metodou AMS se může mírně lišit od susceptibilit prezentovaných výše v tabulkách jednotlivých lokalit měřených v jednom směru.



Obr. 130 Magnetická anizotropie VO vzorků L4a–47R, L5–32P a L5–62L

2.6.5.4 Srovnání studovaných vzorků z hlediska petrofyzikálních parametrů

Porovnání stanovených fyzikálních parametrů je uvedeno na obrázcích Obr. 131 (mineralogická hustota, susceptibilita a pórovitost), Obr. 132 (obsahy radioaktivních prvků) a Obr. 133 (elektrická konduktivita)



Obr. 131 Porovnání průměrných hodnot mineralogických hustot (Dm), magnetické susceptibility (K) a pórovitostí (p) VO vzorků L4a–47R, L5–32P a L5–62L



Obr. 132 Porovnání průměrných obsahů radioaktivních prvků (K v %, U, eU a eTh v ppm) a hodnot HPU (μ W.m⁻³) VO vzorků L4a–47R, L5–32P a L5–62L



Obr. 133 Průměrné hodnoty elektrické konduktivity (μ S.m⁻¹) při frekvencích 50, 1000 a 10 000 Hz VO vzorků L4a–47R, L5–32P a L5–62L

Z trendů fyzikálních parametrů dobře patrných na výše prezentovaných grafech vyplývá, že VO vzorky hornin L4a–47R, L5–32P a L5–62L jsou vzájemně fyzikálně odlišné. Odlišné petrografické složení hornin je již z principu obrazem odlišných fyzikálních vlastností. Jednotlivé lokality se liší jak v látkových parametrech (hustotní parametry, magnetická susceptibilita, radioaktivita), tak i v hodnotách elektrické konduktivity. Ale trendy nehomogenity horninového materiálu jsou zřejmé i v rámci jednotlivých lokalit.

Na Obr. 131 je graficky znázorněno porovnání průměrných hodnot mineralogických hustot (Dm), magnetické susceptibility (K) a pórovitostí (p) na jednotlivých lokalitách. Je patrno, že průměrné hodnoty mineralogických hustot hornin VO vzorku **L4a–47R**, určených jako migmatity až migmatitizované ruly, se pohybují u vzorků silněji migmatitizovaných od 2,744 g.cm⁻³ až po 2,877 g.cm⁻³ u zbývajících vzorků spíše rulového charakteru. Problematická je magnetická susceptibilita, která u "leukokratních" vzorků vykazuje průměrnou hodnotu 2438,42 (10⁻⁶ j. SI), zatímco druhá část vzorkového materiálu má průměrnou hodnotu 372,46 (10⁻⁶ j. SI), tedy řádově nižší. Výrazná migmatitizace mění poměr melanosomu a leukosomu i v rozsahu jednotlivých vzorků, což má přímý vliv na stanovené parametry

Horniny (označené předběžně jako amfibolity až amfibolické ruly) VO vzorku **L5–32P** vykazují hodnoty mineralogických hustot v relativně stabilním trendu (průměr 2,903 g.cm⁻³), stejně tak magnetická susceptibilita – průměr 507,68 (10⁻⁶ j.SI). Na této lokalitě byla stanovena poněkud vyšší pórovitost (AM = 0,47 %), což upozorňuje na možnou alteraci tohoto bloku hornin.

U vzorků horniny **L5–62L**, které jsou klasifikovány jako migmatity, je průměrná mineralogická hustota 2,792 g.cm⁻³, ale susceptibilita řádově kolísá – AM = 2718,96 (10⁻⁶ j. SI), minimální hodnota 534,30 (10⁻⁶ j.SI) a maximální hodnota pak 8233,91 (10⁻⁶ j.SI). Na některých vzorcích z této lokality jsou patrné relikty granátu, zdrojem vysokých susceptibilit bude pravděpodobně magnetit.

Obsahy přirozených radioaktivních prvků u vzorků hornin z jednotlivých lokalit jsou znázorněny na Obr. 132. Porovnáme-li obsahy jednotlivých prvků je patrné, že nejvyšší obsahy draslíku – K jsou u VO vzorku L5–62L (1,62 %), což odpovídá migmatitům až migmatitizovaným rulám. VO vzorek L5–32P pak vykazuje obsahy 0,81 % a VO vzorek L4a–47R 0,61 % K.

Obsahy U a eU jsou pak nejvyšší u VO vzorku L4a–47R (3,2 resp. 4,2 ppm). VO vzorek L5–62L vykazuje hodnoty 1,9, resp. 2,2 (ppm) a VO vzorek L5–32P pak vykazuje 1,5, resp. 2,5 ppm.

Obsahy U a eU umožňují stanovení rovnováhy mezi uranem a radiem, posuzované podle poměru U/eU. Tento poměr je důležitým podkladem pro posouzení migrace uranu a tím i určitého druhu hydrotermálních alterací v recentní a subrecentní době. Nezávislé stanovení uranu na radiu je možné provést jen měřením velmi málo intenzívního záření ²³⁴Th o energii asi 93 keV. Tato měření nejsou v laboratořích běžná, protože měření tohoto záření je ovlivněno poměrně intenzívním rtg zářením ostatních radionuklidů, a proto je stanovení uranu nezávisle na radiu zatíženo daleko větší chybou než stanovení radia. Proto bylo prováděno opakované měření vzorků (devětkrát). Důvodem byla snaha o co nejpřesnější stanovení poměru U/eU tak, aby bylo možno v závěru dobře posoudit rozdíly fyzikálních parametrů u hornin z jednotlivých lokalit.

U studovaných vzorků nebyla radioaktivní nerovnováha prokázána, i když je např. u VO vzorku L4a– 47R je podle poměru U/eU částečně naznačena. Bylo by nutno proměřit větší počet vzorků z cíleně odebraný vzorků.

Obsahy eTh jsou nejvyšší u VO vzorku L4a–47R a to 9,1 ppm. Dále následuje VO vzorek L5–62L s obsahy 7,0 ppm a poslední VO vzorek L5–32P s hodnotou 1,9 ppm. Tyto hodnoty zhruba odpovídají petrografickému zařazení ve srovnání s podobným horninovými typy z jiných lokalit. Jsou však mírně zkresleny nehomogenitou horninového materiálu poskytnutého ke zkouškám.

Rozdílné trendy hodnot elektrické konduktivity jsou znázorněny na Obr. 133. Jsou porovnány hodnoty stanovené při frekvenci 50, 1 000 a 10 000 Hz a to ve směru kolmo (K) a rovnoběžně s "foliací". Je zřejmé, že nejvyšší vodivosti vykazuje VO vzorek horniny L4a–47R a to jak při nízkých frekvencích 50 Hz, tak i při vysoké frekvenci 10 000 Hz. Hodnoty se pohybují u vzorků v orientaci K (kolmo na foliaci) mezi 2,474 až po 10,74 (µS.m⁻¹), v orientaci P pak 1,469 až po 7,908 (µS.m⁻¹). Je nutné upozornit, že vyšší vodivost je v orientaci kolmo na foliaci, což je méně obvyklé. Další VO vzorek L5–62 L, označený jako migmatity, vykazuje hodnoty elektrické vodivosti (konduktivity) v orientaci K 0,555 až 1,845 (µS.m⁻¹) a v orientaci P pak 1,244 až 8,1 (µS.m⁻¹). U těchto vzorků je při nízkých frekvencích (50 Hz) konduktivita téměř neměřitelná, proto není v tabulkách a grafech vždy uvedena. U amfibolitu z VO vzorku L5–32P jsou hodnoty K 0,344 až 1,918 (µS.m⁻¹), hodnoty P pak 0,652 až 3,254 (µS.m⁻¹). Vyšší hodnoty vodivostí jsou u těchto dvou posledních lokalit vždy ve směrech P, tedy rovnoběžných s foliací, kdy se většinou projevuje lepší vodivost po "bázích" tmavých minerálů, které tvoří plochy foliací. Elektrická konduktivita vykazuje vyšší vodivosti ve směru "ploch" tmavých minerálů, tedy ve směrech přednostní orientace.

Vodivosti jsou relativně nízké – horniny jsou měřeny za sucha. Je patrné, že základním ovlivňujícím faktorem je kostra horniny (matrix), vliv pórovitostí by se projevil až po nasycení vzorků elektrolytem.

Vyhodnocení výsledků stanovení AMS je znázorněno na Obr. 130. Magnetická susceptibilita (K_{mean}) je střední, v řádu 10⁻³ (v systému SI). Lze usoudit, že anizotropie magnetické susceptibility studovaných

vzorků je nesena tmavými silikáty a pravděpodobně magnetitem. Takovéto hodnoty susceptibility jsou charakteristické pro některé granitoidní horniny (zejména I–typu) a některé ortometamorfity. Stupeň anizotropie (P) je střední (P = 1,08, P = 1,12 a P = 1,34). Indikuje poměrně intenzívní přednostní orientaci magnetických minerálů.

Magnetická vnitřní stavba vzorku L5–62–1K je téměř dokonale lineárně-planární, u vzorků L5–32P–1K a L4a–47R–1K je středně planární. Pól magnetické foliace vzorku L5–62L–1K je dobře rovnoběžný s osou válcového vzorku, což svědčí o tom, že válec byl vyvrtán kolmo na horninovou foliaci. V případě vzorků L5–32–1K a L4a–47R–1K se pól magnetické foliace mírně odchyluje od pólu horninové foliace. Tyto vzorky jsou však odvrtány mírně šikmo, cca pod úhlem 10 až 15° vzhledem k foliaci, což zřejmě vysvětluje tuto odchylku. Magnetická lineace je podle definice AMS elipsoidu kolmá na pól magnetické foliace a u všech vzorků je blízká ploše magnetické foliace.

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

2.7.1 Schmidtovo kladívko

V rámci projektu bylo realizováno měření pomocí Schmidtova kladívka za účelem orientačního stanovení pevnosti hornin in situ na základě korelace naměřených hodnot odrazivosti na bocích důlních děl PVP Bukov II a naměřených hodnot pevnosti hornin v jednoosém tlaku v laboratorních podmínkách. Měření pomocí Schmidtova kladívka bylo realizováno 5.–6. 11. 2024 na šesti místech podzemního pracoviště PVP Bukov II. Měření bylo provedeno v místech odběru velkoobjemových (VO) vzorků pro stanovení fyzikálně-mechanických a geotechnických vlastností hornin laboratorními testy. Jednalo se o VO vzorky odebrané jak pomocí širokoprůměrového jádrového vrtání (průměr jádra 300 mm) na chodbě L4a ve staničení 47 m (vzorek č. L4A_47P) a chodbě L5 ve staničení 32 a 62 m (vzorky č. L5_32P a L5_62L), tak odběru jednotlivých vzorků ve formě horninových bloků po odstřelu čelby v průběhu ražeb chodeb L6 (staničení cca 10 m), L7 (staničení cca 85,8 m) a L8 (staničení cca 43,2 m). Tyto vzorky byly označeny L6_10, L7_85,2 a L8_43,2.

2.7.1.1 Postup měření pomocí Schmidtova kladívka

V místě každého odběru horninového vzorku na výše uvedených chodbách podzemního výzkumného pracoviště byly vytyčeny záměrné horizontální přímky procházející zájmovými horninami, které byly rozděleny na metrové úseky. Tyto metrové úseky byly dále děleny na 5 dílčích úseků o délce cca 0,2 m. V těchto úsecích bylo provedeno cca 10 měření odrazivosti na záměrné linii ve vertikální vzdálenosti cca ±0,4 m od této měřící základny. V oblastech chodeb, u kterých byly VO vzorky odebrány v průběhu ražení dané chodby, jsme vytyčili 4 záměrné přímky o délce cca 4 m, dvě přímky na levém boku a dvě a pravém boku chodby ve výšce cca 1,4 m a 0,7 m nad počvou. V oblasti odběru velkoobjemových vzorků pomocí jádrového vrtání jsme vytyčili pouze 3 záměrné přímky o délce 2 m z důvodu známé přesné lokace odběru vzorku, nebylo tedy nutné volit, dle našeho názoru, větší počet a delší záměrné přímky z pohledu reprezentativnosti měření.

Podmínky a způsob měření Schmidtovým kladívkem byly následující:

- Schmidtovo kladivo Proceq typu N, kalibrační kovadlina pro kontrolu zařízení (viz Obr. 1).
- Horizontální orientace Schmidtova kladívka při měření odrazivosti.
- Měření na přirozené stěně boku očištěného důlního díla, důležitý byl výběr místa úderu (rovná plocha umožňující kolmé vedení kladiva na stěnu chodby).
- Důlní dílo bylo raženo obrysovou trhací prací.
- Bylo realizováno neorientované měření odrazivosti vzhledem k metamorfní foliaci, měření mohlo být prováděno pouze dle orientace chodby kolmo na její boky, u L6, L7, L8 a L5_62L severní a jižní orientace kladiva, u vzorků č. L5_32P a L4A_47P byla navíc realizována měření ve východním a západním směru v přilehlé komoře ZK5-1J a v propojení L4c chodeb L4a a L4b.



Obr. 134 Schmidtovo kladívko typu N (vlevo), kalibrační kovadlina (vpravo)

2.7.1.2 Zpracování výsledků měření Schmidtovým kladívkem

Z naměřených hodnot odrazivosti na chodbách PVP Bukov II bylo zřejmé, že hodnoty odrazivosti nabývají široký interval hodnot od cca 30 až 60, viz histogramy na Obr. 135. Tato skutečnost byla způsobena, i přes zdravě vypadající horninu a použití šetrnější obrysové trhací práce, výskytem vyššího stupně rozpukání horniny na stěnách chodeb. Toto rozpukání se projevovalo výskytem nízkých a podprůměrných hodnot odrazivosti z důvodu velkého zastoupení ploch porušení převážně subparalelních s lícem výrubu. Údery v těchto oslabených místech se projevovaly dutým zvukem oproti úderům v oblastech s výskytem zdravé a neporušené horniny a představovaly odhadem cca 70 % všech realizovaných úderů. Vzhledem k této skutečnosti jsme rozhodli uvažovat pro vlastní analýzu kromě stanovených průměrné hodnoty odrazivosti $_{R_{N_25\%}}$ " z hodnot, které se nacházejí nad vyšším kvartilem. To představuje průměrnou hodnotu cca 25 % nejvyšších naměřených hodnot datového souboru odrazivosti R_N (Schmidtovo kladivo typu N), viz Obr. 135. Dle našeho názoru, by tyto průměrné hodnoty měly lépe odrážet a charakterizovat pevnostní vlastnosti neporušené horniny.

Průměrné hodnoty " R_{N_AVG} " a " $R_{N_25\%}$ " jsou uvedeny v Tab. 53. V této tabulce je rovněž uvedena průměrná objemová hmotnost VO vzorků a jejich přijaté hodnoty laboratorních pevností v jednoosém tlaku "UCS_{LAB}". Jak již bylo uvedeno výše, nebylo technicky možné provádět orientované měření odrazivosti k metamorfní foliaci zájmových hornin, proto byly přijaty hodnoty "UCS_{LAB}" stanoveny jako průměrné hodnoty výsledných laboratorních pevností v jednoosém tlaku stanovovaných na zkušebních tělesech vrtaných kolmo a v paralelním směru k metamorfní foliaci.

Označení VO vzorku	Objemová hustota	UCSLAB	SD UCS _{LAB}	CVr	$R_{N_{AVG}}$	SD R _{N_AVG}	cv	R N_25%	SO R _{N_25%}	cv
	[kg.m ⁻³]	[MPa]	[MPa]	[%]	[]	[]	[%]	[]	[]	[%]
L4A_47P	2911	174,3	15,7	9	47	5	11	56	3	5
L5_32P	2930	203,0	32,0	16	46	4	9	52	1	2
L5_62L	2744	140,2	23,5	17	43	5	12	49	1	2
L6 10	2753	121,0	30,0	25	53	5	9	59	2	3
L7 85,2	2931	228,0	18,0	8	52	4	8	59	2	3
L8_43,2	2831	152,6	34,6	23	51	5	10	58	2	3

Tab. 53 Přijaté hodnoty laboratorních pevností v jednoosém tlaku "UCS_{LAB}", průměrné hodnoty odrazivosti "RN_{AVG}" a průměrné hodnoty odrazivosti "RN_{25%}" z oblasti nad vyšším kvartilem

Vysvětlivky: SD – směrodatná odchylka, CV – koeficient variability



Obr. 135 Histogramy naměřených hodnot odrazivosti RN v oblastech odběrného místa VO vzorků na zájmových chodbách PVP Bukov II

Byly povedeny dva způsoby vyhodnocení (zpracování) získaných hodnot odrazivosti.

První způsob spočíval v korelaci naměřených průměrných hodnot odrazivosti " R_{N_AVG} " a " $R_{N_25\%}$ " na bocích důlních děl PVP Bukov II a přijatých laboratorních hodnot pevnosti hornin v jednoosém tlaku v laboratorních podmínkách. Tato korelace je zřejmá z Obr. 136. Obr. 136a zahrnuje data odrazivosti ze všech odběrných míst a odebraných VO vzorků. Obr. 136b zahrnuje ukázku korelace v případě vyloučení dat odrazivosti z odběrných míst u VO vzorků L6_10 a L8_43,2. Vyloučení VO vzorků L6_10 a L8_43,2 z celého souboru analyzovaných dat jsme provedli na základě výskytu jejich vysoké hodnoty koeficientu variability u laboratorních pevností v jednoosém tlaku (viz Tab. 53).



Obr. 136 Korelace průměrných hodnot odrazivosti "RN_{AVG}" a "RN_{25%}" a přijatých laboratorních hodnot pevnosti hornin v jednoosém tlaku, a) použitá data u všech šesti odebraných vzorků, b) použitá data s vyloučením vzorků L6_10 a L8_43,2

Druhý způsob vyhodnocení naměřených hodnot odrazivosti ve vztahu k pevnostním vlastnostem byl proveden podle nomogramu (viz Obr. 137) uvedeného v návrhu certifikované metodiky (Hudeček et al. 2019, Ulusay et al. 2007). Tento přístup vyhodnocení hodnot odrazivosti je navržen pro měření Schmidtovým kladívkem typu L. Pokud používáme kladívko typu N, musí se provést korekce dle následujícího vztahu uvedeného ve výše zmíněných pramenech:

$R_N = 1,0646R_L + 6,3673 \tag{42}$

Jednotlivé hodnoty odrazivosti R_N byly přepočteny, dle výše uvedeného vztahu, na hodnoty odrazivosti R_L odpovídající hodnotám při použití Schmidtova kladívka typu L. Z přepočtených hodnot odrazivosti byly rovněž stanoveny, tak jako v předešlém případě, průměrné hodnoty "R_LAvG" a "R_L25%". Tyto hodnoty byly použity pro stanovení tlakové pevnosti podle uvedeného nomogramu (viz Obr. 137). Výsledné hodnoty R_L pro jednotlivá odběrná místa a k nim odpovídající hodnoty tlakové pevnosti jsou uvedeny v grafu na Obr. 138 společně s laboratorními hodnotami tlakové pevnosti v jednoosém tlaku "UCS_LAB". V tomto grafu je rovněž zvýrazněn obdélníky rozsah laboratorních pevností v jednoosém tlaku (UCS_LAB) pro snadnější porovnání s hodnotami tlakových pevností stanovených z nomogramu (UCS_RL_AVG, UCS_RL_25%). V Obr. 138 jsou rovněž uvedeny číselné hodnoty tlakových pevností odpovídající průměrné hodnotě odrazivosti "RL_25%" společně s uvedenými hodnotami rozptylu tlakových pevností (označeny "±"). Červené oboustranné šipky v tomto grafu vyznačují propojení hodnot laboratorních tlakových pevnosti konkrétních VO vzorků s odpovídajícími hodnotami tlakových pevností stanovených z nomogramu na základě průměrných hodnot odrazivosti "RL_25%".



Obr. 137 Použitý nomogram pro přepočet hodnot odrazu Schmidtova kladiva RL na pevnost v prostém tlaku (Hudeček et al. 2019)



Obr. 138 Znázornění výsledných průměrných hodnoty odrazivosti "RL_{AVG}" a "RL_{25%}" pro jednotlivá odběrná místa a k nim odpovídající hodnoty tlakové pevnosti stanovené z použitého nomogramu "UCS_R_{L_AVG}", "UCS_R_{L_25%}" včetně uvedení laboratorních hodnot tlakových pevností VO vzorků UCS_{LAB}

2.7.1.3 Shrnutí a diskuze výsledků měření odrazivosti pomocí Schmidtova kladívka

Na základě výsledků korelace hodnot odrazivosti je zřejmé (viz Obr. 136a), že úroveň korelace uvažující hodnoty odrazivosti ze všech odběrných míst s laboratorními hodnotami pevností v jednoosém tlaku je velice nízká a z praktického hlediska nevypovídající. V případě vyloučení VO vzorků L6_10 a L8_43,2 z celého souboru analyzovaných dat se míra korelace významně zvýšila. Jak již bylo uvedeno, vyloučení bylo provedeno na základě výskytu jejich vysoké hodnoty koeficientu variability u laboratorních pevností v jednoosém tlaku (viz Obr. 136b a Tab. 53). Na tuto skutečnost mohl mít vliv způsob odběru horniny, tj. odběr kvádrových bloků horniny z rozpojené horniny po odstřelu čelby. Tento způsob odběru měl pravděpodobně vliv na homogenitu a reprezentativnost odebrané horniny (variabilita litologické a strukturní homogenity, proměnlivá kvalita ploch foliace apod.) určené pro přípravu zkušebních těles z důvodu odběru bloků z nesrovnatelně většího objemu HM než tomu bylo u cíleného odběru horniny pomocí jádrového vrtání. Z této skutečnosti je zřejmé, že v případě použití Schmidtova kladívka na zájmových lokalitách pro výstavbu úložiště pro účely stanovování tlakové pevnosti na základě korelace hodnot odrazivosti bude vhodné, aby odběr VO vzorků, pro které se korelace bude provádět, byl realizován identickým způsobem, nejlépe velkoprůměrovým jádrovým vrtáním. Tento způsob odběru VO vzorků umožňuje cílený odběr s nesrovnatelně přesnější lokalizací než je tomu při odběru kusových vzorků z rubaniny po odstřelu čelby.

Druhý způsob vyhodnocení naměřených hodnot odrazivosti podle nomogramu (viz Obr. 137) ukázal, že v případě měření odrazivosti na cíleně 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 kvartilem. Jim odpovídající hodnoty tlakové pevnosti "UCS_R_{L_25%}" lépe korespondují s hodnotami naměřených pevností v laboratoři, ale nabývají generelně nižších hodnot (viz Obr. 138). Hodnoty pevností stanovených na základě hodnot "R_{L_AVG}" se nacházejí převážně pod laboratorními hodnotami pevností, na tuto skutečnost má vliv sekundární porušení v bocích důlních chodeb, pravděpodobně způsobené použitou obrysovou trhací prací.

Na základě zkušeností s měřením odrazivosti pomocí Schmidtova kladívka in situ na stěnách chodeb PVP Bukov II lze tuto metodu doporučit pouze pro velice orientační stanovení pevnosti v prostém tlaku, a je možno zformulovat následující poznatky a doporučení:

- Výše 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: orientace kladiva, stav, případná úprava stěn před vlastním měřením odrazivosti, počet úderů, úprava stěn, způsob měření – např. singulární úder, opakovaný úder do stejného místa, typ použitého kladiva (N nebo L), kontrola funkčnosti (kalibrace) atp.
- Výsledky 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 jednou konkrétní osobou, popř. malou skupinou pracovníků, cca 2–3.
- Pro korelaci hodnot odrazivosti s laboratorními výsledky musí být dodržen stejný způsob odběru horniny, nejlépe velkoprůměrovým jádrovým vrtáním.
- Schmidtovo kladívka by mohlo být použito, dle našeho názoru, například pro primární a operativní rozdělení HM do kvazihomogenních celků na základě profilového měření na bocích důlních děl, nebo také jako jeden z prvotních orientačních parametrů zahrnutých do klasifikačního systému.

Domníváme se, že vyšší spolehlivosti při měření odrazivosti jak pro stanovení pevnosti, tak i například pro rozdělení HM do kvazihomogenních 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 měření odrazivosti).

2.7.2 Akustická televize

V roce 2024 bylo pracovníky SG Geotechnika provedeno měření akustické televize ve vrtech L4a-72L a L7-87L. Cílem prací bylo vymezení zón ve vrtech, které neobsahují viditelné pukliny a jsou vhodné ke stanovení elastických mechanických konstant. Zpráva o měření je obsahem samostatné elektronické přílohy (Elektronická příloha 13).

2.7.3 Goodman Jack

2.7.3.1 Testované vrty

Za účelem splnění cílů projektu byly v dole Rožná pomocí lisu Goodman Jack testovány vrty L4a-72L a L7-87L. Před tímto měřením byla realizována měření akustické televize. Na základě jejích výsledků byly vybrány etáže vrtu, které neobsahovaly viditelné diskontinuity, které by negativně ovlivnily samotná měření.

2.7.3.2 Popis zařízení

Uniaxiální lis Goodman Jack je zařízení pro zjišťování přetvárných parametrů skalních hornin. Zařízení se skládá z následujících komponent:

- hydraulický válcový lis o nominálním průměru 76 mm (při zcela zatažených čelistech 70 mm, při maximálním rozevření cca 81 mm) s dvěma zabudovanými snímači posunu LVDT,
- ruční hydraulické čerpadlo ENERPAC s mechanickým přepínačem pro dva hydraulické okruhy (jeden pro rozevírání lisu, druhý pro jeho stahování),
- přesný manometr s rozsahem 0 až 70 MPa pro indikaci tlaku v hydraulickém systému,
- hydraulické hadice se spojovacími koncovkami,
- odečítací jednotka pro snímače posunu LVDT s dvěma LCD číslicovými displeji s odečtem posunu v milimetrech s citlivostí 0,01 mm,
- spojovací kabel mezi snímači v hydraulickém lisu a odečítací jednotkou.

2.7.3.3 Metodika zkoušek

Zkoušky realizované v rámci tohoto projektu byly provedeny aparaturou Goodman Jack (typ Hard Rock) od výrobce Durham Geo Slope Indicator (USA).

Před zahájením zapouštění je celá sestava zapojena a ověřena těsnost hydraulického systému, funkčnost lisu včetně snímačů posunu a odečítací jednotky. Při zkoušce funkčnosti je lis zasouván do masivních ocelových válců o průměru 76,2 a 78,6 mm. Tato jmenovitá hodnota slouží taktéž ke kontrole správné funkce snímačů posunu.

Zkoušky jsou standardním způsobem prováděny s dvěma zatěžovacími cykly, přičemž maximální zatížení v prvním cyklu činí obvykle polovinu maximálního zatížení cyklu druhého. V našem případě bylo zvoleno stupňovité zatěžování 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. Následné odlehčování je rovněž prováděno s krokem 2 MPa. Doba trvání každého zatěžovacího stupně činí přibližně 1 min, v pevných skalních horninách dochází k velmi rychlému ustalování deformací.

Při prováděné zkoušce uniaxiálním lisem Goodman Jack jsou do primární dokumentace zaznamenávány ve zvolených časových intervalech hodnoty tlaku na stěnu vrtu, odvozené z tlaku v hydraulickém systému, a hodnoty čtení deformace na dvou snímačích LVDT. Hodnota tlaku je odečítána na manometru s rozsahem 0 až 70 MPa a třídou přesnosti 1. Hodnoty deformace jsou zobrazeny na číslicovém displeji přímo v milimetrech s rozlišením 0,01 mm. Rozsah snímaných hodnot činí cca –5,50 mm až +5,50 mm. Zobrazené hodnotě 0,00 mm odpovídá průměr vrtu 75,9 mm.

2.7.3.4 Metodika vyhodnocení

Zpracování naměřených hodnot je prováděno tabulkovým kalkulátorem Microsoft Excel, výstupem je numerický i grafický průběh závislosti deformace na působícím napětí. Výsledkem zkoušky jsou vypočtené hodnoty modulu přetvárnosti pro jednotlivé zatěžovací cykly, resp. modulu pružnosti pro odlehčovací cykly.

Základním vzorcem pro výpočet modulu přetvárnosti (pružnosti) je následující vzorec uvedený v manuálu výrobce k aparatuře Goodman Jack (42):

$$E = 0.86 \times D \times K \times \frac{\Delta p}{\Delta d}$$
(43);

kde *E* odpovídá modulu přetvárnosti nebo pružnosti v [MPa], *D* průměru vrtu v [mm], *K* konstantě závislé na průměru vrtu a Poissonově čísle (v případě v=0,20 a průměru vrtu 76 mm nabývá *K* hodnoty 1,271), Δp oboru působícího tlaku v [MPa] a Δd rozdílu naměřené deformace stěny vrtu v [mm].

Vyhodnocení vychází z publikací Heuze et al. (1984 a 1985) a ISRM (1996) a je v souladu s normovaným postupem podle (ASTM 2016):

- Pro výpočet horní hranice *E*_{true, theoretical} což je hledaná hodnota modulu pružnosti in-situ platí *E*_{true, theoretical} =*E*_{core}×0,4, kde *E*_{core} je deformační modul stanovený na vrtném jádru.
- Průměr vrtu by měl být přesně 76,2 mm. Pokud jsou např. očekávány moduly okolo 34,5 GPa, nesmí být průměr menší než 0,36 mm a větší než 0,56 mm. Důvodem je dosažení plného kontaktu mezi čelistmi lisu a stěnou vrtu.
- Pro výpočet dat se používá vzorec (2):

$$E_{calc} = 0.86 \times 0.93 \times D \times T^* \times \frac{\Delta p}{\Delta d}$$
(44);

kde 0,86 odpovídá 3D efektu, 0,93 účinnosti hydrauliky, *D* průměru vrtu, T* koeficientu závislém na Poissonově čísle (v případě v=0,20 a průměru vrtu 76 mm nabývá *T** hodnoty 1,474), Δp oboru působícího tlaku v [MPa] a Δd rozdílu naměřené deformace stěny vrtu v [mm].

 Hodnota *E_{true}* se odečte z nomogramu uvedeném v Heuze et al. (1984 a 1985), ISRM (1996) nebo ASTM (2016) na základě *E_{calc}*. Tato korekce je prováděna z důvodu ohybu čelistí lisu při vysokých tlacích, kdy LVDT na sondě měří parazitní deformace.

2.7.3.5 Výsledky terénních zkoušek

Výsledky stanovení deformačních modulů jsou přehledně zaznamenány v následující tabulce (Tab. 54), kde $E_{def, calc}$ odpovídá deformačnímu modulu z druhé zatěžovací větve zkoušky, tj. z 10 na 20 MPa v [GPa] vypočtenému podle rovnice (2), $E_{p, calc}$ odpovídá deformačnímu modulu z druhé odlehčovací větve zkoušky, tj. z 20 na 2 MPa v [GPa] vypočtenému podle rovnice (2), $E_{def, true}$ odpovídá deformačnímu modulu z druhé zatěžovací větve zkoušky, tj. z 10 na 20 MPa v [GPa] získanému z nomogramu uvedeném v ASTM (2016) a $E_{p, true}$ odpovídá deformačnímu modulu z druhé odlehčovací větve zkoušky, tj. z 20 na 2 MPa v [GPa] získanému z nomogramu uvedeném v ASTM (2016) a $E_{p, true}$ odpovídá deformačnímu modulu z druhé odlehčovací větve zkoušky, tj. z 20 na 2 MPa v [GPa] získanému z nomogramu uvedeném v ASTM (2016). 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. Pro výpočet deformačních modulů byla použita hodnota v=0,2 Poissonova čísla získaného průměrem z laboratorních zkoušek, které jsou obsahem kapitoly 2.6.3. Protokoly jednotlivých zkoušek jsou součástí samostatné elektronické přílohy (Elektronická příloha 14).

Vrt	Hloubka	Edef, calc [GPa]	E _{p, calc} [GPa]	Edef, true [GPa]	E _{p, true} [GPa]	
	0,7	9,0	18,1	11,1	39,3	
	4,2	14,0	18,0	23,1	38,7	
L4a-72L horizontálně	8,4	8,0	8,5	9,5	10,2	
	11,8	11,8	17,1	16,9	34,6	
	14,0	15,3	19,3	27,4	45,0	
	2,1	14,2	17,5	23,6	36,5	
1.4.5 701	4,1	6,1	14,6	6,8	25,0	
L4a-72L vertikálně	6,5	11,1	13,6	15,3	21,8	
	9,8	6,4	13,3	7,2	20,9	
	14,0	14,2	26,3	23,6	96,5	
	1,4	6,9	7,0	7,8	8,0	
1 7 971	5,3	10,3	10,8	13,6	14,6	
horizontálně	8,9	8,4	7,8	10,1	9,2	
	12,9	13,0	16,9	20,1	33,6	
	14,3	12,6	15,7	19,0	28,8	
	3,1	7,4	9,1	8,5	11,3	
	5,3	8,4	8,6	10,1	10,4	
vertikálně	7,2	5,8	6,6	6,3	7,4	
	10,8	6,1	6,9	6,7	7,9	
	14,3	7,7	10,6	9,0	14,2	

Tab. 54 Vvhodnocení in situ deformačních
--

Pozn.: červeně označeny příliš vysoké nereálné hodnoty

Grafické zobrazení vypočtených hodnot $E_{def, true}$ a $E_{p, true}$ je zachyceno na následujících obrázcích Obr. 139 a Obr. 140. Vodorovné čáry v těchto grafech označené jako $E_{true, theoretical}$ jsou horní limity pro deformační moduly. Tyto hodnoty byly získány redukcí průměrných hodnot z laboratorních zkoušek E_{core} postupem uvedeným v kapitole 2.7.3.4. Průměrné hodnoty vzniklé vynecháním hodnot deformačních modulů, které se pohybují nad touto teoretickou úrovní, jsou obsahem následující tabulky Tab. 55. Z grafů Obr. 139 a Obr. 140 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. Rozdíl hodnot mezi zatěžováním ($E_{def, true}$) a odlehčováním ($E_{p, true}$) může indikovat poškození stěn vrtu nebo neelastické chování horniny. Proto se doporučuje použít k dalším úvahám hodnoty ze zatěžování (ASTM 2016).

Vrt	Edef, true [GPa]	E _{p, true} [GPa]
L4a-72L horizontálně	17,6	10,2
L4a-72L vertikálně	15,3	22,6
L7-87L horizontálně	14,1	15,1
L7-87L vertikálně	8,1	10,2

Tab. 55 Průměrné deformační moduly Etrue

Pozn.: červeně označena pouze jedna hodnota



Obr. 139 Průběh deformačních modulů z druhé zatěžovací větve s hloubkou



Obr. 140 Průběh deformačních modulů z druhé odlehčovací větve s hloubkou

2.7.4 Stanovení napětí metodou hydraulického štěpení stěn vrtného stvolu

Napěťový stav horninového masivu byl stanovován ve vertikálním úpadním geotechnickém vrtu L4a-73D, a to pomocí přímé metody měření, tzv. hydraulického štěpení stěn vrtu (hydrofracturingu). Před vlastním měření napětí horninového masivu byly použity doprovodné metody ABI a OBI pro stanovení vhodných měřicích poloh. Měření napětí HM bylo prováděno po rekognoskaci kvality vrtného jádra a na základě hodnocení kvality horniny z obrazů ABI a OBI aplikace.

Charakteristické požadavky pro výběr testovacích izolovaných intervalů délky cca 1 m je minimální porušenost vrtné stěny v předmětném úseku. To je nutno zajistit, aby byly splněny základní požadavky aplikace metody hydraulického štěpení pro vytvoření testované trhliny s předpokládanými parametry závisejícími na orientaci napětí v okolí vrtu, tj. kolmo na složku minimálního horizontálního napětí. Byla provedena karotáž ABI jak před, tak následně také po aplikací hydraulického štěpení stěn vrtu. Porovnáním obrazů ABI karotáže v testovaných intervalech se podařilo identifikovat trhliny vzniklé hydraulickým štěpením i s přesnými směrovými atributy. Na Obr. 141 (vlevo) je ukázán typický příklad zobrazení nově vzniklé vertikální trhliny v úseku intervalu se středem v hloubce 35 m.

Jelikož použití karotáže ABI po hydrofracturingu se ukázalo jednoznačnější než zavedený postup stanovování prostřednictvím překreslování otisků ze sondy na blány a následně ruční digitalizace a vyhodnocení dle kompasu, byly hodnoty Dip a Azimut Dip u jednotlivých trhlin vyhodnoceny, pokud to bylo možné, přímo z výsledků karotáže metodou ABI.

Vzhledem k dostatečnému množství záměrů byla pro celkové vyhodnocení hlavních horizontálních složek napěťového pole v oblasti sledovaného vrtu využita pouze měření s vertikálně iniciovanou trhlinou a v hloubkách již jen s malým ovlivněním chodbou L4a – v Tab. 56 označeny červenou barvou. Na základě této skutečnosti bylo pro stanovení hlavních složek horizontálního napětí využito vyhodnocení každého testu zvlášť dle vztahu (44):

Sh = Psi; SH = 3Psi – Pr; (orientace SH je kolmá k Azimut Dip testované trhliny) (45)

Hloubka (m)	Dip trhliny [°]	Pc [MPa]	Pr [MPa]	Psi [MPa]	SH [MPa]	Sh [MPa]	Ф _{SH} [°]
5,2	82	23,6	12,4	13,2	27,2	13,2	123
8	48			12,7			
11	38			11,9			
13,2	87	22,8	22	17,8	37,7	17,8	136
14,7	52			19,4			
17,3	90	19,2	15	15,4	33,5	15,4	144
19,8	69			16,4			
20,9	56			15,9			
24,3	87	21	15,8	16,8	34,6	16,8	82
25,7	87	-	15,2	15,4	31	15,4	178
35,1	89	22	16,7	15,6	31,8	15,6	121
	Přijaté hodnoty				33,7	16,2	132
		Vertikální na	pětí pgh [MPa	Sv = 14			

Tab. 56 Výsledky zjištění hlavních tlakových parametrů a na jejich základě stanovení hlavních horizontálních složek napěťového pole



Obr. 141 Zdrojové podklady pro stanovení orientace testované trhliny: vlevo – ukázka porovnání obrazu ABI před a po aplikaci hydraulického štěpení a identifikace nové trhliny (úroveň 35 m); vpravo – záložní zdroj, tj. překreslené otisky po použití sondy impression packer



Obr. 142 Grafické znázornění výsledků určení Sh (čárkovaná čára) a SH (plná čára) včetně orientací: černě - dílčí výsledky na jednotlivých hloubkových úrovních; červeně – přijaté sumární výsledky; zeleně – vypočtené vertikální napětí

V rámci měřicí kampaně byla také hodnocena ovalizace – eliptická deformace vrtu – ve vztahu k směrové orientaci anizotropie horizontálního napětí (viz Tab. 57). Pro účely zhodnocení charakteru deformace průřezu vrtu byl rozsah orientace poloosy "a" rozdělen do 12 sektorů po 15°. V každém úhlovém sektoru byl proveden součet vážených výskytů orientace poloosy "A" odpovídající danému sektoru. Váha byla odvozena od numerické excentricity každého záměru. Výsledek je zobrazen graficky na Obr. 143. Orientace maximálního horizontálního napětí z analýzy ovalizace vrtu byla v tomto případě méně průkazná, než tomu bylo u stanice GS7. Tato orientace osciluje ve směru cca S–J a o odklání se od výsledků z hydroštěpení stěn vrtu (viz Obr. 141 a Obr. 142). Deformace vrtu byla pravděpodobně spíše provokována interakcí vrtného nářadí s materiálovou strukturní anizotropií materiálu v místě vrtu a napěťový příspěvek k deformaci byl pod hranicí rozlišitelnosti.

Tab. 57	' Ovalizace	vyjádřená	orientovanou	eliptickou	deformací	poloosami	"A" a	a "B" a	orientaci	větší
poloosy	, "A" k sever	น								

Střed hloubkového intervalu	Poloosa "B"	Poloosa "A"	Orientace "A" k severu
36,25	1,0002	1,0011	55
35,75	1,0000	1,0013	89
35,25	1,0001	1,0012	74
34,75	1,0001	1,0012	75
34,25	1,0001	1,0014	47
33,75	1,0001	1,0012	46
33,25	0,9995	1,0016	96
32,75	1,0000	1,0012	110
32,25	1,0003	1,0010	85
31,75	1,0004	1,0018	91
31,25	1,0001	1,0019	79
30,75	0,9997	1,0012	60
30,25	0,9992	1,0027	96
29,75	0,9988	1,0030	102
29,25	0,9992	1,0016	92
28,75	0,9990	1,0022	75
28,25	0,9997	1,0019	60
27,75	1,0004	1,0016	61
27,25	1,0006	1,0026	114
26,75	0,9994	1,0015	55
26,25	1,0002	1,0013	70
25,75	0,9997	1,0018	25
25,25	1,0000	1,0009	52
24,75	1,0002	1,0013	100
24,25	1,0001	1,0013	112
23,75	1,0001	1,0011	150
23,25	1,0001	1,0013	114
22,75	0,9999	1,0012	100
22,25	1,0000	1,0010	156
21,75	1,0001	1,0012	138
21,25	1,0001	1,0012	18
20,75	1,0005	1,0011	114
20,25	0,9999	1,0007	86
19,75	0,9997	1,0012	81
19,25	1,0004	1,0010	128
18,75	1,0001	1,0015	117

Střed hloubkového intervalu	Poloosa "B"	Poloosa "A"	Orientace "A" k severu
18,25	0,9997	1,0017	114
17,75	0,9995	1,0017	121
17,25	0,9998	1,0013	118
16,75	1,0000	1,0013	60
16,25	0,9999	1,0017	9
15,75	0,9999	1,0015	62
15,25	1,0006	1,0011	153
14,75	1,0004	1,0009	107
14,25	1,0000	1,0009	102
13,75	0,9999	1,0014	99
13,25	1,0000	1,0018	97
12,75	1,0005	1,0012	65
12,25	1,0000	1,0013	30
11,75	1,0001	1,0008	61
11,25	1,0006	1,0010	99
10,75	1,0003	1,0013	103
10,25	1,0004	1,0012	42
9,75	0,9999	1,0014	52
9,25	0,9997	1,0013	112
8,75	1,0005	1,0017	96
8,25	0,9999	1,0011	65
7,75	1,0000	1,0010	88
7,25	1,0005	1,0014	54
6,75	0,9997	1,0018	124
6,25	1,0002	1,0011	82
5,75	1,0002	1,0009	71
5,25	1,0001	1,0011	88
4,75	0,9996	1,0017	116
4,25	0,9991	1,0023	97
3,75	0,9992	1,0021	103
3,25	0,9997	1,0019	114
2,75	0,9993	1,0024	105
2,25	0,9989	1,0021	75
1,75	0,9996	1,0029	57



Obr. 143 Grafické znázornění preferujícího směru orientace poloosy "a" eliptické deformace vrtu a zjištěných hlavních směrů napěťových horizontálních složek

2.8 Geofyzikální charakterizace

V rámci prací v roce 2024 byl geofyzikální průzkum proveden v nově vyražených chodbách L4c a L4d a V5-6. Účelem měření bylo hodnocení kvality horninového masivu HM v části blízké stěnám díla, které bude využito pro celkové hodnocení stavu HM v okolí díla. Součástí prací v roce 2024 bylo také sledování a posouzení prostorového rozsahu porušení horniny vlivem trhacích prací v pěti zkušebních komorách a jejich okolí v chodbě L7 (hloubkový dosah EDZ).

Princip použitých geofyzikálních metod, přístrojové vybavení a metodika měření jsou podrobně popsány v roční zprávě tohoto projektu za rok 2021 (Bukovská et al. 2022). V následujících dílčích podkapitolách je proto popsáno pouze přístrojové vybavení a provedené práce pro jednotlivé metody. V každé sledované chodbě byly realizovány průzkumné profily vedené po stěnách výrubu. Staničení profilů je zavedeno shodně se strukturněgeologickou dokumentací od severu k jihu (L4c, L4d, V5-6), v případě L7 je staničení shodné i se staničením ražby. Všechny pozice snímačů (geofony a měřící elektrody s krokem 0,5 m) byly zaměřeny kombinací geodetického zaměření totální stanicí a fotogrammetrie v souřadném systému S-JTSK. Stranové označení jednotlivých profilů, použité v jejich názvu, je míněno ve smyslu pohledu do rostoucích staničení. Chodby L4c, L4d a V5-6 byly měřena v období června 2024, práce v chodbě L7 a zkušebních komorách se uskutečnily v únoru 2024.

2.8.1 Georadar

2.8.1.1 Použité přístrojové vybavení, způsob měření, zpracování

Georadarové měření v obou laboratorních chodbách bylo ve všech případech v roce 2024 provedeno s využitím georadarové aparatury MALÅ GX (Ground eXplorer), výrobce Malå Geoscience (Švédsko), které sestává z následujících komponent:

- stíněná anténa 450 MHz;
- stíněná anténa 750 MHz;
- zobrazovací a ovládací jednotka GX.

Aparatura využívá technologii umožňující vysokou rychlost sběru dat a významně zlepšující jejich kvalitu a dynamický rozsah.

Měření na stěnách laboratorních chodeb L4c a L4d byla proměřena dvěma profily vedenými ve výšce 1,2 a 1,7 m nad počvou díla. Každý z těchto profilů byl sledován měřením jak s anténou 450 MHz tak s anténou 750 MHz. V každé chodbě tedy bylo odměřeno 8 georadarových profilů. V případě chodby V5-6 a také ve zkušebních komorách chodby L7 byl zvolen jeden profil na každém boku díla a ten byl proměřen s použitím obou antén (450 MHz a 750 MHz).

Krok měření (tedy vzdálenost mezi jednotlivými radarovými stopami) byl pro obě antény zvolen 0,02 m, pro obě antény. Hloubkový dosah měřícího systému 450 MHz je v daném prostředí 2,5–3 m při rozlišovací schopnosti od 0,13 m, v případě systému 750 MHz je hloubkový dosah kolem 1,5–2 m, rozlišovací schopnost od 0,08 m (odpovídá polovině šířky vlnového pulsu pro uvažovanou rychlost šíření, Annan 2003).



Obr. 144 Měření georadarem na stěně laboratorní chodby



Obr. 145 Příklad georadarového řezu z měření s anténou 450 MHz, chodba L4d - pravá stěna

2.8.2 ERT

2.8.2.1 Použité přístrojové vybavení, způsob měření, zpracování

Geoelektrické odporové měření ve všech měřených laboratorních chodbách (L4c, L4d, V5-6 a okolí ZK v L7) bylo provedeno s využitím následujícího přístrojového vybavení:

- automatický geoelektrický systém ARES II (výrobce GF Instruments, ČR);
- aktivní víceelektrodové kabely (výrobce GF Instruments, ČR).

Odporové měření proběhlo na stěnách obou laboratorních chodeb při použití vzdálenosti mezi jednotlivými elektrodami 0,5 m. Z tohoto vyplývá minimální použitá vzdálenost proudových elektrod A, B 1,5 m. Maximální rozestup mezi elektrodami A a B, který byl při měření použit, činil 15 m. Konduktivní spojení s horninou bylo vyřešeno pomocí ocelových rozpínacích kotev umístěných v předvrtaných otvorech, do otvorů byla navíc vpravena vodivá pasta nebo roztok NaCl.



Obr. 146 Provádění odporových měření metodou ERT na stěnách laboratorní chodby (foto RNDr. J. Nedvěd)



Obr. 147 Měření ERT – příklad modelového odporového řezu, chodba L4c – levá stěna

2.8.3 Mělká refrakční seismika

2.8.3.1 Použité přístrojové vybavení, způsob měření, zpracování

Průzkumné práce byly provedeny s použitím následujícího vybavení:

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

Seismické měření proběhlo na stěnách všech sledovaný chodeb v jejich stěnách (bocích). Oproti běžnému způsobu měření v minulých letech došlo ke změně v geometrii průzkumných profilů. V případě chodeb L4c a L4d byly profily protaženy do sousedních chodeb L4a a L4b, prostor masivu mezi chodbami L4c a L4d (označovaný jako "napěťový pilíř") byl průzkumem pokrytý jako celek, stěny mimo tento pilíř pak jsou sledovány s přesahem do sousedních chodeb L4a a L4b. Schematicky jsou tři provedené měřící profily znázorněny na Obr. 150. Podobný způsob měření byl proveden také ve větrací chodbě V5-6, zde se měřilo na dvou profilech v pravém a levém boku stěny (Obr. 152). Sledování HM v okolí zkušebních komor v chodbě L7 také proběhlo v systému lomených profilů, které umožnily sledovat vymezený blok jako celek (kapitola 2.8.6, Obr. 154). V chodbě L7 a zkušebních komorách ZK7 bylo tak provedeno celkem 7 průzkumných profilů.

Zvolená konfigurace měřících profilů umožnila zpracovat všechna měření tomograficky (tedy jako seismické prosvěcování). Díky tomu je možné získat hodnoty seismických rychlostí v rámci celého bloku ohraničeného průzkumným profilem a tím výrazně vylepšit hloubkový dosah sledování oproti profilovým měřením prováděným pouze na stěně chodby. Vzdálenost mezi jednotlivými geofony (přijímači) byla u všech profilů zvolena 0,5 m, vzdálenost zdrojových bodů pak činila 1 m.



Obr. 148 Měření seismické refrakční tomografie na stěně laboratorní chodby



Obr. 149 Přiklad seismického rychlostního řezu a zobrazení gradientu rychlostí (ve směru kolmo na stěnu chodby) – chodba L4c – pravý bok

2.8.4 Výsledky geofyzikálních měření v chodbě L4c, L4d



Obr. 150 Schéma měřených profilů v chodbách L4c a L4d

V prostoru mezi laboratorními chodbami L4a a L4b byly vyraženy dvě chodby v kolmém směru, označené jako L4c a L4d. Chodba L4c leží přibližně ve staničení 49 m L4a, chodba L4d pak křižuje L4a na metráži 62,5 m. Tyto 4 chodby pak vymezují horninový blok, který je označován v rámci projektu jako "napěťový pilíř", jeho půdorysný rozměr je přibližně 12×12 m. V rámci geofyzikální charakterizace byl zkoumán napěťový pilíř na všech jeho stěnách, sledovány byly také protilehlé stěny chodeb L4c (západní stěna) a L4d (východní stěna) spolu s krátkými navazujícími úseky chodeb L4a (severně od pilíře) a L4b (jižně od pilíře). Sledovaný prostor je schematicky znázorněn v Obr. 150. Staničení průzkumu je zvoleno v souladu se strukturněgeologickým mapováním, počátek staničení obou chodeb leží na pravé stěně chodby L4a, staničení tedy roste od severu k jihu.

Společná interpretace výsledků geofyzikálních měření je shrnuta graficky do formy profilového řezu, a to pro každou stěnu chodby. V řezu je vyznačen průběh hranice EDZ, který byl sestaven zejména podle gradientu rychlostního pole (částečně s přihlédnutím k radarovému měření). 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 porušené, kde je vzdálenost

diskontinuit malá (200–60 mm). Tyto dvě oblasti jsou zobrazeny odlišným šrafováním. Ojediněle se objevuje HM s velkou vzdáleností diskontinuit (600–2000 mm), ten je šrafován stejně jako HM se střední vzdáleností, jedná se o neporušenou horninu. Členění horninového masivu bylo provedeno s využitím výsledků seismických refrakčních měření (rychlostní řez), výsledků geoelektrického odporového profilového řezu získaného měřením metodou ERT a v souladu s výsledky georadarového měření. Výsledky odporových měření byly také vodítkem pro interpretaci oblastí s přítomnosti zvodnělých puklin, charakterizovaných snížením elektrického odporu, a to i v úsecích mimo zvodnění popsané v rámci

hydrogeologického monitoringu (vyznačeno v řezu také pomocí modrého šrafování). Na pozadí řezu je zobrazen petrografický popis formou barevné výplně a jsou také zakresleny pozice vybraných struktur (poruch), jejichž pozice byla v souladu s geofyzikálním obrazem (obojí převzato z výsledků strukturněgeologického mapování).

Profilové řezy a jejich interpretace pro <u>pravou (západní) stěnu chodby L4c</u> zobrazuje Elektronická příloha 16, interpretační řez je také na Obr. 151



Obr. 151 Výsledky geofyzikálního průzkumu v chodbách L4c a L4d, interpretační řez

0-4 m: v úvodu staničení chodby je HM tvořen oslabenou horninou, to je patrné jak na seismických rychlostech (pod 5600 m/s), tak na snížených hodnotách elektrických odporů. Výskyt středně porušené horniny navazuje na oslabený úsek v pravé stěně chodby L4a, kde je dokumentovaná silně alterovaná zóna v okolí staničení 40 m, která zasahuje i do zde hodnoceného bloku v jeho jz. okraji. V rámci úseku jsou patrné lokální tektonické poruchy v rozmezí metráží 0-2 m (SG05), které prochází hodnoceným blokem v celé zobrazené ploše zhruba ve směru SV-JZ. Ohraničení úseku ve staničení 4 m je na odporovém řezu poměrně ostré. Tato část se také odlišuje od následujícího úseku interpretovanou mocností oblasti porušení masivu vlivem ražby, této části je mocnost EDZ poměrně vysoká, kolem 1,6 m.

• 4–12 m: ve zbývající části stěny jsou patrné velmi vysoké hodnoty seismických rychlostí přesahující hodnoty 7000 m/s, stejně tak odporový řez zobrazuje hodnoty elektrických odporů ve vyšších desítkách tisíců ohmmetrů. HM je v tomto úseku velmi málo porušený, vzdálenost diskontinuit se pohybuje v rozmezí 600– 2000 mm. Mocnost oslabené zóny EDZ při levé stěně s v této části snižuje z 1,6 m při staničení 4 m k 0,9 m v konci chodby při staničení 12 m.

Příslušné profilové řezy a interpretační schéma pro <u>levou (východní) stěnu chodby L4c</u> jsou taktéž součástí Elektronická příloha 16. Interpretační řez je náplní Obr. 151.

• 0–4 m: v tomto úseku je v prostoru HM interpretována přítomnost tektonické poruchy SG10 (vede od chodby L4d směrem k L4c), její projevy jsou v seismickém řezu slabé, snížení seismických rychlostí jen slabě pod úroveň 6000 m/s napovídá, že porušení vázané na tuto diskontinuitu je malé, a to i přes relativně intenzivní pokles elektrických odporů (lokalizované zhruba

ve styku levé stěny L4c a pravé stěny L4a). Celkově tedy HM v tomto úseku hodnotíme jako slabě porušený. Mocnost EDZ se pohybuje kolem 1 m.

 4–12 m: tato část levé stěny L4c je stejně jako protější pravá stěna v tomto úseku jen velmi málo porušená. Patrné jsou vysoké hodnoty seismických rychlostí již prakticky od líce stěny, mocnost EDZ je zde minimální. Velmi vysoké jsou také hodnoty elektrických odporů.

Profilové řezy a interpretační schéma pro pravou<u>(západní) stěnu chodby L4d</u> jsou taktéž součástí Elektronická příloha 16. Interpretační řez je náplní Obr. 151. Hodnocení zastiženého stavu HM je následující:

0–12 m: v tomto úseku jsou detekovány vyšší seismické rychlosti (nad 6000 m/s), HM je zde porušený jen mírně. Mocnost EDZ je zde stanovena poměrně vysoká, 1,0–1,3 m. Tomu odpovídají i relativně nižší elektrické odpory v tomto úseku, hornina v blízkosti líce stěny je patrně více rozpukaná, pukliny vyplněné vodou. Projev lokální poruchy ve staničení 5 m (SG10) je v odporovém řezu dobře patrný, odezva v rychlostním řezu je výraznější uvnitř bloku dále od stěny chodby L4d. V části 8–12 m je prostor při líci stěny ovlivněný přítomností poruchy SG11, její projevy se překrývají s porušením horniny způsobeným ražbou.

Popis charakteru HM v okolí <u>východní stěny chodby L4d</u> znázorňuje Elektronická příloha 16. Interpretační řez je náplní Obr. 151. Popis zjištěných skutečností je následující:

0–12 m, úsek slabě porušeného HM v celé stěně chodby. Podle rychlostního řezu jsou patrné dvě oblasti nižších rychlostí vázané na okolí poruch SG11 (úsek v rozmezí staničení 0–3 m při křížení s L4a, zde je pokles rychlostí způsoben i porušením ražbou) a okolí poruchy SG10 ve staničení 6–8 m. V odporovém řezu je přítomnost lokální poruchy SG11 dobře viditelná v okolí staničení 3–4 m. Diskontinuita SG10 se projevuje v odporovém řezu ve staničení 6–8 m, dle rychlostního řezu ji lze sledovat dále k východu. Mocnost EDZ v tomto úseku se pohybuje v rozmezí 1,0–1,5 m, v okolí rohů bloku je vyšší.

2.8.5 Výsledky geofyzikálních měření v chodbě V5-6

Geofyzikální sledování horninového masivu v okolí stěn větrací chodby V5-6 jsou prezentovány v interpretačním řezu uvedeném v Elektronická příloha 17. V této příloze jsou také zobrazeny výsledky jednotlivých geofyzikálních metod formou profilových řezů (seismický rychlostní, odporový a radarový řez). Pozice geofyzikálních profilů a sledované části HM jsou schematicky znázorněny na Obr. 152. Rozdělení HM v interpretačním řezu je obdobné jako v případě chodeb L4c a L4d, vymezeny jsou kompaktní či slabě porušené úseky (vzdálenost diskontinuit střední 200–600 mm) a mírně porušené části masivu (vzdálenost diskontinuit malá 60-200 mm). Rozdělení HM bylo provedeno s využitím výsledků seismických refrakčních měření (rychlostní řez), výsledků geoelektrického odporového měření metodou ERT a v souladu s výsledky georadarového měření. Na pozadí řezu je zobrazen zjednodušený petrografický popis formou barevné výplně a jsou také zakresleny pozice vybraných významnějších struktur, jejichž pozice byly modifikovány v souladu s geofyzikálním obrazem (obojí převzato z výsledků strukturněgeologického mapování). Staničení větrací chodby V5-6 má počátek na křížení s pravou stěnou chodby L5, je orientováno od severu k jihu.

Pravá stěna V5-6 je graficky zhodnocena v příloze Elektronická příloha 17, interpretační řez je prezentován na Obr. 153, komentáře k interpretaci následují:

 0–12 m: úsek s přítomností středně porušené horniny (migmatit), seismické rychlosti jsou zde patrné v hodnotách pod 5600 m/s (v prostoru napojení do L5 jsou i nižší hodnoty, to ovšem



Obr. 152 Schéma profilů v chodbě V5-6

spíše souvisí s porušením vlivem ražby). Výrazné jsou projevy na odporovém řezu, patrné jsou úseky s měrnými elektrickými odpory v rozmezí 250–600 ohm.m, což ukazuje na přítomnost zvodnělých diskontinuit. V pozicích minimálních hodnot elektrických odporů je interpretována lokální tektonická porucha, která dobře koreluje s výsledky strukturněgeologického mapování. Tato struktura protíná pravou stěnu chodby na staničení 8 m. Mocnost oblasti porušení ražbou je v tomto úseku vyšší, pohybuje se kolem 1,5 až 2,0 m.

• 12–45 m: tato část pravé stěny je poměrně kompaktní, zejména podle rychlostního řezu, ve kterém jsou pro tento úsek patrné rychlosti v rozmezí 6000–6400 m/s. Elektrické

odpory jsou vyšší v části mezi metrážemi 12–29 m (v rozmezí 8000–20000 ohm.m), od staničení 29 m do konce chodby se pohybují v rozmezí 2000–8000 ohm.m. Dosah porušení vlivem ražby se pohybuje v rozmezí 0,7–1,5 m. V této části nejsou patrné známky přítomnosti tektonických poruch, přestože strukturně geologické mapování vymezilo takové ve staničení 25 a 30 m.



Obr. 153 Výsledky geofyzikálního průzkumu v chodbě V5-6, interpretační řez

V následujících odstavcích jsou komentovány výsledky měření v levé stěně chodby V5-6, profilové řezy a interpretace jsou součástí Elektronická příloha 17. Interpretační řez je zobrazen na Obr. 153.

- 0–11 m: v tomto úseku je HM málo narušený, bez přítomnosti významných struktur charakteru poruch, pouze v části 0–5 m je patrná v rychlostním řezu v hlubší části 2–3 m od líce stěny V5-6 lokální poruchová struktura, podle vysokých elektrických odporů bez vlhkosti v průlinách.
- 11–18 m: úsek středně porušeného HM v okolí interpretované struktury, která protíná levou stěnu chodby ve staničení 11–12 m. Její pozice koreluje s výsledky strukturněgeologické prohlídky. Jedná se o strukturu identickou s poruchou detekovanou na pravé stěně na metráží 8 m. To potvrzuje i obraz na profilovém řezu získaném odporovým měřením, výrazný pokles měřených hodnot až na úroveň stovek ohm.m v místě struktury ukazuje na přítomnost vodivé výplně v diskontinuitách (mineralizovaná voda). Seismické rychlosti se pohybují v rozmezí 5600–5800 m, což odpovídá mírně porušeným horninám. Mocnost zóny ovlivněné ražbou se pohybuje v rozmezí 1,0–1,5 m.
- 18–44 m: jedná se z hlediska seismického řezu o kompaktní úsek, hodnoty rychlostí většinou převyšují úroveň 6000 m/s. Mírné oslabení horniny je v rychlostním řezu patrné v okolí staničení 34 m, zde je interpretována méně výrazná diskontinuita. V odporovém řezu je oblast méně homogenní, elektrické odpory se pohybují v širokém rozmezí od 2000 ohm do několika desítek tisíc. Oslabení masivu vlivem ražby dosahuje do hloubky kolem 1 m, pouze v úseku mezi metrážemi 29–34 m dosahuje 1,5 m.

2.8.6 Výsledky geofyzikálních měření v okolí ZK v chodbě L7

V průběhu budování podzemního výzkumného pracoviště PVP Bukov II v prostoru 12. patra bývalého dolu Rožná I bylo v laboratorní chodbě s označením L7 vyraženo celkem 5 zkušebních komor. Komory mají délku 10 m a průřez (stejně jako laboratorní chodba) cca 15 m². Při ražbě těchto zkušebních komor byla použita pro každou z nich odlišná technologie trhacích prací, cílem bylo jejich vzájemné porovnání mimo jiné i z hlediska indukovaného porušení horninového masivu v blízkém okolí stěn díla a charakteru a rozsahu zóny porušení vlivem ražby, která je nazývána jako EDZ či EdZ.

komora	způsob provádění TP
ZK7-1S	hladký výlom, neelektrický roznět, obrys Bleskovice
ZK7-2S	hladký výlom, neelektrický roznět, obrys Emulex C
ZK7-1J	hladký výlom, neelektrický roznět, obrys Riohit
ZK7-2J	presplit, obrys časován 1.0, neelektrický roznět, obrys Bleskovice
ZK7-3J	hladký výlom, neelektrický roznět, obrys Bleskovice

Tab. 58 Způsob provádění trhacích prací při ražbě jednotlivých zkušebních komor v laboratorní chodbě L7

Posouzení porušení horninového masivu bylo provedeno na základě sledování geofyzikálních vlastností rychlostí šíření podélných seismických vln v horninovém prostředí, měrných elektrických odporů, šíření elektromagnetického vlnění. Seismická a geoelektrická odporová měření byla provedena na profilech vedených horizontálně po stěnách laboratorní chodby a zkušebních komor. Pozice profilů je patrná z Obr. 154. Celkem bylo sledováno 5 zkušebních komor s využitím 7 horizontálních profilů (Obr. 154). V rámci komor byly sledovány obě stěny (boky) bez čelby komor. V textu jsou uvedeny příklady grafických výstupů zpracování a vyhodnocení měření, kompletní grafické výstupy jsou součástí Elektronická příloha 18.

Výsledkem zpracování odporových měření jsou odporové profilové řezy (Obr. 155), které v prezentované variantě zobrazují rozložení měrných elektrických odporů podél stěny laboratorní chodby a zkušební komory s hloubkovým dosahem cca 3 m. Znalost hodnot elektrických odporů jsou dobrým vodítkem pro stanovení charakteru případného porušení horninového masivu. Získané odporové řezy sice nelze použít pro kvantitativní popis zóny porušené ražbou a její rozsah od líce stěny díla, jsou ovšem velmi užitečné pro popis charakteru zastiženého masivu.



Obr. 154 Schématický zákres geofyzikálních profilů v půdorysu laboratorní chodby L7



Obr. 155 Příklad výsledků geolektrických odporových měření metodou ERT (elektrická odporová tomografie), modelový odporový řez


Obr. 156 Výsledek zpracování měření seismické tomografie, rychlostní profilový řez s vyznačením interpretovaných hranic dosahu indukovaného porušení



Obr. 157 Vypočtený gradient seismických rychlostí ve směru kolmo na stěnu zkušební komory – zde zleva doprava (vlevo), červená čára vyznačuje hranici porušené zóny. Vpravo zhodnocení interpretované mocnosti dosahu porušení pomocí histogramu hodnot interpretované mocnosti.

Podrobný popis porušení způsobeného ražbou umožňují detailní rychlostní řezy získané seismickou tomografií. Rychlost šíření seismických vln v prostředí dobře koreluje s geomechanickým stavem zastižených hornin. Intenzivně porušené, hustě rozpukané horniny mají znatelně nižší hodnoty rychlostí šíření seismických vln oproti kompaktním málo rozpukaným materiálům. Prezentované seismické rychlostní řezy (Obr. 156) jsou získané numerickým zpracováním vstupních dat (soubor časů příchodu signálu od zdroje vlnění k přijímači – geofonu, spolu se známými prostorovými pozicemi všech zdrojů a přijímačů). V optimálním případě je možné podle charakteru rychlosti v řezu do něj přímo vyznačit hranici porušené oblasti, která je charakterizována jako oblast, kde již zachycená rychlost dosáhla na "původní" hodnotu odpovídající hornině, která nebyla ovlivněna prováděním výstavby podzemního díla. Ve většině případů je názornější přepočítat rychlostní řezy do formy zobrazení gradientu rychlosti se vzdáleností od líce stěny díla (dv/dx). Jedná se tedy o zobrazení dynamiky změny rychlosti ve směru

kolmém na osu sledované chodby. Takto získaný gradient je možné zobrazit plošně ve formě 2D mapy podobě jako rychlostní řez (Obr. 157) nebo také v podobě křivky ukazující průběh gradientu se vzdáleností od líce stěny v jedné úrovni staničení stěny (Obr. 158). Na těchto křivkách lze vyznačit "hraniční" hodnotu gradientu, od které nárůst rychlostí ztrácí dynamiku a stává se pozvolným (hodnoty seismických rychlostí již dosahují hodnot blízkých "původním, neporušeným" rychlostem). Při ideálním tvaru křivky gradientu (Obr. 158), např. křivka pro staničení -6 m nebo -3,5 m) se jedná o hodnotu gradientu blízkou pozici inflexního bodu křivky. Pokud máme stanovenou "hraniční" hodnotu gradientu, je možné tuto vyznačit do profilového řezu zobrazujícího izolinie gradientu pro příslušný profil (Obr. 157). V předkládaných řezech byla jako mezní hodnota zvolena úroveň 800 [m.s⁻¹.m⁻¹] (pro její stanovení byly využity i poznatky z předchozích seismických měření v dalších laboratorních chodbách). Vykreslená hranice porušené zóny (červená čára pro stěny komor, zelená čára pro stěny laboratorní chodby) sleduje izolinii odpovídající této hodnotě. Průběh hranice je možné přenést i do rychlostního řezu zkopírováním při zachování souřadnic linie. Volba "mezní" hodnoty gradientu je v prvním kroku čistě empirická, kvantitativní výsledky (mocnosti EDZ), které jsou při jejím užití získány, bude v budoucnu vhodné porovnat s výsledky dalších průzkumů a případně upravit použitá kritéria. Kvalitativní informace (tedy odlišení oblastí menšího či většího hloubkového dosahu EDZ) zůstane beze změn.

Je zjevné, že průběh gradientových křivek je v některých částech profilů odlišný od optimální varianty (optimální průběh ukazuje např. křivka pro staničení -6 m na Obr. 158) a stanovení hraniční hodnoty je někdy nesnadné, a ne zcela jednoznačné (anomální průběh gradientu s hloubkou odpovídá křivce pro staničení -4,5 m na Obr. 158. Zvláště v případech výrazných rychlostních nehomogenit (např. inverzní průběh rychlosti se vzdáleností od líce nebo plochý tvar průběhu gradientu s hloubkou) je obtížné reprezentativní hraniční hodnoty vysledovat.



Obr. 158 Průběh gradientu rychlosti ve vybraných metrážích stěny zkušební komory, červená linie vyznačuje hodnotu gradientu 800 m/s/m

Statistický popis zjištěných mocností oblasti porušené prováděním trhacích prací je pro všechny popisované zkušební komory dokumentován pomocí sloupcových grafů (příklad na Obr. 157) a tabulek vybraných parametrů popisné statistiky (Obr. 157 vpravo). Mocnost oslabené oblasti je vypočtena jako vzdálenost mezi křivkou povrchu stěny a křivkou reprezentující hranici oslabené oblasti vyznačenou jako izolinie gradientu seismických rychlostí na hodnotě 800 m/s/m v profilovém rychlostním či gradientovém řezu. Odečet hodnot mocností je proveden s intervalem 10 cm (krok odečtu ve směru staničení komory) s rozlišením 5 cm (krok vzorkování vypočteného gradientu ve směru kolmo ke stěně). Sloupcový graf odečtených mocností je zobrazen obdobně, tedy s rozdělením intervalů sledované hodnoty po 5 cm. Grafy jsou sestaveny pro každou zkoumanou stěnu jednotlivých zkušebních komor

samostatně a také sdruženou formou (obě stěny společně pro každou zkušební komoru). Toto zpracování je součástí Elektronická příloha 18.

Statistické zhodnocení interpretovaných mocností oslabené oblasti v okolí stěn zkušebních komor je souhrnně uvedeno v Tab. 59.

Pokud budeme hodnotit a porovnávat komory z hlediska průměrné mocnosti oslabené zóny, tak jako nejméně porušené vychází horninové prostředí v okolí zkušební komory ZK7-2S, naopak největší průměrné mocnosti oslabeného okolí stěn jsou patrné u zkušební komory ZK7-1J. Dvě zkušební komory na severní straně mají průměrnou mocnost oslabené oblasti nižší než tři komory v jižní části chodby. V okolí ústí zkušebních komor do chodby L7 jsou zpravidla mocnosti oslabené oblasti vyšší než ve zbytku komory, toto není překvapivé, v okolí okrajů chodby je masiv náchylný k porušení a uvolnění (i objemnějších) bloků horniny. Směrem do vnitřku komory k její čelbě se oslabení ve stěnách méně či více výrazně snižuje – mocnosti oslabené oblasti se snižují.

Na základě rychlostních seismických, odporových a georadarových řezů bylo sestaveno interpretační schéma zohledňující geomechanický stav HM v blocích vymezených stěnami zkušebních komor a stěnami laboratorních chodby. Celkem tak vzniklo 7 bloků (3 bloky na levé stěně L7 a 4 bloky na pravé stěně L7). Horninové prostředí je rozděleno na relativně kompaktní úseky slabě porušené, ve kterých je vzdálenost diskontinuit v HM střední (600–200 mm) a na úseky mírně porušené, kde je vzdálenost diskontinuit malá (200–60 mm). Tyto dvě oblasti jsou zobrazeny odlišným šrafováním. Zakreslení interpretovaného řezu spolu s výsledky všech geofyzikálních metod je součástí elektronické přílohy Elektronická příloha 18, samostatný interpretační řez je připojen na Obr. 159.

Blok vymezený levou stěnou L7 ve staničení 18–32,5 m a západní stěnou komory ZK7-1S je tvořen v úrovni odpovídající intervalu staničení 25–30 m středně porušenou horninou, oslabení materiálu je vázáno na přítomnost interpretované poruchy (křižuje stěnu chodby na metráži 26,0–26,5 m). Porucha je dobře vymezena také v odporovém řezu, snížené hodnoty měrných elektrických odporů jsou patrné v metrážích 27–30 m. V úseku staničení 20–25 m jsou horniny v blízkosti stěny L7 interpretované jako méně rozpukané, porucha v okolí staničení 22 m (identifikovaná geologickou prohlídkou) se projevuje méně výrazně.

	N	min	max	rozpětí	průměr	medián	1.kvartil	3.kvartil	SD
ZK7-1S	148	0,31	1,8	1,49	1,13	1,14	0,84	1,36	0,34
ZK7-2S	150	0,26	2,07	1,81	0,93	0,9	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	0,6	1,96	1,36	1,16	1,12	0,87	1,43	0,36

Tab. 59 Souhrn statistického zhodnocení mocnosti EDZ ve stěnách jednotlivých zkušebních komor

Úsek horninového bloku ve staničení 37–63 m v levé části chodby je vymezen východní stěnou ZK7-1S a západní stěnou ZK7-2S. V části mezi metrážemi 37–42 m jsou seismické rychlosti vyšší (nad 5 800 m/s), také elektrické odpory jsou vysoké. Tato část HM je interpretována jako slabě porušená. Oblast končí v místě tektonické poruchy, která křižuje levou stěnu chodby L7 v okolí staničení 42 m. Dále směrem k ZK7-2S jsou seismické rychlosti nižší (5 600–5 800 m/s), také v odporovém řezu jsou patrné snížené hodnoty elektrických odporů v prostoru dále od líce levé stěny (zejména ve staničení 50–56 m). Celá část bloku je tak interpretována jako středně porušená, HM vykazuje střední vzdálenost diskontinuit (60–200 mm). Pouze v okolí staničení 55 m je vymezen blok méně porušené horniny, seismické rychlosti narůstají nad úroveň 6000 m/s. Ve východním okraji tohoto dílčího bloku při stěně ZK7-2S jsou interpretovány tektonické poruchy, které navazují na poznatky strukturněgeologického mapování. Poslední hodnocený blok HM na levé straně chodby L7 je definován východní stěnou ZK7-2S a úsekem levé stěny L7 v rozmezí metráží 68–82 m. V rámci bloku převládají vyšší seismické rychlosti výrazně nad 6 000 m/s, vyšší jsou i hodnoty elektrických odporů. V blízkosti čelby ZK7-2S je interpretována lokální porucha (prochází i vedlejším blokem), která ovšem protíná blok jen okrajově, snížení rychlostí je sice patrné, ale splývá s možným porušením vlivem ražby. V odporovém řezu jsou také při čelbě ZK7-2S patrné snížené hodnoty odporu. Další tektonická porucha se projevuje ve východní části bloku, levou stěnu chodby křižuje v okolí metráže 77 m. V jejím okolí jsou seismické rychlosti snížené (5 600 m/s a méně), stejně tak lze sledovat i pokles měřených hodnot elektrických odporů. V okolí poruchy je vymezen blok středně porušeného HM, kde vzdálenost mezi diskontinuitami je v rozmezí 60–200 mm.



Obr. 159 Výsledky geofyzikálního průzkumu v okolí zkušebních komor laboratorní chodby L7, interpretační řez

První blok na pravé straně laboratorní chodby L7 je vymezen metrážemi 18–33 m na pravé stěně a západní stěnou ZK7-1J. V rámci hodnocené části převažují málo porušené horniny, kde jsou patrné vyšší seismické rychlosti (nad 6 000 m/s) stejně jako vysoké hodnoty elektrických odporů (nad 10 000 ohm.m). Oblast málo porušených hornin je rozdělena přítomností horniny vykazující snížené seismické rychlosti, které se objevují na rohu ZK7-1J a pokračují šikmo do masivu směrem k západu (k hlavnímu překopu). V tomto prostoru je interpretována tektonická porucha, která sleduje oblast snížených seismických rychlostí. Zakresleny jsou také poruchy křižující pravou stěny chodby L7 ve staničeních 22 a 26 m v souladu se strukturněgeologickou prohlídkou, jejich projevy v geofyzikálním obrazu nejsou výrazné.

Další hodnocený blok je prostorově omezen východní stěnou ZK7-1J, pravou stěnou chodby L7 v rozmezí 37–49 m a západní stěnou ZK7-2J. V západní části bloku v sousedství ZK7-1J jsou horniny vyznačeny jako středně porušené, seismické rychlosti se pohybují v hodnotách kolem 5600 m/s, také měrné elektrické odpory jsou v tomto prostoru snížené. Pouze lokálně na úrovni staničení 40–43 m je vymezena přítomnost kompaktnější horniny s menší intenzitou rozpukání. Od staničení 44 m směrem k ZK7-2J jsou horniny málo porušené, hodnoty seismických rychlostí stoupají nad 6000 m/s, patrné jsou

i vysoké elektrické odpory, které jsou ovšem v okolí staničení 4 m chodby ZK7-2J výrazně snížené, to ukazuje na přítomnost poruchy, která vede od západní stěny ZK7-2J zhruba v jz. směru do prostoru bloku. V rychlostním seismickém řezu je také porucha patrná díky sníženým hodnotám rychlostí. Další tektonická porucha je vymezena zhruba v polovině bloku na staničení 43 m chodby L7 a vede jižním směrem do masivu.

Třetí popisovaný horninový blok je ohraničen východní stěnou ZK7-2J, úsekem pravé stěny chodby L7 v metrážích 53–63 m a západní stěnou ZK7-3J. Okrajové části bloku při stěnách obou ZK jsou tvořeny málo porušenou horninou, která se projevuje vyššími seismickými rychlostmi, zejména v části při ZK7-3J jsou horniny kompaktní s rychlostmi výrazně nad 6000 m/s. Tomu v této části odpovídají i vysoké hodnoty elektrických odporů. Oblast slabě narušené horniny v okolí stěny ZK7-2J je méně rozsáhlá, částečně je zde patrný vliv snížení rychlostí vlivem ražby, i tak se vyskytují v jižní části rychlosti nad 6000 m/s. Elektrické odpory jsou ovšem snížené. Střední část hodnoceného bloku je označena jako středně porušená, lze zde sledovat znatelný pokles seismických rychlostí (dokonce i pod 5000 m/s). Jedná se o výrazněji oslabenou oblast v místě tektonické poruchy, která křižuje chodbu L7 v pravé stěně ve staničení 59 m.

Poslední hodnocený úsek při pravé stěně chodby L7 je vymezen východní stěnou ZK7-3J, pravou stěnou L7 v rozmezí staničení 67–78 m a západní stěnou větrací chodby V7-8. Tento blok je převážně kompaktní, interpretována je přítomnost slabě porušené horniny, pouze "uvnitř" bloku na úrovni metráží 69–73 m se objevují středně až velmi porušené horniny, které jsou charakterizovány znatelným poklesem seismických rychlostí (dokonce pod 5000 m/s).

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 technologii trhacích prací, tedy celkové a dílčí náloži a vrtném schématu. Měření účinků trhacích prací probíhá formou sledování rychlosti kmitání pomocí třísložkových snímačů – geofonů. Popis seismického eventu je prezentován ve formě grafu časového záznamu rychlosti kmitání z každého odstřelu, s vyznačením amplitudy a frekvence maximálního kmitu i prezentace celého frekvenčního spektra. S rostoucí vzdáleností mezi snímačem a zdrojem energie klesají registrované amplitudy a také dochází ke změnám ve frekvenčním spektru sledovaného záznamu. Obecně dochází k tomu, že vysokofrekvenční část signálu je tlumena více, maxima frekvenčního spektra se s rostoucí vzdáleností posunují do nižších frekvencí.

Trhací práce při budování PVP Bukov II jsou zajištěny na základě Smlouvy s DIAMO, s. p. (SO2020-044) a jsou prováděny jako obrysové, metodou hladkého výlomu s délkou záběru maximálně 2 m. Používány jsou běžné důlní skalní trhaviny (např. výlom Perunit E, obrys Bleskovice Startline 100) a elektrické rozbušky (např. DeD-S-FE).

Běžný odstřel v trase laboratorní chodby má následující spotřebu materiálu (hladký výlom, záběr 2 m max; Tab. 60). Takto jsou standardně prováděny všechny ražby, pouze u některých vybraných zkušebních komor v chodbě L7 byl způsob realizace trhacích prací modifikován.

Profil (m²)	Perunit E (kg)	Bleskovice 100 (m)	Rozbuška (ks)
14,8	75	105	104

Tab. 60 Spotřeba materiálu při běžném odstřelu chodby

2.9.1 Měření seismických účinků trhacích prací

Sledování seismických účinků trhacích v roce 2024 navázalo plynule na měření z roku 2023. Použité technické vybavení se nezměnilo, stejně tak nebyly nutné upravit parametry záznamu a digitalizace naměřených dat. Podrobné informace k obojímu jsou detailně uvedeny v třetí průběžné zprávě projektu (Soejono et al. 2024).

Třísložkové seismické snímače (geofony) byly v roce 2024 umístěny ve stejných pozicích jako v roce 2023, umístění jednotlivých snímačů popisuje Obr. 160 a také Tab. 61. Další podrobnosti ke snímačům lze dohledat taktéž v třetí průběžné zprávě (Soejono et al. 2024).

Snímač	X1	X2	Y1	Y2	Z1	Z2
1	1127927,352	1127926,064	622725,736	622720,850	20,479	20,504
2	1127891,982	1127892,203	622720,302	622715,474	19,860	19,917
3	1127847,547	1127849,198	622712,732	622708,290	19,460	19,502
4	1127796,274	1127798,217	622695,476	622691,388	19,188	19,187
5	1127923,212		622629,488		20,562	
5*	1127929,42		622643,07		20,37	
6	1127958,575		622634,469		20,311	

Tab. 61 Zaměřené pozice jednotlivých snímačů

Pozn: Pozice 1 odpovídá snímači ve stěně, pozice 2 pak průmětu osy snímače na stěnu protější strany chodby. **5***: nová pozice od 03/2023.



Obr. 160 Umístění snímačů pro monitorování seismických účinků trhacích prací

2.9.2 Vyhodnocení záznamů seismických účinků trhacích prací

Všechny seismické záznamy jsou ukládány v naměřeném formátu (*.mio, standardní formát předního výrobce A/D měřících karet National Instruments). Záznamy jsou průběžně vyhodnocovány, to 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 frekvencí 2000 Hz,
- pro vybraný časový stupeň jednotlivého odstřelu v každé složce s omezením horní frekvencí 2000 Hz.

Vyhodnocené hodnoty jsou spolu s pozicí TP (staničením příslušné čelby) zaznamenány do přehledu (tabulky). Příklad tabulky s vyhodnocením je na obrázku Obr. 161. Kompletní tabulka je součástí Elektronická příloha 19. Grafické výstupy zpracování seismických záznamů sestávají z několika částí:

- Souhrnný seismogram, který zobrazuje časový průběh rychlostí kmitání pro všechny registrované kanály v celé délce zaznamenané události, jeden odstřel trvá cca 2–2,5 s. Příklad souhrnného seismogramu je na obrázku Obr. 162.
- Detailní grafická prezentace vyhodnocení "po snímačích", pro každý snímač jsou zobrazeny kromě celkového časového průběhu záznamu také vyhodnocené hodnoty na všech třech měřených složkách (vertikální, podélná, příčná) a vypočtená hodnota prostorové rychlosti. Příklad tohoto výstupu je včetně detailního popisu uveden na obrázku Obr. 163.
- Grafy maximálních rychlostí kmitání pro skupinu událostí (odstřelů) zobrazují logický celek sestavený z několika dílčích záznamů. Pro záznamy odstřelů na čelbách v jedné chodbě jsou zobrazeny úrovně pro jednotlivé snímače (příklad pro chodbu L4b je na obrázku Obr. 164) a také souhrnně prostorové rychlosti pro všech 6 snímačů (ilustrační graf pro chodbu L4b je na obrázku Obr. 165). Grafická prezentace výsledků je náplní Elektronická příloha 19.

Záznam	datum a čas	chodba	staničení		S	1	S	2	S	3	S	4	S	5	S	6
					V max	f max	V max	f max								
Bukov425	27.11.2023	ZK6-15	1.90	1	7.7	2500	34.2	2500	90.9	2692	3.8	2692	6.1	648	3.4	3182
с	23:33:28	ZK6-15	1.90	2	5.9	2500	25.6	2500	59.4	1207	6.6	660	4.8	2500	3.7	2917
		ZK6-15	1.90	3	8.1	1750	45.4	2333	104.2	648	6.2	700	4.8	2692	5.2	2692
-		ZK6-15	1.90	Ρ	10.8	2692	50.8	2692	117	1250	8.6	686	6.5	1458	5.4	2692
Bukov426	28.11.2023	ZK6-15	3.80	1	12.4	2500	44.9	2500	84.8	2500	4.1	2059	7.6	2917	3.9	2500
	23:32:10	ZK6-15	3.80	2	8.3	1667	39.8	2500	66.1	1029	5.9	714	5.7	1944	3.8	2917
		ZK6-15	3.80	3	9.5	2917	59.5	2188	83.5	1522	6.1	745	6	3182	5.6	2500
		ZK6-1S	3.80	P	12.6	2500	61.9	2188	101.7	1591	7.7	745	8.5	2500	6	2917
Bukov427	30.11.2023	ZK6-15	5.80	1	9	2917	33.8	2333	101.4	2500	4.9	946	7.1	2692	4.2	2917
	23:33:02	ZK6-15	5.80	2	7.9	2917	22.5	1667	63.1	1400	8.6	796	4.3	3889	4	1346
		ZK6-15	5.80	3	9.1	1400	37.6	1591	95.7	946	8.5	729	4.5	3182	6	2692
		ZK6-1S	5.80	Ρ	10	1522	40	2500	110.1	897	11.9	745	7.2	1842	<mark>6.4</mark>	2692
Bukov428	01.12.2023	ZK6-15	7.70	1	9.6	2500	26.8	2059	139.9	2500	4.9	2917	6.5	2692	3.4	2917
	23:44:04	ZK6-15	7.70	2	7.5	1522	24.3	2500	70.9	2917	6.6	761	4.8	2917	3.5	2692
		ZK6-1S	7.70	3	7.8	1250	35.3	1842	100.5	2333	7	854	6.3	2917	4.4	2692
	-	ZK6-1S	7.70	P	11.4	2500	38.3	2500	158.3	2500	9.6	700	6.7	2917	4.6	2917
Bukov429	04.12.2023	ZK6-15	9.30	1	7.4	2692	26.5	2500	124.1	2692	4.3	673	7.8	2333	4	875
	23:27:45	ZK6-1S	9.30	2	6.2	547	17	1250	83.4	2917	8	603	6.8	507	4.4	648
		ZK6-1S	9.30	3	10.1	686	28.3	1842	135.7	574	6.6	636	3.8	2059	4.3	2500
		ZK6-15	9.30	Ρ	11.1	1667	29.3	1750	140.2	583	10.2	636	10.2	1000	6.1	565
Bukov430	05.12.2023	ZK6-15	10.00	1	7.5	2692	29.5	2500	120.4	2692	6.4	2333	5.9	2917	2.8	2917
	23:27:29	ZK6-15	10.00	2	5.9	875	22.9	2692	126.1	2917	9.4	972	3	3182	3	2917
		ZK6-1S	10.00	3	5.5	778	30	2692	118.6	1061	9.9	814	4.5	2917	2.6	2500
		ZK6-15	10.00	P	8.1	761	38.2	2500	138.2	2059	13.2	854	6.1	2917	3.2	2500

Obr. 161 Ukázka vyhodnocení seismických záznamů účinků trhacích prací (V_{max} – maximální rychlost kmitání, f_{max} – frekvence kmitání nesoucí maximální rychlost, 1 – vertikální složka, 2 – horizontální složka podélná, 3 – horizontální složka příčná, P – prostorová složka)



Obr. 162 Ukázka souhrnného seismogramu pro číslo měření 451 pro odsřel na čelbě zkušební komory ZK5-1J ve staničení 7,2–9,3 m



Obr. 163 Ukázka vyhodnoceného seismogramu pro číslo měření 451 na snímači 4 pro společný 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×H1×H2). V levé části jsou odečtené hodnoty maximálního zákmitu, ve střední části je okno s časovým průběhem rychlosti a vpravo frekvenční spektrum



Obr. 164 Hodnoty rychlostí kmitání na snímači 4 pro jednotlivé složky kmitání (vertikální, podélnou H1 a příčnou H2) při odstřelech v ZK5-1J



Obr. 165 Hodnoty prostorových rychlostí kmitání měřené na snímačích 1–6 pro odstřely v ZK5-1J

Obr. 164 zobrazuje maximální rychlosti kmitání na snímači 4 pro odstřely při ražbě ZK5-1J společně se vzdáleností mezi odstřelem a snímačem. Tato vzdálenost se v rámci registrovaných odstřelů mění jen

málo a sledovaní útlumu registrovaných maxim rychlosti kmitání v závislosti na rostoucí vzdálenosti mezi bodem odstřelu a snímačem zde není dobře patrné (viz také Obr. 165 s vykreslenou závislostí pro všechny snímače). Projevují se jiné jevy, například rozdílný odpor těženého materiálu proti rozpojení. Obecně platí, že seismická odezva – otřes (registrovaná hodnota rychlosti kmitání) je tím menší, čím snáze překonává nálož odpor lomové stěny proti rozpojení. Proto také předimenzovaná nálož působí menší otřes než nálož poddimenzovaná (Šťastník 2005).

Hodnocením účinků trhacích prací se zabývá technická norma ČSN 73 0040 – Zatížení stavebních objektů technickou seizmicitou a jejich odezva. Popis šíření vibrací prostředím vychází ze stanovení konstanty přenosu K. Její hodnoty jsou závislé na typu prostředí a vzdálenosti od zdroje (místa odstřelu), charakteru zdroje. Pro hlavní typy prostředí jsou orientačně tabelovány a lze je použít k odhadu účinků trhacích prací za pomoci zákona útlumu seismických vln (viz rovnice dále). Podobně jako v předchozích letech byla provedena podrobná analýza získaných záznamů v souladu se zmíněnou ČSN. V roce 2024 proběhly trhací práce jen ve dvou zkušebních komorách v chodbě L5, součástí této zprávy je také zpracování záznamů ze dvou ZK v chodbě L6, které byly raženy v závěru roku 2023.

Zákon útlumu seismických vln lze popsat vztahem:

$$v_{max} = K \cdot \frac{\sqrt{Q}}{l}$$
(46)

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. redukovaná vzdálenost L_R [m.kg^{-1/2}], definovaná jako:

$$L_R = \frac{l}{\sqrt{Q}} (47)$$

Pak je možné psát:

$$v_{max} = \frac{K}{L_R}$$
(48)

Poslední rovnici je možné prezentovat graficky jako závislost rychlosti kmitání v_{max} na redukované vzdálenosti L_R (Obr. 166), případně jako graf závislosti koeficientu K na redukované vzdálenosti L_R (Obr. 168). Znalost této závislosti umožňuje upravit hmotnost nálože tak, aby seismické zatížení prostředí, konstrukcí či objektů v dané vzdálenosti od zdroje energie (odstřelu) nepřesáhlo stanovené limity (Kaláb 2007). Tento vztah může být velmi dobře definovaný, ale ve složitých geologických poměrech může mít velmi nízkou korelaci, menší korelace bývá také pozorována pro malé hodnoty vzdáleností (Kaláb et al. 2011). V případě koeficientu přenosu K jsou sledovány jeho minimální a maximální hodnoty vybraných eventů, které dané události dostatečně popisují. Jedná se o záznamy s pořadovými čísly 425 až 430, které odpovídají trhacím pracím při ražbě zkušební komory ZK6-1S. Uvedené analýzy pro vybrané jevy jsou náplní následujících obrázků Obr. 166, Obr. 168 a tabulky Tab. 62. Obdobné zpracování pro další skupiny záznamů je součástí Elektronická příloha 19. Na Obr. 166 jzobrazena závislost rychlosti kmitání na redukované vzdálenosti pro měření účinků odstřelu v ZK6-1S. Velmi těsná korelace vychází u této závisloti při použití mocninné závislosti (hodnota spolehlivosti R2 = 0,919), při použití lineární regrese je závislost volnější (hodnota spolehlivosti R2 = 0,546).



Obr. 166 Závislost konstanty rychlosti kmitání v na redukované vzdálenosti L_R pro snímače 1–6 (viz Tab. 2): vertikální složka, nálož s časovým stupněm 0 (4 ks, 2400 g), komora ZK6-1S

konstanta přenosu – K								
snímač	L _R MIN [m]	K [kg ^{-1/2} m ² s ⁻¹]	L _R MAX [m]	K [kg ^{-1/2} m ² s ⁻¹]				
S1	40,8	243,3	45,9	165,5				
S2	21,1	601,4	25,5	361,5				
S3	14,5	1743,3	17,3	1023,5				
S4	48,8	179,5	53,9	346,7				
S5	49,6	301,4	53,1	182,0				
S6	68,3	231,6	72,2	182,6				

Tab. 62 Vypočtené hodnoty konstanty přenosu K pro krajní hodnoty (MAX a MIN) redukované vzdálenosti L_R pro odstřely v chodbě L4a a snímače 1–6



Obr. 167 Závislost konstanty rychlosti kmitání v redukované vzdálenosti L_R pro snímače 1–6 (viz Tab. 2): vertikální složka, nálož s časovým stupněm 0 (4 ks, 2400 g), komora ZK6-1S



Obr. 168 Závislost konstanty přenosu K na redukované vzdálenosti L_R (vybrané maximální a minimální hodnoty L_R pro jednotlivé snímače; viz Tab. 62) proložené lineární regresní křivkou (regresní koeficient $R^2 = 0,54$): vertikální složka, nálož s časovým stupněm 0 (4 ks, 2400 g), komora ZK6-1S

Celkové zhodnocení měření a zobrazení výsledků bylo provedeno formou plošného zobrazení izolinií registrovaných rychlostí. Aby bylo možné získat mapu izolinií s využitím všech registrovaných záznamů (kromě odstřelů ve větracích chodbách a v komorách ZK7, které se lišily hmotnostmi dílčích náloží a dalšími parametry), byla provedena fiktivní záměna zdroje a snímače. Naměřené rychlosti kmitání jsou tak v mapě zobrazeny v pozici odpovídající místu odstřelu, naopak odstřel je fiktivně uvažován v pozici snímače. Samozřejmě jsou společně zpracována data vždy jen pro odpovídající snímač. Celkem tak byly sestaveny 4 mapy pro hypotetické odstřely v pozicích snímačů 1-4, které registrovaly po celou dobu sledování (snímače 5 a 6 byl osazeny až po dokončení chodeb L7 a L8 v srpnu 2021). Tento způsob zpracování a zobrazení izolinií předpokládá, že parametry jednotlivých odstřelů se nemění co do hmotnosti trhaviny v jednotlivých stupních a v časování stupňů. To ovšem není v některých ojedinělých případech dodrženo – první odstřely v začátcích laboratorních chodeb mohly být z provozních důvodů modifikovány, stejně tak úvodní odstřely v případě zkušebních komor. Zajímavě působí zejména mapy zobrazené pro pozice odpovídající snímačům 3 a 4, které mají dostatek údajů pro menší vzdálenosti odstřel - snímač, tato data naopak chybí v mapách izolinií s fiktivními odstřely v pozicích snímačů 1 a 2, důvodem je, že blízké odstřely v chodbách L7 a L8 proběhly před zahájením seismického monitoringu. Mapa izolinií pro fiktivní odstřel v místě snímače 4 je uvedena na obrázku Obr. 169, ostatní izolinie jsou součástí Elektronická příloha 19. V blízkosti pozice snímače 4 jsou izolinie deformovány, což může ukazovat na rozdílný útlum ve směru přibližně S-J oproti směru V-Z. Tato anizotropie může odrážet geologickou stavbu, směr S-J odpovídá generelně směru paralelně s foliací, směr V–Z pak ukazuje zhruba kolmo k průběhu foliace. Podobně jsou izolinie deformovány i v zobrazení pro snímač 3 (uvedeno v Elektronická příloha 19).



Obr. 169 Mapa izolinií maximálních rychlostí kmitání (prostorová složka) pro fiktivní pozici odstřelu v pozici snímače 4

2.10 Charakterizace EDZ

V oblasti charakterizace EDZ byly v roce 2024 prováděny a dokončeny práce týkající se realizace vodních tlakových zkoušek pro charakterizaci EDZ jak pracovníky ÚGN, tak pracovníky SG Geotechnika. V tomto roce řešení projektu byla dokončena jak první, tak druhá etapa měření (v 6. a 9. měsíci 2024) na všech 27 naplánovaných EDZ vrtech na chodbách L8, L7, L5 a L4a-d (viz Obr. 170). Popis měřicích zařízení, návrh rozmístění a způsobu zhotovení vrtů pro monitorování EDZ na PVP Bukov II a popis způsobu měření jsou uvedeny v 3. průběžné zprávě (Soejono et al. 2024).



Obr. 170 Schéma rozmístění EDZ vrtů na chodbách PVP Bukov II

2.10.1 Způsob zpracování výsledků měření pomocí VTZ pro EDZ

Naměřené hodnoty z prvního a druhého měření v jednotlivých etážích EDZ vrtů byly zpracovány do grafů udávajících průtok v závislosti na hloubce měřené etáže. Tyto grafy pro jednotlivé EDZ vrty jsou uvedeny na Obr. 172 až Obr. 174.

Na základě vývoje a zastoupení hodnot průtoku v proměřovaných etážích u všech EDZ vrtů jsme si určili charakteristickou prahovou hodnotu průtoku. Hodnoty průtoku 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 (měnící se foliace, výskyt primárního porušení s otevřenými a vyhojenými puklinami s různou kvalitou a typem minerální výplně atd.). Z histogramu na Obr. 171 a níže uvedených grafů na Obr. 172 až Obr. 174 je zřejmé, že tuto srovnávací úroveň reprezentuje hodnota průtoku cca 1 ml.min-1, hodnoty pod a na úrovni této hodnoty reprezentují cca 80 % všech naměřených dat (viz Obr. 171). Oblasti HM rozprostírající se od líce výrubu směrem do masivu, ve kterých byly naměřeny vyšší hodnoty průtoku (cca 20 % naměřených dat), jsme z pohledu hydraulických vlastností HM označili jako masiv, ve kterém se projevuje přímý vliv EDZ. Z grafů na Obr. 172 až Obr. 174 je zřejmé, že tato úroveň bývá překročena i v hlubších partiích HM, což je ale dle našeho názoru ovlivněno nehomogenní strukturní stavbou zájmového HM s výskytem primárních struktur porušení, resp. jeho proměnlivou foliační stavbou. Z těchto grafů je rovněž zřejmé, že v mnoha případech naměřené hodnoty průtoků ve druhém měření nejsou zcela konzistentní s hodnotami naměřenými během prvního měření. Ve většině případech se jedná o výskyt nižších hodnot průtoku při druhém měření. Na tuto skutečnost může mít vliv uzavírání hydraulicky vodivých trhlin (zvyšující se hydraulický odpor), což může být například způsobeno přítomnosti jílových minerálů v diskontinuitách HM, výskytem nečistot na stěnách vrtů způsobující jejich ucpávání apod. V případě naměřených vyšších hodnot průtoku v etážích během 2. měření pak naopak mohlo docházet k vyplavování a pročišťování vodivých trhlin v zájmovém horninovém masivu.

Přijatý způsob vyhodnocení a stanovení rozsahu EDZ dle výše uvedeného přístupu na základě přijaté prahové hodnoty průtoku cca 1 ml.min⁻¹ je zpracován tabelárně v Tab. 63 společně s poznámkami k vlastnímu měření a naměřeným hodnotám průtoku.



Obr. 171 Histogram zastoupení naměřených průtoků v jednotlivých etážích EDZ vrtů



Obr. 172 Grafické znázornění hodnot průtoku v jednotlivých etážích EDZ vrtů na chodbě L8 a L7



Obr. 173 Grafické znázornění hodnot průtoku v jednotlivých etážích EDZ vrtů na chodbě L7



Obr. 174 Grafické znázornění hodnot průtoku v jednotlivých etážích EDZ vrtů na chodbě L7, L5 a L4a



Obr. 175 Grafické znázornění hodnot průtoku v jednotlivých etážích EDZ vrtů na chodbě L4b, L4c a L4d

2.10.2 Shrnutí výsledků měření

Stanovené hodnoty rozsahu zóny EDZ z Tab. 63 jsou pro přehlednost zpracovány graficky na Obr. 176. Z tohoto grafu je zřejmé, že u 5 vrtů EDZ nebylo možné na základě průběhu hodnot měřeného průtoku stanovit rozsah EDZ (u cca u 17 % vrtů). Maximální hodnota dosahu EDZ – 0,9 m – byla naměřena pouze u jednoho vrtu. Rozsah zóny EDZ od 0,5–0,9 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 (Obr. 176).



Obr. 176 Grafické znázornění rozsahu zóny EDZ v proměřovaných vrtech

Tab. 63 Tabulka stanovených rozsahů EDZ na základě vodních tlakových zkoušek

Označení vrtu	Délka vrtu (m)	Hydraul. rozsah EDZ (m)	Poznámka
L8-6DR	2,2	0,1–0,2	
L8-12DR	1,2	0,4–0,5	
L8-29	1,2	0,3–0,4	
L8-32DL	2,2	Nelze stanovit	Hodnoty průtoků po celé délce vrtu oscilují okolo 1 mm.min ⁻¹ , mírně nad tuto hodnotu se hodnota průtoku (3–5 ml.min ⁻¹) dostává v oblasti 1,3- 1,8 m; viz Obr. 172 (pravděpodobně vliv primárního porušení HM).
L8-47.2	2,2	0,1–0,2	
L8-52.15	1,1	0,1–0,2	
L8-76R	10,5	0,3–0,4	
L7-28DL	2,1	0,2–0,3	Hodnota průtoku zvýšena nad 1 ml.min ⁻¹ (cca 10 ml.min ⁻¹) v oblasti vrtu cca 1,8–2,2 m; viz Obr. 172 (pravděpodobně vliv primárního porušení HM).
L7-42DL	2,2	Nelze stanovit	Hodnoty průtoků po celé délce vrtu se nacházejí pod zvolenou hodnotou průtoku 1 mm.min ⁻¹ ; viz Obr. 173.
L7-50L	10,5	Nelze stanovit	Hodnoty průtoků po celé délce vrtu se nacházejí pod zvolenou hodnotou průtoku 1 mm.min ⁻¹ viz Obr. 174.
L7-58DL	2,2	0,6–0,8	
L7-72DL	2,2	0,3–0,4	
L7-58DR	2,2	Nelze stanovit	Hodnoty průtoků v úvodní části vrtu (do cca 0,4– 0,5 m) oscilují okolo 1 mm.min ⁻¹ , v navazující části vrtu se hodnoty průtoků nacházejí nad touto hranicí; viz Obr. 174 (pravděpodobně vliv primárního porušení HM).
L7-71DR	2,2	0,1–0,2	
L7-77DR	2,2	0,6–0,7	
L7-87L	15,5	0,4–0,5	
L7-90F	10,3	0,4–0,5*	* hodnoceno vzhledem k průběhu hodnot u druhého měření, první měření ukázalo vyšší průtoky téměř po celé délce vrtu (Obr. 174)
L7-42DR	2,2	0,3–0,4	
L5-12DR	2,2	Nelze stanovit	Vyšší hodnoty průtoku nad stanovenou mez až ve vzdálenosti cca 0,5 m od ústi vrtu (pravděpodobně vliv primárního porušení HM; viz Obr. 174)

Označení vrtu	Délka vrtu (m)	Hydraul. rozsah EDZ (m)	Poznámka
L5-40DR	2,2	0,1–0,2	
L4a-53R	2,0	0,3–0,4	
L4a-63L	2,0	0,2–0,4	
L4a-72L	15,2	0,4–0,6	Ve vzdálenosti cca 1,6–15 m dochází ke komunikaci s blízkým vrtem L4a 72 UL; viz Obr. 174.
L4a-75F	2,1	0,4–0,5	
L4b-54L	2,0	0,0–0,1 (0,4?)	Ve vzdálenosti 0,4 m u prvního měření naměřena hodnota cca 10 ml.min ⁻¹ (viz Obr. 175)
L4c-6R	2,0	0,1–0,2	
L4d-6L	2,0	0,8–0,9	

2.11 Systém klasifikace horninových bloků

Klasifikační systém horninového prostředí URA (Underground Rock-mass Assessment; Soejono et al. 2025) je v rámci tohoto projektu navržen jako nástroj pro stanovení vhodnosti horninového masivu pro ražbu ukládací chodby a pro posouzení ukládacích chodeb HÚ z hlediska umístění konstrukčních prvků a ukládacích vrtů. Cílem těchto prací bylo vytvořit jednoduchý, efektivní a prakticky použitelný postup pro kategorizaci horninového masivu pro reálné použití v podmínkách výstavby HÚ. Hlavním požadavkem na klasifikační systém je, aby hodnocení bralo ohled na dlouhodobou bezpečnost uložiště. 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 typech hornin.

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

Samotný klasifikační systém URA je prezentován v samostatné zprávě (Soejono et al. 2025). V této zprávě je detailně popsán hodnotící postup, použité výzkumné metody, klasifikační parametry atd. Dále jsou v této zprávě shrnuty výsledky použitých metod a výsledky testování samotného klasifikačního systému URA v reálných podmínkách nově budovaných podzemních chodeb L4a a L4b na PVP Bukov II a diskutovány zkušenosti získané při pracích na tomto projektu a potencionální nedostatky jednotlivých metod a klasifikace jako celku.

2.12 Integrace dat do GIS projektu

V rámci zpracování podkladů byl aktualizován GIS projekt zahrnující rozsah doražených prostor PVP Bukov II získaný skrze Zadavatele od DIAMO, s.p. o.z. GEAM. Výsledný projekt byl vytořen v programu QGIS a zahrnuje ve formě shapefile následující vrstvy, které byly kromě výše zmíněného vytvořeny v rámci tohoto projektu:

- dokumentační body (hydrogeologické, čelby, petrografie),
- lokace odebraných vzorků (petrologie, SEM, geochemie žil, celohorninová geochemie, velkoobjemové vzorky),
- strukturní a geologická mapa PVP Bukov II,
- chodby, vrty a metráže (DIAMO s.p., upraveno ČGS).

Pokud je tedy třeba dohledat lokace jednotlivých čeleb, dokumentačních bodů, místa odběrů vzorků, ze kterých pocházejí výše zmiňované výsledky, lze je jednoduše nalézt v tomto projektu nebo samostatně v některém z odevzdávaných shapefilů.

Výsledný projekt je odevzdán na úložiště Sharepoint.

3 Shrnutí

V posledním roce řešení projektu byly dokončeny veškeré zbývající dokumentace nově ražených prostor, revalidována data z dříve získaných dokumentací a plně dokončen 3D geologický model. Stejně tak byly dokončeny fotogrammetrické modely a laserscany prostor PVP Bukov II.

V roce 2024 byly petrograficky zdokumentovány nově vyražené prostory v PVP Bukov II: chodby L4c a L4d a zkušební komory ZK5-1S, ZK5-1J, ZK6-1S a ZK6-2S v chodbách L5 a L6. Na skenovacím elektronovém mikroskopu byly změřeny nové minerální analýzy a plošné analýzy výbrusů reprezentativních litologií z PVP Bukov II (biotitická pararula s granátem, biotitický migmatit s granátem, a granátický amfibolit) a stanoveny teplotně-tlakové podmínky vývoje hlavních minerálních asociací těchto litologií.

Z veškerých geologických dokumentací pořízených v prostorách PVP Bukov II a z fotogrammetrických modelů a 3D modelu dokumentovaných prostor byla vytvořena strukturněgeologická mapa s podkladem litologie, rozsah jednotlivých chodeb a zkušebních komor, zobrazující zejména poruchové zóny probíhající skrz PVP Bukov II.

Nově analyzovaný geochemický vzorek amfibolitu z chodby L4a má slabě intermediální složení odpovídající bazaltu až andesitu. Tento vzorek má v základních rysech podobné geochemické vlastnosti jako dříve analyzované vzorky. Je o něco bohatší na CaO a chudší na MgO, má výrazné nabohacení LILE, LREE a HFSE, výraznou negativní Nb anomálie a méně výrazné propady v Zr a Th.

Redoxní potenciál prostředí PVP Bukov II odpovídá přechodným až mírně redukčním podmínkám. Amfibolity i pararuly jsou velmi odolné vůči oxidaci. Redukční kapacita hornin se pohybuje kolem 1 000 mg O₂ na 100 g horniny. Nejvyšší redukční kapacitu vykazují pararuly a amfibolity a nižší redukční kapacitu májí migmatity a migmatitizovaný amfibolity.

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. Aktuálně nejvyšší měřitelná vydatnost relativně soustředěného průsaku v rámci PVP Bukov II v chodbě L8 je přibližně 0,001 I.s-1 a vydatnost výtoku z monitorovaného vrtu z geotechnické stanice na konci chodby L4a je přibližně 0,004 I.s-1. Vydatnější přítoky jsou vázány na kritické struktury SG19 (chodba L6, L7 a L8), SG04 (chodba L4b a L5), SG03 (chodba L4a a L4b) a SG02 (chodba L4b). Proudění podzemních vod je v prostoru PVP Bukov II silně ovlivněno výskytem a orientací foliačních ploch. Rozsah a vydatnost dokumentovaných průsaků se v průběhu řešení projektu měnily, některé dokumentované přítoky byly v závěru roku 2024 zcela nebo téměř vyschlé.

PVP Bukov II se v rámci dolu Rožná nachází v zóně výskytu podzemních vod s převahou sodíku. Vzájemný podíl síranů a hydrogenuhličitanů postihuje míru ovlivnění primárních podzemních vod odpovídající hloubkové úrovně (typ Na-HCO₃) a jejich posun k silně ovlivněným důlním vodám (typ Na-SO₄).

Na vybraných vzorcích amfibolitu a biotitického migmatitu z oblasti PVP Bukov II byly studovány transportní vlastnosti se zaměřením na difuzní a sorpční charakteristiky. Biotitický migmatit obecně vykazuje nižší hodnoty D_e , které dosahují maxima 2,1·10⁻¹³ m²·s⁻¹ (HTO) a 0,45·10⁻¹³ m²·s⁻¹ (³⁶Cl) orientací usměrnění. Amfibolit u vzorků s paralelní vykazuje hodnoty D_e mezi 1,71–9,07 ·10⁻¹³ m²·s⁻¹ (HTO) a 0,12–4,10 ·10⁻¹³ m²·s⁻¹ (³⁶Cl) 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.

V roce 2024 byly realizovány laboratorní zkoušky mechaniky hornin na třech vzorcích amfibolitů a migmatitu. Stanoveny byly všechny jejich fyzikální, tepelné, pevnostní, deformační, technologické

a petrofyzikální vlastnosti. Z výsledků je patrné, že se jedná o horniny s extrémně nízkou pórovitostí a vysokou pevností.

V této etapě byly petrofyzikální parametry (hustotních parametry, magnetická susceptibilita, elektrická konduktivita, radioaktivita a anizotropie magnetické susceptibility) stanoveny na vzorcích ze tří velkoobjemových vzorků v chodbách L4a a L5 reprezentující typické horninové typy. Analyzované vzorky jsou vzájemně fyzikálně odlišné, což reflektuje jejich odlišné petrografické složení. Jednotlivé vzorky se liší jak v látkových parametrech (hustotní parametry, magnetická susceptibilita, radioaktivita), tak i v hodnotách elektrické konduktivity. Petrofyzikální charakteristiky studovaných vzorků nicméně v základních rysech odpovídají těm studovaným v předchozích etapách projektu.

Na základě naměřených hodnot napětí HM byl pro zkoumanou oblast kolem vrtu L4a-73D stanoven tento sumární výsledek:

- větší hlavní horizontální napětí SH = 34 MPa,
- menší hlavní horizontální napětí Sh = 16 MPa,
- vertikální geostatická složka napětí Sv = 14 MPa
- poměr hodnot naměřených a přijatých vertikálních a horizontálních složek napětí HM Sv : SH : Sh vychází 1,0 : 2,4 : 1,2,
- poměr horizontálních složek napětí HM SH : Sh byl stanoven na ~2,1,
- azimut hlavního horizontálního napětí SH se pohybuje v intervalu cca 132°±10°.

Na GS-L4 byla zjištěná orientace hlavních složek horizontálního napětí určených pomocí hydraulického štěpení stěn vrtu a orientace maximálního horizontálního napětí z analýzy ovalizace vrtu v tomto případě méně souhlasná, než tomu bylo u stanice GS7. Tato orientace osciluje ve směru cca S–J a o odklání se od výsledků z hydroštěpení stěn vrtu (viz Obr. 141 a Obr. 142).

Geofyzikální charakterizace prostředí v místě laboratorních chodeb L4c a L4d byla provedena bezprostředně po dokončení hornických prací. Výsledkem je rozčlenění HM v obou stěnách chodeb dle oslabení horniny, které je způsobené přítomností puklin a jehož intenzita je závislá na četnosti diskontinuit v objemové jednotce. HM v okolí obou chodeb je, s ohledem na ostatní části budovaného PVP Bukov II, poměrně málo porušený. Zastižené horniny se projevují vysokými hodnotami seismických rychlostí (nad 7000 m/s) i měrných elektrických odporů (vyšší desítky tisíc ohm.m).

V úvodní části chodby L4c v jejím pravém boku v úseku 0–4 m je patrný dosah oslabené zóny zachycené v chodbě L4a v jejím úseku 19–45 m (osa chodby L4c odpovídá metráží 46 dle staničení L4a). V této části pravé stěny jsou také patrné dvě výraznější poruchy. Ostatní části této krátké chodby (pravá strana v části 4–12 m a celá levá strana v rozmezí 0–12 m) jsou relativně kompaktní, tvořené slabě porušenou horninou se vzdáleností diskontinuit 200–600 mm, v úsecích vysokých seismických rychlostí 600–2000 mm. Lokální porucha v levém boku na staničení 2 m má slabší projevy v rychlostním řezu.

HM v okolí chodby L4d je s ohledem zachycené seismické rychlosti také jen mírně porušený – také zde jsou patrné vysoké seismické rychlosti převyšující 7 000 m/s (zejména v levém boku chodby). Poruchy či pukliny zachycené strukturně-geologickým zkoumáním se v rychlostním i odporovém řezu také projevují, snížení hodnot sledovaných veličin není ale velké, což ukazuje na malé oslabení v okolí těchto struktur. Převládající vzdálenost diskontinuit je 200–600 mm. V levém boku chodby se jedná o projevy lokálních poruch v metrážích 3,5 m a 6 m, v pravém boku pak indikace na staničení 5 m.

Chodba V5-6 prochází převážně slabě porušenou horninou s převládající vzdáleností diskontinuit 200– 600 mm. Intenzivněji porušené horniny jsou zachycené v okolí významnějších diskontinuit, a to v levém boku v úseku 11–18 m, v pravém boku v části 0–12 m.

Geofyzikální měření v okolí zkušebních komor v chodbě L7 sledovalo zejména ovlivnění horniny ražbou v těsném okolí stěn komor i chodby L7. Bylo provedeno stanovení mocnosti ovlivněné oblasti na základě rychlostního pole zjištěného seismickou tomografií. Ve sledovaných horninových blocích byly sestrojeny interpretační řezy a rozdělení HM podle intenzity porušení.

Významným výstupem tohoto projektu je nově sestavený systém klasifikace horninového masivu pro účely budování hlubinného úložiště RAO. Tento systém je předmětem zvláštní zprávy, ve které jsou shrnuty možné přístupy ke klasifikaci, tvorba tohoto systému, klaisfikace prostor v rámci příprav a ražby ukládací chdoby i ukázka jeho využití v rámci prostředí PVP Bukov II.

Veškeré odběry vzorků, lokace čeleb, geologická mapa a další podklady byly shromážděny do prostředí GIS a integrovány do projektu, kde lze na podkladu rozsahů jednotlivých chodeb interaktivně dohledávat jejich lokalizace.

Reference

- ANDERSON J. L., SMITH D. R. (1995): The effects of temperature and fo2 on the Al-in-hornblende barometer. – American Mineralogist, 80, 5-6, 549–559.
- ANNAN A. P. (2003): Ground penetration radar principles, procedures & aplications, Sensor&Software.
- ARAPOV J. A., BOJCOV V. J., ČESNOKOV N. I., DJAKONOV A. V., HALBRŠTÁT J., JAKOVJENKO A. M., KOLEK M., KOMÍNEK J., KOZYREV V. E., KREMČUKOV G. A., LAŽANSKÝ M., MILOVANOV I. A., NOVÝ V., ŠORF F. (1984): Československá ložiska uranu. – Československý uranový průmysl, koncern. Příbram. 365 p.
- BAKKER R.J., DIAMOND L.W. (2000): Determination of the composition and molar volume of H₂O-CO₂ fluid inclusions by microthermometry. Geochim Cosmochim Acta, 64(10), 1753–1764.
- BARTON N., LIEN R., LUNDE J. (1974). Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. Rock Mechanics 6(4), 189-236.
- BASS BECKING L. G. M., KAPLAN I. T., MOORE D. (1960): Limits of the natural environment in terms of pH and oxidation-reduction potentials. –J. Geol, 68: 243-284.
- BETHKE C. M., FARELL B., SHARIFI M. (2023): GWB Essentials Guide. –Aqueous Solutions, LLC, Champaign, Illinois. 238 p.
- 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.
- BISH D. L., POST J. E. (1989): Quantitative analysis, in Modern Powder Diffraction, Review in Mineralogy, vol. 20, Bish, D. L., Post, J. E. (Eds), Mineralogical Society of America, Washington, USA
- BLUNDY J.D., HOLLAND T.J.B. (1990): Calcic amphibole equilibria and a new amphibole-plagioclase geothermometer. Contributions to Mineralogy and Petrology, 104, 2, 208–224
- BODNAR R.J. (1993): Revised equation and table for determining the freezing point depression of H₂O-NaCl solutions. Geochim. Cosmochim. Acta, 57(3), 683–684.
- BOYNTON W.V. (1984): Geochemistry of Rare Earth Elements: Meteorite Studies. In: Henderson, P. (Ed.): Rare Earth Element Geochemistry, Elsevier, New York, 63–114.
- BRADBURY M.H., BAYENS, B. (1999) A generalized sorption model for the concentration dependent uptake of cesium by argillaceous rocks. J. Contam. Hydrol. 42, 141–163.
- BRUKER AXS (2015): Diffrac.Eva, 4.1.Karlsruhe, Germany.
- BUKOVSKÁ Z., VERNER K., BURIÁNEK D., DOBEŠ P., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ B., ERBAN V., FRANĚK J., HALODOVÁ P., HOLEČEK J., JAČKOVÁ I., JELÉNEK J., KOPAČKOVÁ V., KOUCKÁ L., LAUFEK F., LNĚNIČKOVÁ Z., KOČERGINA J., MYŠKA O., NAHODILOVÁ R., PERTOLDOVÁ J., RUKAVIČKOVÁ L., SOEJONO I., ŠVAGERA O., VESELOVSKÝ F. (2017): Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov - závěrečná zpráva. – TZ 191/2017, Archiv SÚRAO, Praha, 692 pp.
- 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., KOUCKÁ L., KRYL J., KŘÍBEK B., KUBEŠ M., KUBINA L., KUČERA R., KUKUTSCH R., LAUFEK F., MIXA P., MOZOLA J., NÁSIR M. M., PALÁT J., PATOČKA M., POŘÁDEK P., ROSENDORF T., SOEJONO I., STAŠ L., VAVRO L., VESELOVSKÝ F., VOREL J., WACLAWIK P., WERTICH V., ZAJÍCOVÁ V., ZELINKOVÁ T. (2020): ZÍSKÁNÍ dat z hlubokých horizontů dolu Rožná - závěrečná zpráva. – TZ 464/2020, Archiv SÚRAO.
- BUKOVSKÁ Z., 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., HOLEČEK J., HANÁK J., ČERMÁK F., KAŠPAR R., MAREČEK L., NEDVĚD J., VAVRO L., VACLAWIK 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., 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., GEORGIOU L., JANEČEK I., KOČAN K., HOFMAN D., JÁKL M., BRTNA M., TŘÍSKALOVÁ I., VELÍMKOVÁ A., DOBEŠ P. (2025): Geologická a geotechnická charakterizace horninového prostředí – PVP Bukov II – závěrečná zpráva. – TZ812/2025, SÚRAO, Praha.
- BURIÁNKOVÁ, K., BŘÍZOVÁ, E., FÜRYCH, V., HANŽL, P., KADLECOVÁ, R., KIRCHNER, K., LYSENKO, V., LHOTSKÝ,
 P., MRNKOVÁ, J., PERTOLDOVÁ, J., ROŠTÍNSKÝ, P., SKÁCELOVÁ, D., SKÁCELOVÁ, Z., VÍT, J., TRÁVNÍČEK, B.
 (2005): Základní geologická mapa ČR 1 : 25 000 s Vysvětlivkami, list 23-224 Žďár nad Sázavou.
- BUZEK F., HLADÍKOVÁ J., LEGIERSKI J., ŠMEJKAL V. A VOKURKA K. (1985): Metody zjišťování stabilních a radiogenních izotopů. MS ČGÚ, Praha.
- COX K.G., BELL J.D., PANKHURST R.J. (1979): The Interpretation of Igneous Rocks. George Allen & Unwin, London.
- ČERVINKA R. (2014): Stanovení kationtové výměnné kapacity (CEC) a výměnných kationtů pomocí metody s Cu(II)triethylentetraminem. Certifikovaná metodika. Č.j. SÚJB/ONRV/15452/2014.
- ČERVINKA R., GONDOLLI J., HAVLOVÁ V., RUKAVIČKOVÁ L (2016): Výběr reprezentativních podzemních vod a příprava jejich syntetických ekvivalentů. Technická zpráva 41/2016, SÚRAO.
- ČERVINKA R., KLAJMON M., ZEMAN J., VENCELIDES Z., RUKAVIČKOVÁ L., GONDOLLI J. (2018): Chování horninového prostředí – Příprava geochemického modelu úložiště – geochemické výpočty a model reakčního transportu. Závěrečná zpráva. – TZ 271/2018, Archiv SÚRAO.
- DARLING R. S. (1991): An extended equation to calculate NaCl contents from final clathrate melting temperatures in H₂O-CO₂-NaCl fluid inclusions: Implications for P-T isochore location. Geochim Cosmochim Acta 55(12), 3869–3871.
- DAVIS D.W., LOWENSTEIN T.M., SPENCER R.J. (1990): Melting behavior of fluid inclusions in laboratory-grown halite crystals in the systems NaCl-H₂O, NaCl-KCl-H₂O, NaCl-MgCl₂-H₂O, and NaCl-CaCl₂-H₂O.– Geochim. Cosmochim. Acta, 54, 591–601.
- DEBON F., LE FORT P. (1983): A chemical-mineralogical classification of common plutonic rocks and associations. Trans Roy Society of Edinburg, Earth Sciences, 73, 135–149.
- FULLER A. J., SHAW S., PEACOCK C. L., TRIVEDI D., SMALL J. S., ABRAHAMSEN L. G., BURKE, I. T. (2014). Ionic strength and pH dependent multi-site sorption of Cs onto a micaceous aquifer sediment. Applied geochemistry, 40, 32-42.
- GARRELS, R.M., CHRIST, C.L. (1965): Solutions, Minerals and Equilibria. –W. H. Freeman, San Francisco, 450 p.
- GONDOLLI J., BRYNYCH V., DRTINOVÁ B., HOFMANOVÁ E., VEČERNÍK P., VIDENSKÁ K., VOPÁLKA D. (2013) Výzkum interakčních procesů vybraných radionuklidů s materiály inženýrských bariér, Zpráva 14270, projekt TIP FR-TI1/362, SÚRAO, Praha, 2013.
- 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.

- GRINĚNKO V.A. (1962): Prigotovlenije dvuokisi sery dlja izotopnogo analiza. Ž. neorg. chimiji, 7, 2479, Moskva
- HANÁK J., CHLUPÁČOVÁ M., ONDRA P. (2017): Stanovení petrofyzikálních charakteristik horninového prostředí pro území potenciálních lokalit HÚ (závěrečná zpráva). TZ 103/2017, Archiv SÚRAO.
- HAVLOVÁ V., BRÁZDA L., KOLOMÁ K., ŠUSTKOVÁ E., ROSENDORF T., ZUNA M. (2018): Migrační procesy radionuklidů v prostředí krystalických hornin a migrační parametry hornin českého masivu. SÚRAO: TZ 333/2018
- HEUZE F. E. (1984): Suggested Method for estimating the In-Situ Modulus of Deformation of Rock Using the NX-Borehole Jack. Geotechnical Testing. Journal GTJODJ, Vol. 7, No. 4, pp 205-210.
- HEUZE F. E., AMADEI B. (1985): The NX-Borehole Jack: A Lesson in Trials and Errors. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 22 No. 2, pp 105-122. Pergamon Press Ltd.
- HOLLAND T., POWELL R. (2011). An improved and extended internally consistent thermodynamic dataset for phases of petrological interest, involving a new equation of state for solids. *Journal of Metamorphic Geology*, 29(3), 333–383.
- HUDEČEK V., ŠANCER J., ZUBÍČEK P. (2019): Certifikovaná metodika pro vyhodnocování geomechanických vlastností hornin. VŠB-Technická univerzita Ostrava, 49 s.INTELLIGENT RESOURCES INC. (2021), Rayfract manual, <u>http://rayfract.com</u>.
- INTERNATIONAL CENTER FOR DIFFRACTION DATA (ICDD 2018): Powder Diffraction File (PDF-2 2018), 12 Campus Blvd, Newtown Square, PA 19073, USA.
- IRVINE T., BARAGAR W. (1971): A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. Canadian Journal of Earth Sciences, 8, 523–548.
- JANOUŠEK V., FARROW C. M., ERBAN V. (2006): Interpretation of whole-rock geochemical data in igneous geochemistry: introducing Geochemical Data Toolkit (GCDkit). Journal of Petrology 47(6):1255–1259.
- JANOUŠEK V., ROGERS G., BOWES D.R. (1995): Sr-Nd isotopic constraints on the petrogenesis of the Central Bohemian Pluton, Czech Republic. Geol. Rdsch., 84, 520–534.
- JOHNSON W.M., MAXWELL J.A. (1981): Rock and Mineral Analysis. Wiley, New York. 489 pp.
- 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.
- LEHTO J., PUUKKO E., LINDBERG A., VOUTILAINEN M. (2019). Batch sorption experiments of cesium and strontium on crushed rock and biotite for the estimation of distribution coefficients on intact crystalline rock. Heliyon, 5(8).
- MCCREA, J. M. (1950): On the isotopic chemistry of carbonates and a paleotemperature scale. Journal of Chemical Physics, 18, 849–857.
- MIYASHIRO A. (1974): Volcanic rock series in island arcs and active continental margins. American Journal of Science, 274, 321–355.

- NEUBECK, A. (2016). Comparative cation exchange capacity experiments on Laxemar fracture coating material using four different methods. Technical Report TR-15-04, Svensk Kärnbränslehantering AB/Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company.
- OHLSSON, Y., & NERETNIKS, I. (1997). Diffusion data in granite. Recommended values (No. SKB-TR--97-20). Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- PEARCE J.A. (1996): A user's guide to basalt discrimination diagrams. In: Wyman, D.A. (Ed.), Trace Element Geochemistry of Volcanic Rocks: Applications for Massive Sulphide Exploration. Geological Association of Canada, Short Course Notes, 12, 79–113.
- PIN C., BRIOT D., BASSIN C., POITRASSON F. (1994): Concomitant separation of strontium and samarium– neodymium for isotopic analysis in silicate samples, based on specific extraction chromatography. Anal. Chim. Acta 298, 209–217.
- PITTER P. (1998): Výpočet celkové mineralizace a její význam v hydrochemii. Chem. Listy 92, 772-776.
- POKORNÝ J., POKORNÝ P., SUZA P., HROUDA F. (2011): A multi-function Kappabridge for high precision measurement of the AMS and the variations of magnetic susceptibility with field, temperature and frequency. In: Petrovský, E., Herrero-Bervera, E., Harinarayana, T., Ivers, D. (Eds.), The Earth'sMagnetic Interior. IAGA Special Sopron Book Series, vol. 1. Springer, pp. 292–301.
- POTTS P.J. (1995): A hand book of silicate rock analysis. Blackie Academic and Professional, London. 622 pp.
- POTY B., LEROY J., JACHIMOWICZ L. (1976): Un nouvel appareil pour la mesure des temperatures sous le microscope: L' installation de microthermometrie Chaixmeca. – Bull. Soc. fr. Mineral. Cristallogr. 99, 182–186.
- RENÉ M. (2002): The REE-U-Th distribution in hydrothermally altered rocks at the Rožná uranium deposit, Czech Republic. – In: Kříbek B., Zeman J. (eds.): Uranium deposits: From their genesis to their environmental aspects. Proc. Int. Workshop organized by the Czech Group of the IAGOD, Prague, September 10–11, 2002, 107–110. Czech Geol. Surv. Praha.
- RIEL N., KAUS B.J.P., GREEN E.C.R., BERLIE N. (2022) MAGEMin, an Efficient Gibbs Energy Minimizer: Application to Igneous Systems. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 23, e2022GC010427.
- SHAND S.J. (1943): Eruptive Rocks. Their Genesis, Composition, Classification, and Their Relation to Oredeposits with a Chapter on Meteorite, 2nd edition. John Wiley & Sons, New York, pp. 1–444.
- 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.
- 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. – TZ810/2025, SÚRAO, Praha.
- SUN S.S., MCDONOUGH W.F. (1989): Chemical and isotopic systematizes of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: Saunders, A.D., Norry, M.J. (eds) Magmatism in the Ocean Basins. Geological Society London Special, 42, 313-345.
- ŠŤASTNÍK, S. (2005): Těžba, lomařství a úpravnictví, modul M01, Těžba a lomařství. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Brno, 105 s.
- TAYLOR, S.R., MCLENNAN, S.M. (1995): The Geochemical Evolution of the Continental Crust. Reviews in Geophysics, 33, 241–265.
- TESAŘ O. (1989): Klasifikace skalních a poloskalních hornin pro podzemní stavby. Autoreferát k disertační práci. Věd. rada UK Praha, 23 s.

- TULLBORG E-L., DRAKE H., SANDSTROM B. (2008): Palaeohydrology: A methodology based on fracture mineral studies. - Applied Geochemistry, 23, 1881-1897.
- 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.
- VAN DEN KERKHOF A.M., THIERY R. (2001): Carbonic inclusions. Lithos 55, 49–68.
- WHITE R. W., POWELL R., HOLLAND T. J. B., JOHNSON T. E., GREEN, E. C. R. (2014). New mineral activitycomposition relations for thermodynamic calculations in metapelitic systems. Journal of Metamorphic Geology 32, 261-286.
- ZEMAN J., CAHOVÁ M. (2020): Nepublikované výsledky získané v rámci řešení projektu GeoBarr CZ.02.1.01/0.0/0.0/16 026/0008459. - MU Brno

Technické normy a standardy:

- ASTM (2016): Standard Test Method for Determining the In Situ Modulus of Deformation of Rock Using the Diametrically Loaded 76-mm (3-in.) Borehole Jack, ASTM D4971-1. - ASTM International, West Conshohocken, PA.
- 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 73 0040 (ČSN 730040): Zatížení stavebních objektů technickou seizmicitou a jejich odezva. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019.
- ISRM (2016): International Society For Rock Mechanics Commission On Testing Methods, 1996. Suggested method for deformability determination using a stiff dilatometer. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 33, No. 7. pp. 733-741. Elsevier Science Ltd.



info@surao.cz | www.surao.cz