Technická zpráva 596/2022

GEOLOGICKÁ A GEOTECHNICKÁ CHARAKTERIZACE HORNINOVÉHO PROSTŘEDÍ PVP BUKOV II

PRŮBĚŽNÁ ZPRÁVA

Autoři: Zita Bukovská a kolektiv



Praha, rok 2022



NÁZEV ZPRÁVY: Geologická a geotechnická charakterizace horninového prostředí – PVP Bukov II – první 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., RUKAVIČKOVÁ L., CHABR T., MORÁVEK R., LEVÝ O., SOSNA K., SOUČEK K., VAVRO M., ZELINKOVÁ T., DOBEŠ P., ŠVAGERA O., KRYL J., SOEJONO I., ŘIHOŠEK J., HANÁK J., ČERMÁK F., KAŠPAR R., MAREČEK L., NEDVĚD J., VAVRO L., MYŠKA O., JANEČEK I. (2022): Geologická a geotechnická charakterizace horninového prostředí – PVP Bukov II – první průběžná zpráva – TZ596/2022, SÚRAO, Praha.

ŘEŠITELÉ:

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

AUTORSKÝ KOLEKTIV: Bukovská Z.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, Dobeš P.¹, Švagera O.¹, Kryl J.¹, Soejono I.¹, Řihošek J.¹, Hanák J., Čermák F.³, Kašpar R.³, Mareček L.³, Nedvěd J.³, Vavro L.⁴, Myška O.¹, Janeček I.⁴

Jozef Urík Manažer projektu (SÚRAO) 2. 3. 2022 Igor Soejono Manažer projektu (Společnost Bukov II) 2. 3. 2022



Obsah

1	Úvo	od	2
2	Pos	stup řešení projektu	3
	2.1	Geologická a strukturněgeologická charakterizace	3
	2.1.1	Dokumentace čeleb	.3
	2.1.2	Dokumentace vyražených prostor1	1
	2.2	Petrografická a geochemická charakteristika1	5
	2.2.1	Petrografická charakteristika1	5
	2.2.2	Geochemická charakteristika2	22
	2.3	3D strukturněgeologický model2	23
	2.4	Hydrogeologická charakterizace2	26
	2.4.1	Rešerše2	26
	2.4.2	Hydrogeologická dokumentace	34
	2.5 testy	Stanovení fyzikálně mechanických a geotechnických vlastností hornin laboratornír 42	ni
	2.5.1	Fyzikální vlastnosti ²	13
	2.5.2	Tepelné vlastnosti	18
	2.5.3	Pevnostní a deformační vlastnosti	50
	2.5.4	Technologické vlastnosti5	52
	2.5.5	Petrofyzikální vlastnosti	53
	2.6	Geofyzikální charakterizace6	6
	2.6.1	Georadar6	6
	2.6.2	ERT6	39
	2.6.3	Mělká refrakční seismika7	'3
	2.6.4	Výsledky geofyzikálních měření v chodbě L77	'5
	2.6.5	Výsledky geofyzikálních měření v chodbě L87	'8
	2.7	Seismické účinky trhacích prací	32
	2.7.1	Měření seismických účinků trhacích prací	32
	2.7.2	Vyhodnocení záznamů seismických účinků trhacích prací	35
	2.8	Systém klasifikace horninových bloků - rešerše	39
	2.8.1	Konvenční klasifikační systémy	39
	2.8.2	Host Rock Classification (HRC)) 1
	2.8.3	Klasifikace HRC pro měřítko M1 – úložiště) 7
	2.8.4	Klasifikace pro měřítko tunel M0,110)1
	2.8.5	Měřítko úložná komora – "canister" - M0,0110)4

3	Plái	n prací 3/22-2/23107
3.	1	Geologická a strukturně-geologická charakterizace107
3.	2	Petrografická a geochemická charakteristika107
3.	3	3D strukturněgeologický model107
3.	4	Hydrogeologická charakterizace108
3.	5	Transportní charakteristiky109
3.	6	Stanovení fyzikálně mechanických a geotechnických vlastností hornin laboratorně 109
3.	7	Stanovení fyzikálně mechanických a geotechnických vlastností hornin in-situ testy 109
3.	8	Geofyzikální charakterizace110
3.	9	Seismické účinky trhacích prací110
3.	10	Charakterizace EDZ/EdZ110
3.	11	Klasifikace horninových bloků110
4	Zho	dnocení horninového prostředí chodeb L7 a L8111
4	.1.1	Zhodnocení horninového prostředí L7111
4	.1.2	Zhodnocení horninového prostředí L8112
5	Shr	nutí114

Seznam elektronických příloh:

Elektronická příloha 1 Grafický přehled primárních dat z charakterizace chodby L7 (petrografie, hydrogeologie, geofyzika)

Elektronická příloha 2 Grafický přehled primárních dat z charakterizace chodby L8 (petrografie, hydrogeologie, geofyzika)

Elektronická příloha 3 Detailní popis hydrogeologických dokumentačních bodů

Elektronická příloha 4 Chemické analýzy podzemních vod

Elektronická příloha 5 Laboratorní protokoly zkoušek SG Geotechnika

Elektronická příloha 6 Geofyzikální měření v laboratorní chodbě L7, pravá stěna. Profilové řezy (radarový, rychlostní a odporový) a souhrnný interpretační řez

Elektronická příloha 7 Geofyzikální měření v laboratorní chodbě L7, levá stěna. Profilové řezy (radarový, rychlostní a odporový) a souhrnný interpretační řez

Elektronická příloha 8 Geofyzikální měření v laboratorní chodbě L8, pravá stěna. Profilové řezy (radarový, rychlostní a odporový) a souhrnný interpretační řez

Elektronická příloha 9 Geofyzikální měření v laboratorní chodbě L8, levá stěna. Profilové řezy (radarový, rychlostní a odporový) a souhrnný interpretační řez

Elektronická příloha 10 Zpracování seismických záznamů účinků trhacích prací - souhrnná tabulka

Elektronická příloha 11 Zpracování seismických záznamů účinku trhacích prací - grafické shrnutí pro jednotlivé chodby

Seznam použitých zkratek:

ABI	akustická karotáž
AM	aritmetický průměr
AMS	anizotropie magnetické susceptibility
AV ČR	Akademie věd České republiky
CEG	Centrum experimentální geotechniky
C.V.	variační koeficient
Do	obiemová hustota
Dm	mineralogická hustota
F	modul přetvárnosti
	modul přetvárnosti stanovený v rozsahu 20–40 % maximální působící sílv
	elektrická odporová tomografie
eU	ekvivalentní obsahy uranu
eTh. Th	ekvivalentní obsahv thoria
EL	elektrická vodivost, konduktivita
F	magnetická foliace
FM\/	fyzikálně mechanické a geotechnické vlastnosti
	Groundwater Chemical Index
GS	deotechnická stanice
нм	borninový masív
HPU	tepelná produkce (heat production units)
HRC	Host Rock Classification
K	obsah draslíku
к	hvdraulická 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
k _n	koeficient nlynopropustnosti
l I	magnetická lineace
MID	wsokotlaká rtuťová porozimetrie
	ontická karotáž
o Di	
ρ Ρ (//)	směr rovnoběžný s motomorfní folizcí horniny
	Sher Townobezhy Simeramonini Tollaci Hominy
	Rock Mass Ralling Rock Quality Designation
SD	směrodatná odchvlka
SKB	Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co
SRF	stress reduction factor
T	tvarový parametr
т	transmisivita
ТМА	termomechanická analýza
TP	trhací práce
Р	stupeň anizotropie
U	obsahy uranu
ÚGN	Ústav geoniky
UZV	ultrazvuková vlna
VCh	větrací chodba
VES	vertikální elektrické sondování
VO	velkoobjemový vzorek

- ZDA základní dokumentační analýza
- ZK zkušební komora
- μ Poissonovo číslo
- σ elektrická konduktivita
- 6_{Pd} pevnost v prostém tlaku
- σ_{Ptp} pevnost v příčném tahu stanovená tzv. brazilskou zkouškou
- ø aritmetický průměr

Abstrakt

Tato zpráva popisuje práce zhotovené v prvním roce řešení veřejné zakázky Geologická a geotechnická charakterizace horninového prostředí – PVP Bukov II. Charakterizační a popisné práce přímo navazují na ražbu prostor pro budoucí podzemní laboratoř a zahrnují 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. Důležitou součástí je rešerše využívaných klasifikačních systémů pro popis horninového masivu a hydrogeologická rešerše. Zpráva je doplněna stručným přehledem prací plánovaných pro druhý rok řešení projektu.

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 first year of the public contract Geological and geotechnical characterisation of the rock environment – PVP Bukov II. The characterisation and descriptive works are directly related to the excavation of the premises for the future underground laboratory. These include in particular: geological and geotechnical documentation of the faces and walls of the workings, petrographic, mineralogical and structural geological documentation, hydrogeological characterisation of the environment, as well as determination of the physical and mechanical properties of the rock mass in situ and in the laboratory, geophysical characterisation and monitoring of the seismic effects of blasting. An important part of this report is the research of the classification systems used to describe the rock mass and hydrogeological research. The report includes also brief overview of the work planned for the second year of the project.

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 prvním roce řešení veřejné zakázky Geologická a geotechnická charakterizace horninového prostředí – PVP Bukov II, tedy v období od března 2021 do února 2022. V rámci plnění této zakázky realizační tým následuje postup dodavatele prací v podzemí a tak byly v uplynulém roce realizovány práce v chodbách L7, L8, L5, L6 v rozsahu dle uvedeného stavu (Obr. 1). V druhé části zpráva stručně komentuje plán prací pro další rok plnění zakázky, tedy období od března 2022 do února 2023.



Obr. 1 Situace ražeb a projektu k 25. lednu 2022 – vyznačení vyražených a dokumentovaných prostor v prvním roce řešení projektu včetně průběhu dosud realizovaných vrtů na PVP II

2 Postup řešení projektu

2.1 Geologická a strukturněgeologická charakterizace

Dokumentace nově vyražených prostor probíhá dle postupu ražeb, jejichž harmonogram je na tomto projektu nezávislý. V rámci prvního roku řešení projektu byly vyraženy prostory chodeb (Obr. 1) L7 (0–90 m), L8 (0–90 m), dílčí část L6 (0–20 m) a část L5 (0–71 m).

2.1.1 Dokumentace čeleb

2.1.1.1 Geomechanická a geotechnická dokumentace ražeb

Celkově probíhala ražba ve velmi dobrých podmínkách z hlediska stability podzemního díla. Zhoršené vlastnosti horninového masivu byly pozorovány pouze v místě křížení tektonických poruch s mírně ukloněnou plochou foliace, případně v blízkosti křížení chodeb.

Pro geotechnickou dokumentaci čeleb bylo užito tří indexových klasifikačních systémů užívaných v podzemním stavitelství RMR (Bieniawski 1989), QTS (Tesař 1990) a Q systém (Barton 1987). Tyto indexové klasifikace jsou počítány na základě parametrů (Obr. 2) 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. Podobně málo se měnil parametr napjatosti horninového masivu (SRF – Q index).

Veškeré záběrové listy a podklady z dokumentací byly odevzdány na úložiště Sharepoint k 2. 3. 2022 v části <u>1.2 geologická a strukturněgeologická charakterizace</u>.

			klasifikace QTS (T	esař)
parametr	hodnota	jednotky	body T	poznámky
TSa	100	[MPa]	17	
TSb	0,1	[m]	26	
TSc	sevření	[mm]	21	odvozený od rozevření trhlin (nejvyšší zjištěné rozevření)
	TS=TSa+TS	b+TSc	64	
	redukce základ	ní kvality horninovéh	o masívu TS	
	а		5	sklon hlavních diskontinuit je mezi 30° a 80°
	b		0	nepočítá se
	g		2	neměřitelný přítok podzemní vody
	d		0	nepočítá se
	QTS=TS-(a+	b+g+d)	57	QTS=TS-(a+b+g+d)
			klasifikace RMR - hoo	dnocení
parametr	·	hodnota	jedotky	body
pevnost v	tlaku sc	100	[MPa]	12
index kva	lity hornin RQD	68,8	%	13
vzdálenos	st puk l in	0,1	[m]	8
		mírně drsný povrch c	lisk., rozevření puklin < 1	
charakter	diskontinuit	mm, mírně alte	rované plochv disk.	25
vliv podze	emní vodv	vlhký		10
		součet bodů		68
vliv orient	ace diskontinuit			-10
		RMR body		-10
<u> </u>				
		klas	ifikace kvality horninov	ého masiyu O
narametr	a v	Mue	nroměnné	bodnoty
ROD	J		68.8	nounoty
lu počet r	auldin y m ³		14	
Jv-pocer p	DUKIIN V M		14	
				jeden charakteristický systém nuklin
In-nočet r	nuklinových svstér	ານບໍ	2	jeden charaktensticky system pukin
	parametyen eyeter			
				hladké zvlněné pukliny
Ir-drepost	t puklin			
51-01511051	t pukin		2	
				nevně vyhojená, neměknoucí výnlň (křemen, kalcit)
la-ukazatel alterace nuklin		0.75	pevne vyhojena, nemeknouči vypin (kremen, kalčit)	
Ja-ukazat			0,75	
			suchý výrub nebo minimální přítok (místně méně než 5 l/min)	
Jw-ukazal	tel zvodnění		1	
				slabé nadouvání (odprysk) (masivní hornina)
SRF-nani	atost hor, masivu		6	
	atoot nor. masiva	000	 Les	
		$o = \frac{KQD}{T}$	Ir JW	15 39999990
in day of		$Q = \frac{1}{In} * \frac{1}{In}$	$Ia^* \overline{SRF}$	10,2000003
Index Q		jn	u Shi	

Obr. 2 Příklad formuláře s parametry pro výpočet indexových klasifikací

2.1.1.1.1 Dokumentace ražby chodby L5

Chodba L5 je sledována od počátku její ražby dne 19. 8. 2021. Sledovaný úsek (Obr. 3) je k 31. 1. 2022 od staničení 0 do 72,2 m. V chodbě je nejvýraznější sledovanou diskontinuitou metamorfní foliace s průměrnou vzdáleností diskontinuit v rozsahu od 0,1 do 0,3 m. Tektonické poruchy subparalelní s osou chodby byly pozorovány ve staničení 6,5–12,5 a 27,5–44,2 m. Tektonické poruchy kolmé k ose chodby byly zastiženy v úsecích staničení 3,8–19,3 a 46,4–57,7 m. Charakter diskontinuit je od hladkých neprůběžných puklin po drsné zvlněné foliace. Výplň diskontinuit tvoří kalcity, křemen a sulfidy, v případě tektonických poruch jsou místy pozorovány výplně tvrdým jílem do mocnosti 5 mm. Celkově lze chodbu L5 hodnotit na základě indexových klasifikací jako stabilní podzemní stavbu s minimem potřebné dodatečné výztuže. Kvalita horninového prostředí se mírně zlepšuje směrem dále od portálu chodby.



Obr. 3 Změna indexových klasifikací v průběhu chodby L5

2.1.1.1.2 Dokumentace ražby chodby L6

Chodba L6 je sledována od počátku její ražby dne 18. 10. 2021. Sledovaný úsek je k 31. 1. 2022 od staničení 0 do 55,0 m (Obr. 4). V chodbě je nejvýraznější diskontinuitou metamorfní foliace s průměrnou vzdáleností diskontinuit v rozsahu od 0,06 do 0,30 m. Tektonické poruchy paralelní s osou chodby byly pozorovány téměř v celé délce chodby ve staničení 6,3–55,0 m. Tektonická porucha kolmá k ose chodby byla zastižena ve staničení 4,6 a 16,1 m. Charakter diskontinuit je od hladkých neprůběžných puklin po drsné zvlněné foliace. Výplň diskontinuit tvořily kalcity, křemen a sulfidy, v případě tektonických poruch byly místy pozorovány výplně tvrdým jílem do mocnosti až 30 mm. Chodbu L6 lze z pohledu indexových klasifikací hodnotit jako stabilní podzemní dílo s téměř neměnnou kvalitou horninového prostředí.



Obr. 4 Změna indexových klasifikací v průběhu chodby L6

2.1.1.1.3 Dokumentace ražby chodby L7

Chodba L7 byla sledována v období od 1. 3. 2021 do 13. 5. 2021. Sledovaný úsek byl od staničení 32,6 do 90,5 m. Nejvýraznější sledovanou diskontinuitou byla metamorfní foliace s průměrnou vzdáleností diskontinuit v rozsahu od 0,04 do 0,3 m. Výraznější tektonické poruchy paralelní s osou chodby byly pozorovány ve staničení 38,8–65,3 a 88,7–90,3 m. Tektonická porucha kosá k ose chodby byla zastižena ve staničení 81,7–90,5 m. Přítomnost tektonických poruch ve výrubu se projevila ve výpočtu indexových klasifikací celkovým snížením bodů v těchto místech (Obr. 5). Charakter diskontinuit je od hladkých neprůběžných puklin po drsné zvlněné foliace. Výplň diskontinuit tvořily kalcity, křemen, epidot a sulfidy, v případě tektonických poruch byly místy pozorovány výplně tvrdým jílem do mocnosti až 10 mm. Chodbu L7 lze z pohledu indexových klasifikací hodnotit jako stabilní s potřebou dodatečného zajištění výrubu v úsecích 50–64 m, 70–76 m a 80–85 m.



Obr. 5 Změna indexových klasifikací v průběhu chodby L7. Úvodní úsek nehodnocen z důvodu nepřítomnosti geologa u ražby

2.1.1.1.4 Dokumentace ražby chodby L8

Chodba L8 byla sledována v období od 1. 3. 2021 do 24. 8. 2021. Sledovaný úsek byl od staničení 10,5 do 90,3 m. V chodbě byla nejvýraznější sledovanou diskontinuitou metamorfní foliace s průměrnou vzdáleností diskontinuit v rozsahu od 0,1 do 0,4 m. Výraznější tektonické poruchy paralelní s osou chodby byly pozorovány ve staničení 10,5–20,3 a 88,7–90,3 m. Tektonická porucha kosá k ose chodby byla zastižena ve staničení 38,3-44,7 m. Tektonické poruchy kolmé k ose chodby byly odhaleny ve staničení 57,3–58,6 a 64,9 m. Charakter diskontinuit je od hladkých neprůběžných puklin po drsné zvlněné foliace. Ve staničení 34,8 m byla pozorována 3 mm mocná jílovitá výplň pukliny s ohlazy, která místně velmi snížila bodové hodnocení indexových klasifikací (Obr. 6). Výplň diskontinuit tvořily kalcity, křemen a sulfidy, v případě tektonických poruch byly místy pozorovány výplně tvrdým jílem. Chodba L8 je z pohledu indexových klasifikací stabilní s téměř neměnnou kvalitou horninového prostředí.



Obr. 6 Změna indexových klasifikací v průběhu chodby L8. Úvodní úsek nehodnocen z důvodu nepřítomnosti geologa u ražby

2.1.1.1.5 Dokumentace ražby větrací chodby VCh 7-8

Propojovací chodba VCh 7-8 (Obr. 7) byla sledována v období od 9. 8. 2021 do 14. 1. 2021. Sledována byla celá chodba od staničení 0 do 30,7 m. Nejvýraznější diskontinuitou byla metamorfní foliace s průměrnou vzdáleností diskontinuit v rozsahu od 0,1 do 0,3 m. Výraznější tektonické poruchy kosé k ose chodby byly zastiženy ve staničení 23,6–27,0 m. Charakter diskontinuit je od hladkých neprůběžných puklin po drsné zvlněné foliace. Výplň diskontinuit tvořily kalcity, křemen a sulfidy, v případě tektonických poruch byly místy pozorovány výplně tvrdým jílem mocnosti 3 mm.



Obr. 7 Změna indexových klasifikací v průběhu chodby VCh 7-8

2.1.1.2 Fotogrammetrie

Geodetická část dokumentace čeleb je 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 10000 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 jsou průběžně (cca jednou měsíčně) geodeticky zaměřovány. Některé vlícovací body ale nebylo možné zaměřit, protože do doby měření byly zničeny.

Výše zmíněné způsobilo na několika sadách snímků nedostatek, nebo špatnou konfiguraci vlícovacích bodů, a proto některé modely čeleb jsou zjevně nepřesně připojeny do souřadnicového systému a některé modely ani nebylo možno vůbec vytvořit.

Vytvořené 3D modely čeleb jsou průběžně odevzdávány na datové úložiště objednatele. Mezivýsledky a měřené hodnoty jsou archivovány u zhotovitele.

_	L5					
_	staničení čelby	model vytvořen	poznámka			
	2,0	NE	nejsou vlícovací body			
	5,5	NE	nejsou vlícovací body			
	21,1	ANO				
	22,8	ANO				
	24,2	ANO				
	26,0	ANO				
	27,5	ANO				
	29,0	ANO				
	34,6	ANO				
	36,2	ANO				
	38,0	NE	nejsou vlícovací body			
	39,5	ANO				
	51,3	ANO				
	60,5	ANO				
	62,2	ANO				
	63,8	ANO				
=	65,3	ANO				
_		L	.6			
-	staničení čelby	model vytvořen	poznámka			
	3,6	NE	nejsou vlícovací body			
	11,6	ANO				
	12,7	ANO				
	14,4	ANO				
	24,0	ANO				
	25,6	NE	nejsou vlícovací body			
	32,5	ANO				
	34,1	ANO				

Tab. 1 Přehled vytvořených modelů čeleb do 02/2022

35,6	ANO	
37,2	ANO	
41,4	ANO	
42,9	ANO	
52,0	ANO	
53,5	ANO	
55,0	ANO	
	L	7
staničení čelby	model vytvořen	poznámka
38,8	ANO	
40,5	ANO	špatná konfigurace / přesnost
42,3	ANO	
43,7	ANO	
45,6	ANO	špatná konfigurace / přesnost
50,9	ANO	
53,1	ANO	
55,4	ANO	
61,0	ANO	
62,5	ANO	
64,0	ANO	
71,4	ANO	
73,2	ANO	
74,7	ANO	
81,7	ANO	
83,0	ANO	
84,7	ANO	
	L	8
staničení čelby	model vytvořen	poznámka
13,5	ANO	
15,1	ANO	
18,5	ANO	
20,3	ANO	
26,5	ANO	
31,8	ANO	
33,4	ANO	
36,7	ANO	
38,3	ANO	
40,0	ANO	
50,6	ANO	
52,3	ANO	špatná konfigurace / přesnost
54,0	NE	nejsou vlícovací body
55,8	NE	nejsou vlícovací body
57,3	NE	nejsou vlícovací body
58,6	NE	nejsou vlícovací body
59,8	NE	nejsou vlícovací body
61,3	ANO	

62,4	ANO	
69,0	ANO	
71,0	ANO	
72,4	ANO	
74,2	ANO	špatná konfigurace / přesnost
75,6	ANO	
77,5	ANO	
79,1	ANO	
80,5	ANO	
82,0	ANO	špatná konfigurace / přesnost

* v tomto přehledu jsou pouze modely vyhotovené ve společnosti SG Geotechnika

2.1.2 Dokumentace vyražených prostor

V rámci dokumentace vyražených prostor provedla ČGS dokumentaci chodeb L7, L8 a část L5 (do 71 m). Dokumentace L7 a L8 zahrnuje fotodokumentaci vyražené chodby, zpracovaný fotogrammetrický model chodby vytvořený v programu Agisoft Metashape Standard (v. 1.7.6), který je dále podkladem tvorby 3D strukturněgeologického modelu. Dále zahrnuje měření jednotlivých strukturních prvků přístupných na stěnách a čelbě dané chodby.

V rámci dokumentací byla použita standardní geologická dokumentace na stěnách díla zhruba do výšky 2 m stěny za využití geologického kompasu, fotoaparátu a tabletu. Jednotlivé dokumentované prvky byly zanášeny do fotografie stěny (Obr. 8) tak, aby mohly být přesně lokalizovány a usazeny ve fotogrammetrickém modelu. Pouze na chodbě L5, jejíž zhodnocení bude předmětem následující průběžné zprávy, byla část prostor s nestabilním výrubem před instalací zátahu dokumentována distančně (Obr. 9).



Obr. 8 Příklad zakreslení dokumentovaných struktur do fotografie části stěny výrubu (L5 – jižní stěna)



Obr. 9 Distanční fotodokumentace nepřístupné části chodby L7 70–73 m

V rámci strukturněgeologické dokumentace chodby L7 byla naměřena orientace 638 individuálních struktur, které zahrnují zejména pukliny, puklinové zóny, foliace, případně drobné zlomy a střižné pukliny (často reaktivované foliace). U všech struktur byla měřena orientace ve smyslu směr sklonu/sklon. Pokud byly přítomny dobře identifikovatelné lineární prvky (lineace či striace), byly měřeny i tyto.



Obr. 10 Data ze strukturní dokumentace chodby L7: a) orientace foliačních ploch ve stereografické síti v projekci na spodní polokouli; b) růžicový diagram puklin (modrá) a puklinových zón (růžová)

V rámci strukturněgeologické dokumentace chodby L8 byla naměřena orientace 592 individuálních struktur, které zahrnují zejména pukliny, puklinové zóny, foliace, případně drobné zlomy a střižné pukliny (často reaktivované foliace). U všech struktur byla měřena orientace ve smyslu směr sklonu/sklon. Pokud byly přítomny dobře identifikovatelné lineární prvky (lineace či striace), byly měřeny i tyto.



Obr. 11 Data ze strukturní dokumentace chodby L8: a) orientace foliačních ploch ve stereografické síti v projekci na spodní polokouli; b) růžicový diagram puklin (modrá) a puklinových zón (růžová)

Foliace v jižní části PVP II upadá poměrně uniformě k ~JZ pod středními úhly (Obr. 10, Obr. 11) a reprezentuje ramena sevřených vrás. Na stěnách díla jsou patrné zejména drobnější vrásy (v řádu desítek cm) v migmatitických polohách, orientace vrásových ramen je patrná ve stereogramu foliačních ploch L7 jako odlehlé hodnoty mimo dominantní klastr (Obr. 10). Jen na reaktivovaných plochách foliace byly dokumentovány drobné striace, které nemají významné přednostní usměrnění.

Poruchy jsou zastoupeny v profilu chodby relativně homogenně. Obvykle se jedná o extenzní pukliny typu I, které se vyskytují individuálně nebo v puklinových zónách s různou hustotou puklin, jen výjimečně se vyskytují pukliny střižné, ještě zřídkavější jsou zlomy, jejichž mocnost obvykle dosahuje max. několika cm a obvykle jsou na jedné chodbě přítomny maximálně dva zlomy. O něco obvyklejší jsou reaktivované foliační plochy. Pukliny a puklinové zóny (Obr. 10, Obr. 11) mají obvykle průběh SSZ–JJV až S–J (L7), SV–JZ (dominantnější u L8), SZ–JV (dominantnější u L7), méně V–Z. Jen velmi málo puklin na chodbě se vyskytuje jako průběžné, které protínají celý profil chodby, rámcově jde o jednu puklinu na cca 2–3 m chodby (30–40 puklin na chodbu).

2.2 Petrografická a geochemická charakteristika

2.2.1 Petrografická charakteristika

Pro horninové prostředí chodeb L5, L7 a L8 jsou charakteristické pozvolné litologické přechody podél ploch foliace mezi amfibolity (≥80 % amfibolu) a pararulami. Tyto litologie jsou v různé míře migmatitizovány a jejich velká část přechází až do migmatitu. Pro tyto litologie jsou charakteristické variabilní obsahy biotitu a amfibolu a lze je tedy klasifikovat podle minerálního složení jako biotitické, amfibol-biotitické až amfibolické. K těmto přechodům může docházet již na velmi malém měřítku, a proto byly při popisu rozrážek za účelem tvorby 3D geologického modelu zjednodušeny na biotit-amfibolickou pararulu, amfibolit a migmatit. V migmatitech a pararulách se často objevují budiny amfibolitu, které mohou dosahovat rozměrů až 1 m a které pravděpodobně představují restity po tavení. V amfibolitech byly v několika úsecích pozorovány pásky o mocnosti až několik cm bohaté pyroxenem. Tyto litologie byly popsány jako amfibolity s polohami erlanu. Vybrané litologické typy jsou detailněji charakterizovány v podkapitolách níže.

Celkem bylo odebráno 30 horninových vzorků, ze kterých byly zhotoveny leštěné výbrusy. K analýzám minerálních fází na elektronovém mikroskopu bylo celkem vybráno 8 vzorků. Seznam všech odebraných vzorků s litologickým názvem a lokalizací je umístěn v tabulce (Tab. 2). Geochemická klasifikace hlavních minerálů je zobrazena v grafech na konci kapitoly Obr. 17).

název vzorku	litologie	chodba	stěna	metráž
296CGT0001	biotitická pararula s grt	L8	S	5,8
296CGT0002	migmatit	L8	S	9,1
296CGT0003	amfibolit	L8	S	9,7
296CGT0004	grt-am	L8	J	7
296CGT0005	grt amfibolit	L8	J	8,9
296CGT0009*	grt amfibolit	L7	-	87,5
296CGT0010*	biotitická pararula s grt	L8	-	35-37
296CGT0011	biotitický amfibolit	L7	S	0,8
296CGT0012	granátický amfibolit	L7	J	70
296CGT0013	granátický amfibolit	L7	J	61,1
296CGT0014	migmatit	L7	S	67,3
296CGT0015	migmatit	L7	J	74,3
296CGT0016	migmatit	L7	S	40,4
296CGT0017	amfibolit	L7	čelba	90
296CGT0018	migmatit	L7	J	35
296CGT0019	migmatit	L7	J	56,2
296CGT0020	biotitická pararula	L7	J	5,6
296CGT0021	amfibolit s polohami	L7	J	10,2
	erlanu			
296CGT0022	migmatit	L8	čelba	90
296CGT0023	amfibolit s polohami	L8	J	32,6
	erlanu			
296CGT0024	amfibolit s polohami	L8	J	32,8
	erlanu			
296CGT0025	amfibolit s polohami	L8	S	32,6
	erlanu			

Tab. 2 Seznam odebraných vzorků z rozrážek L8, L7 a L5; * - vzorek odebraný k celohorninové geochemické analýze

296CGT0026	amfibolit	L8	S	58,8
296CGT0027	migmatit	L5	J	59,1
296CGT0028	amfibolit	L5	J	30
296CGT0029	granátický amfibolit	L5	J	2,6
296CGT0030	biotitický amfibolit	L5	S	6
296CGT0031	alterovaný migmatit	L5	S	13
296CGT0032	amfibolit	L5	S	37
296CGT0033*	migmatit	L5	-	10-12

Petrografie hornin

2.2.1.1.1 Migmatity

Nejčastějším typem je stromatitický (páskovaný) migmatit, pro který je charakteristické střídaní taveninových světlých pásků o mocnosti od několika mm až cm (leukosom), které tvoří převážně živce a křemen s restitickými tmavými pásky (melanosom), které jsou tvořeny biotitem či amfibolem a které bývají zvrásněné duktilní deformací. Místy přechází stromatitický migmatit až do nebulitického migmatitu, který se vyznačuje rozptýlenými polohami melanosomu v leukosomu.

Biotitický migmatit s granátem (Obr. 12) je tvořen melanosomovými partiemi s lištovitými zrny biotitu (XFe_{tot}=53–56, Ti=0,10–0,21 apfu), které dosahují průměrné velikosti 1 mm. Lekosom je tvořen křemenem, plagioklasem (Ab_{75–76}) a K-živcem (Or_{83–99}) o průměrné velikosti 1,5 mm. Dále se v leukosomu řidčeji vyskytují i reliktní drobná zrnka biotitu (do 0,5 mm) a porfyroblasty granátu do 1,5 cm nebo jeho relikty o průměrné velikosti 1,5 mm (Py_{13–14}Alm_{67–72}Grs_{3–10}Sps_{10–11}XFe²⁺=83,7–84,3), které jsou nahrazovány biotitem a prorůstány křemenem a živci. Akcesoricky je v hornině přítomen pyrit, apatit, monazit a zirkon.



Obr. 12 a) vzorek biotitického migmatitu 296CGT0002 s vyrostlicemi granátu; b) část křemen-živcového leukosomu, který je lemován biotitem; c) reliktní granátové zrno, které je nahrazováno biotitem; d) detail biotitových zrn podél pásku leukosomu

2.2.1.1.2 Pararuly

Biotitická pararula s granátem (Obr. 13) je tmavá jemnozrnná hornina, jejíž základní hmotu tvoří křemen, plagioklas a biotit. Biotit (XFe_{tot}=53–59, Ti=0,12–0,17 apfu) má v základní hmotě

tendenci vytvářet tenké, více či méně paralelně orientované pásky nebo jejich náznaky. Plagioklas v základní hmotě bývá perthitický a v různé míře podléhá sericitizaci. Od jádra k okraji se jeho složení vyznačuje nárůstem Ca a poklesem Na (Ab₆₉₋₆₆). V jemnozrnné základní hmotě se vyskytují až 3 mm velké relikty granátu (Py₈₋₁₃Alm₆₂₋₆₇Grs₈₋₁₄Sps₈₋₁₇;XFe²⁺=83–88), které jsou v hojné míře nahrazovány biotitem a prorůstány křemenem a plagioklasem. Akcesoricky se v hornině vyskytuje ilmenit, apatit a monazit.



Obr. 13 a) Vzorek biotitické pararuly 296CGT0001 s granátem; b) mikrosnímek základní křemenživcové hmoty, ve které se vyskytují drobné pásky biotitu; c) BSE snímek reliktního porfyroblastu granátu, který je nahrazován bt a pl

2.2.1.1.3 Amfibolity

Amfibolity (cca > 80 % am) jsou přítomny jako budiny v pararulách a migmatitech do velikosti 1 m nebo vytváří až několik metrů mocné polohy, které přechází v pararuly či migmatity. Podle minerální asociace jsou amfibolity déle rozděleny na biotitické, granát-biotitické či granátické. Do amfibolitů byl zařazen i amfibolit s polohami erlanu, který tvoří několik metrů mocné polohy amfibolitu, ve kterém se vyskytují tenké nazelenalé pásky (0,X–X cm) paralelní s foliací, které jsou tvořeny dominantně klinopyroxenem a plagioklasem.

Biotitický amfibolit (Obr. 14) je jemnozrnná až střednozrnná hornina, jejíž základní hmota je tvořena především paralelně orientovanými zrny amfibolu (XFe²⁺=44–45; Ti=0,11–0,16 apfu), které jsou v asociaci s biotitem (XFe_{tot}=~47; Ti=0,24–0,25 apfu) a dále je tvořena plagioklasem a malým množstvím křemene. Vyrostlice granátu jsou drobné (do 2 mm) a v tomto typu amfibolitu jsou přítomny vzácněji. Plagioklasy se vyznačují vyšším obsahem Na a nižším obsahem Ca v jádru v porovnání s okraji (Ab_{61–49}). Akcesoricky je v hornině přítomen pyrit, ilmenit, titanit a apatit.



Obr. 14 a) Vzorek biotitického amfibolitu 296CGT000026; b) základní hmota tvořená amfibolem, biotitem, plagioklasem a křemenem; c) BSE snímek amfibolu s inkluzemi titanitu a plagioklasu

Granátický amfibolit je tvořen jemnozrnnou základní hmotou, kterou tvoří amfibol (XFe²⁺= 53–59, Ti=0,02–0,17 apfu), plagioklas (Ab_{46–71}), biotit (XFe_{tot}~51) a malé množství křemene. V některých vzorcích se na velmi malém měřítku (0,X–X cm) nachází ostrý přechod z amfibolem bohatých oblastí, kde není téměř žádný biotit, do biotitem bohatých oblastí, kde není téměř žádný biotit, do biotitem bohatých oblastí, kde není téměř žádný biotit, do biotitem bohatých oblastí, kde není téměř žádný amfibol (např. výbrus 296CGT0005). V těchto amfibolitech se nachází až 1,5 cm velké porfyroblasty granátu, které jsou poikilitické – uzavírají velké množství drobných inkluzí křemene, ve kterých se vyskytují drobné uzavřeniny plagioklasu (An₋₄₅) a mikrožilky K-živce. Chemické složení granátových porfyroblastů odpovídá almandinu a je charakterizováno postupným snižováním Mg, Fe a Mn a navyšováním Ca od jádra k okraji (Py_{14–12}Alm₅₉₋₅₆Grs_{24–31}Sps_{4–1};XFe²⁺=81–82). Plagioklas se vyznačuje nárůstem Ca a poklesem Na od jádra k okraji (př: am-oblast: Ab₆₀₋₅₉; bt-oblast: Ab₇₁₋₆₁). Akcesoricky se v hornině vyskytuje ilmenit, apatit a pyrit.



Obr. 15 a) Vzorek granátického amfibolitu 296CGT0005; b) porfyroblast granátu v amfibolem bohaté oblasti; c) porfyroblast granátu v biotitem bohaté oblasti; d) BSE snímek porfyroblastu granátu s četnými inkluzemi křemene

Amfibolit s polohami erlanu (Obr. 16) tvoří několik metrů mocné polohy jemnozrnného amfibolitu, ve kterém se vyskytují jemnozrnné nazelenalé pásky paralelní s foliací, které mohou být široké až několik cm. Ve vzorku 296CGT0024, který byl analyzován na elektronovém mikroskopu, jsou pásky tvořeny převážně zrny klinopyroxenu o složení diopsidu (XFe²⁺=29–35; Jd_{0,7-1,6}CaTs_{0,1-1,1}) a alterovaným albitickým plagioklasem (Ab₉₄₋₁₀₀),

který se vyskytuje i v okolním amfibolitu. Okolní amfibolit je dominantně tvořen amfibolem, který je lokálně nahrazován biotitem. Titanit a apatit jsou hojnými akcesorickými fázemi.



Obr. 16 a) Vzorek 296CGT0025 amfibolit s polohami erlanu; b) mikrofoto zobrazující hranici mezi amfibolitem a páskem bohatým klinopyroxenem a plagioklasem



Obr. 17 Chemická klasifikace minerálů hlavních litologických typů: a) klasifikace živců, b) klasifikace pyroxenů (Morimoto et al. 1988), c) klasifikace biotitů, d) klasifikace amfibolů (Leake et al. 1997)

2.2.1.2 Geochemie žilných a puklinových mineralizací

V roce 2021 byly odebrány vzorky výplní žilných, puklinových a zlomových struktur ze severních i jižních stěn chodeb L7 a L8. Z chodby L7 bylo odebráno 23 vzorků, z chodby L8 21 vzorků.

Vzorky byly rozděleny podle typů mineralizace podle metodiky použité v dřívějších studiích v PVP Bukov (Bukovská et al. 2017) i na ložisku Rožná (Bukovská et al. 2020). Vzorky pro analýzy byly rozděleny v závislosti na proveditelnosti separací, množství materiálu a alokaci finančních prostředků:

- Karbonátové žíly nad 1 cm set pěti analýz hlavní prvky, stopové prvky, fluidní inkluze, izotopy C a O, izotopy Sr – 7 vzorků,
- karbonátové, příp. křemen-karbonátové žilky fluidní inkluze, izotopy C a O 15 vzorků,
- křemenné žíly fluidní inkluze 11 vzorků,
- sulfidická mineralizace izotopy S 6 vzorků,
- alterace identifikace minerálů rtg analýza 1 vzorek.

Ve stávající fázi projektu bylo na analýzy vybráno 7 vzorků karbonátových žil a 6 vzorků sulfidické mineralizace. Ostatní vzorky budou analyzovány dle situace a možnosti odběru vzorků v dalších partiích díla.

Současný stav prací

Karbonátové žíly:

- hlavní prvky vzorky v brusírně, příprava leštěných výbrusů,
- stopové prvky vzorky vyseparovány, zadány na analýzy ICP-MS,
- izotopy C a O vzorky vyseparovány, zadány na analýzy MS,
- izotopy Sr vzorky vyseparovány, zadány na analýzy MC-ICP-MS,
- fluidní inkluze vzorky v brusírně, příprava oboustranně leštěných destiček.

Sulfidická mineralizace (pyrity):

• vzorky vyseparovány, zadány na analýzy na hmotnostní spektrometrii

Tab. 3 Seznam vzorků žilných a puklinových mineralizací odebraných z rozrážek L7 a L8. Analýzy: set5an – brusírna, hlavní prvky, stopové prvky, fluidní inkluze, izotopy C a O, izotopy Sr; fiiso – brusírna, fluidní inkluze, izotopy C a O; qz – brusírna, fluidní inkluze; iso S – izotopy síry; rtg – rtg analýza

rozrážka	metráž	typ výplně	typ analýzy
L7 sev. stěna	2,1	qz žíla ložní	qz
L7 sev. stěna	6,6	DZ, cc žilka, alterace	fiiso + rtg
L7 sev. stěna	20,1	cc žilka strmá	set5an
L7 sev. stěna	26.1	cc žilka strmá	fiiso
L7 sev. stěna	30.75	cc žilka strmá	fiiso
L7 sev. stěna	43.3	gz žilka kosá	97
17 sev stěna	48.6	ny na puklině	isoS
L7 sev. stěna	53,7	gz žíla ložní	qz

L7 sev. stěna 55,3		DZ, cc žilka strmá	fiiso
L7 sev. stěna	55,65	cc žilka strmá	set5an
L7 sev. stěna	56	cc žilka strmá	fiiso
L7 sev. stěna	62,5	qz žilka kosá	qz
L7 sev. stěna	65,1	cc žilka strmá	fiiso
L7 sev. stěna	66,3	py na puklině	isoS
L7 sev. stěna	70,7	cc žilka kosá	set5an
L7 sev. stěna	84,5	qz žilka II s foliací	qz
L7 sev. stěna	86,2	qz žíla kosá, živec	qz + rtg
L7 sev. stěna	88,3	qz žíla kosá	qz
L7 sev. stěna	90 čelba	py na puklině	isoS
L7 sev. stěna	90 čelba	qz žíla strmá, žilník	qz
L7 jižní stěna	9,3	qz žíla subhorizont.	qz
L7 jižní stěna	14,5	cc žilka strmá	fiiso
L7 jižní stěna	23,3	cc žilka strmá	fiiso
L8 sev. stěna	4,4	cc-qz-py žilka na pukl	isoS
L8 sev. stěna	5,4	cc žilka strmá	fiiso
L8 sev. stěna	9,6	qz žilka II s foliací	qz
L8 sev. stěna	11,4	qz-cc žilka horizontální	fiiso
L8 sev. stěna	22,6	cc-py žilka strmá	fiiso
L8 sev. stěna	33,8	DZ, cc žilka strmá	set5an
L8 sev. stěna	43,2	cc žilka strmá	fiiso
L8 sev. stěna	75,9	qz žilka horizont II s fol.	qz
L8 sev. stěna	76,1	py na puklině	isoS
L8 sev. stěna	84,7	cc hnízdo?	set5an
L8 sev. stěna	87,7	cc žilka strmá	fiiso
L8 jižní stěna	3,5	DZ, chl-jíl-cc strmá zóna	set5an
L8 jižní stěna	6,4	qz subparalel s fol	qz
L8 jižní stěna	17,2	cc na puklině, striace	fiiso
L8 jižní stěna	39,5	albit-prehnitová žíla	fiiso
L8 jižní stěna	39,8	cc žilka strmá	fiiso
L8 jižní stěna	56,8	py na puklině	isoS
L8 jižní stěna	68,7	py na puklině	isoS
L8 jižní stěna	70,8	cc žilka strmá	set5an
L8 jižní stěna	87,8	cc + py na puklině	fiiso+isoS
L8 jižní stěna	88,2	cc žilka strmá	fiiso

2.2.2 Geochemická charakteristika

Pro geochemickou charakteristiku byly odebrány tři velkoobjemové vzorky, které byly odebírány současně se vzorky pro stanovení fyzikálně mechanických a geotechnických vlastností hornin laboratorními testy. Těmito vzorky jsou granátický amfibolit z chodby L7 (metráž 87,5 m, č. vzorku: 296CGT0009), biotitická pararula s granátem z rozrážky L8 (metráž 35–37 m, č. vzorku: 296CGT0010), a biotitický migmatit z rozrážky L5 (metráž 10–12 m; č. vzorku: 296CGT0033). Vzorky granátického amfibolitu a a biotitické pararuly s granátem byly nadrceny a zhomogenizovány a jsou připraveny k odeslání k celohorninovým analýzám do geochemické laboratoře.

Granátický amfibolit (296CGT0009, Obr. 18a,b) – Jedná se o jemnozrnnou horninu, jejíž základní hmota je tvořená amfibolem, plagioklasem a malým množstvím křemene. Vyskytují se v ní porfyroblasty granátu o průměrné velikosti 1,5 mm, které jsou poikilitické – uzavírají velké množství inkluzí plagioklasu, křemene a amfibolu. Amfibol svým složením odpovídá fero až magnezio-hornblendu (XFe²⁺=38–53, Ti=0,05–0,15 apfu). Ve složení granátů převládá almandinová komponenta a je charakterizováno poklesem Mg a Ca a nárůstem Fe a Mn od jádra k okraji (Py_{15–8}Alm_{53–57}Grs_{27–34}Sps_{5–11};XFe²⁺=78–87). Plagioklas má chemické složení odpovídající labradoritu až andezínu (Ab_{36–77}). Akcesoricky se v hornině vyskytuje pyrit, titanit, apatit a ilmenit.

Biotitická pararula s granátem (296CGT0010, Obr. 18c) – Tata hornina je jemnozrnná a její základní hmota je tvořena křemenem, plagioklasem, biotitem a granátem. Granátová zrna jsou protažena paralelně s foliací a dosahují velikosti až 0,6 mm. Jsou poikilitická – uzavírají velké množství drobných inkluzí křemene. V jejich chemickém složení převládá almandinová komponenta a jsou charakterizovány poklesem Mg, Fe a Ca a výrazným nárůstem Mn od jádra k okraji (Py₁₂₋₇Alm₅₇₋₅₃Grs_{24–13}Sps₇₋₂₇; XFe²⁺=83–89). Plagioklas odpovídá oligoklasu (Ab₇₄₋₇₉) a biotit annitu (XFe_{tot}=53–55; Ti=0,10–0,17 apfu). Akcesoricky se v hornině vyskytuje pyrit, apatit a zirkon.



Obr. 18 a) BSE snímek porfyroblastu granátu s inkluzemi amfibolu, plagioklasu a křemene v granátickém amfibolitu (296CGT0009); b) BSE snímek základní hmoty granátického amfibolitu (296CGT0009); c) poikilitické, protažené zrno granátu v biotitické pararule s granátem (296CGT0010). Okolní hmota je tvořena křemenem, plagioklasem a biotitem

2.3 3D strukturněgeologický model

Model je konstruován jako dílčí vizualizace geologické a strukturní stavby v současné době plně vyražených chodeb v rámci PVP II. Zahrnuje oblasti vyražených chodeb L7 a L8 a část překopu PŠ1-123 a dopravního ochozu směrem k jámě R-7S. Půdorys modelu je 200 × 130 m a jeho střed je situován na úroveň 20 m. n. m. Výška modelu je pak 50 m, resp. v rozmezí od -45 až 5 m. n. m. Model byl konstruován v software MOVE ve verzi 2020.1.

Geologická charakterizace vychází primárně z detailního petrografického mapování vyražených chodeb provedeného během jejich dokumentace. Pro oblasti mimo chodby L7 a L8 byla využita kompilovaná geologická mapa 12. patra dolu Rožná ve vektorové podobě (Nohál et al. 2019), a zde přítomné litologie (pararula a amfibolit) byly pro účely modelu přiřazeny odpovídajícím litologiím z podrobné charakterizace chodeb L7 a L8. Jednotlivé horninové typ mezi sebou plynule přecházejí a orientace jejich přechodných kontaktů je definována metamorfní foliací, jejíž medián azimutu a sklonu byl pro tuto vizualizaci 232/48. Oproti mapě Nohála et al. (2019) poukázala nově provedená petrografická charakterizace rovněž na přítomnost drobnějších poloh pararul a amfibolitů hornin, která jsou v modelu vizualizovány jako ploché čočky ve shodné orientaci jako generelní foliace (Obr. 19 a Obr. 20).

Výsledek kombinace archivní geologické mapy (Nohál et al. 2019) a detailní petrografické dokumentace chodeb použité pro tvorbu 3D modelu (Obr. 19 a Obr. 22) je možné porovnat s interpretací geologické dokumentace vrtů S-28 a S-29 odpovídajícím chodbám L7 a L8 (Jaroš et al. 2021). Obě mapy se shodují v orientaci kontaktů jednotlivých horninových typů a v převažujícím výskytu migmatitizovaných pararul v západní části oblasti 3D modelu. Dále v obou mapách přesně koreluje rozsah tělesa horniny nazývané jako amfibolit s polohami erlanu/erlan-amfibolitový stromatit. V mapě Jaroše et al. (2021) jsou v centrální a východní části oblasti modelu relativně rovnoměrně zastoupeny většinou průběžná tělesa (o mocnosti cca 1–5 m) migmatitu a pararuly s menším výskytem amfibolitů v nejvýchodnější části. V mapě odvozené z 3D modelu je v centrální části pás (o mocnosti cca 20–60 m) tvořený převažujícím migmatitem a v celé východní polovině oblasti dominuje amfibolit s drobnými tělesy pararuly. Popsané rozdíly vyplývají především z různého měřítka dokumentace vrtného jádra a vyražené chodby. V rámci celé chodby je možné stanovit převažující horninový typ v širším prostorovém kontextu. V menší míře můžou být některé rozdíly způsobené částečně subjektivním terminologickým zařazením dokumentujícím geologem. Nicméně srovnání těchto dvou metodik petrografické dokumentace ukazuje v základních rysech na jejich relativně dobrou shodu.

Vytvořený 3D model chodeb L7 a L8 obsahuje strukturní prvky (zlomy, pukliny a reaktivované foliace) měřené na stěnách chodeb. Tyto jsou vizualizovány ve formě čtvercových a obdélníkových ploch protínajících chodby L7, L8 a překop PŠ1-123 (Obr. 19). Významnější struktury jsou vizualizovány dle jejich průběžnosti chodbou nebo zastižené výplně (Obr. 21). Jejich orientace odpovídá lokálnímu měření kompasem upravené o korekci konvergence do souřadného systému S-JTSK a lokální magnetickou deklinaci. Kontrola správné orientace strukturních prvků byla provedena pomocí pracovního 3D fotogrammetrického modelu chodeb a usazení strukturních měření na odpovídající pozice. Ke snížení datové náročnosti byly chodby L7 a L8 rovněž vytvořeny ve formě zjednodušeného mesh-modelu s odpovídajícím půdorysem i výškou, který je součástí modelu.

Tento 3D model byl zkonstruován pro účely vizualizace doposud získaných strukturních a geologických dat v této průběžné zprávě. Model bude během dalších etap rozšiřován

a zpřesňován, zejména na základě dat z v budoucnu ražených zkušebních komor, dokumentace větrací chodby VCh7-8 a z dat z nově vyražených úseků L4, L5, L6. Na tato doplnění bude navazovat i upřesnění foliace z generelní na lokální. Informace z dalších chodeb umožní, spolu s dalšími doplňkovými pracemi (vrty, hydrogeologické dokumentace, seismická tomografie aj.), případné propojení nejvýznamnějších těles a struktur.



Obr. 19 3D model oblasti chodeb L7 a L8 s vyznačeným středem modelu (červené linie) a zaznamenanými poruchami; modré polygony značí struktury průběžné, fialové průběžné struktury s výplní nad 5 mm a žluté odpovídají měřením provedeným v chodbě PŠ-123



Obr. 20 Pohled na uzavřený blok 3D modelu (vlevo) a vnitřek modelu s naznačenými průběhy chodeb L7 a L8 (vpravo)



Obr. 21 Náhled významnějších puklin zastižených na chodbách L7 a L8; modré polygony značí struktury průběžné, fialové průběžné struktury s výplní nad 5 mm



Obr. 22 Geologická mapa derivovaná z 3D strukturněgeologického modelu v úrovni 20 m n. m.

2.4 Hydrogeologická charakterizace

2.4.1 Rešerše

Zdrojová data

Detailní rešerše dostupných hydrogeologických dat pro oblast dolu Rožná a jeho širší okolí, z podkladů dostupných do roku 2014, byla provedena v rámci projektu SÚRAO Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov (Bukovská et al. 2017). Rešerše zahrnovala práce regionálního charakteru, zejména hydrogeologické mapy; práce zaměřené na zhodnocení možného vlivu zatápění ložisek a uložení odkalištních vod; práce věnované lokalitě Kraví hora jako potenciální lokalitě pro hlubinné úložiště; bakalářské, diplomové a disertační práce Masarykovy univerzity Brno a lokální posudky a zprávy (vyhledávání zdrojů pitné vody, inženýrskogeologické posudky). U lokálních posudků se jednalo například o zhodnocení hydrogeologického vrtu v Moraveckých Janovicích (Chmelař 2004) a v Mitrově (Zielina 2004). Výsledky této rešerše byly uvedeny v technické zprávě projektu (Bukovská et al. 2015).

V letech 2015 až 2021 byly postupně rozšiřovány znalosti o hydrogeologických poměrech dolu Rožná a zejména jižní části 12. patra v rámci projektů SÚRAO. Tyto projekty se týkaly či týkají budování a provozu Podzemního výzkumného pracoviště Bukov a následné realizace experimentů v tomto pracovišti. Nová hydrogeologická data byla / jsou získávána zejména v rámci těchto projektů:

- Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov (Bukovská et al. 2017);
- Hydrogeologický a hydrochemický monitoring podzemních a důlních vod v prostoru PVP Bukov (Vylamová et al. 2020, 2021);
- Získání dat z hlubokých horizontů dolu Rožná (Bukovská et al. 2020);
- Výzkum puklinové konektivity v PVP Bukov (Zuna et al. 2020, 2021);
- Interakční fyzikální modely in-situ v PVP Bukov (Svoboda et al. 2019, 2020; 2021).

Získaná hydrogeologická data byla následně využita pro sestavení matematických modelů v rámci projektů:

- Hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště (Uhlík et al. 2018);
- Chování horninového prostředí / Příprava geochemického modelu úložiště (Červinka et al. 2018).

Povrchový monitoring vodních zdrojů, vodních ploch a vodotečí v ploše průzkumného území Kraví hora (Bartoň a Mátl 2018) probíhal od listopadu 2016 do května 2018.

Další hydrogeologické zprávy z posledních let se týkají problematiky zatápění dolu po ukončení těžby uranu (Šenk 2016, Kokavcová 2017).

Níže je uvedeno shrnutí informací významných pro hodnocení dat z PVP Bukov II.

Hydraulické vlastnosti hornin

Hydrodynamické testy byly v PVP Bukov provedeny ve vrtech S-27, S-31 a S-36 v rámci projektu Výzkum puklinové konektivity v PVP Bukov (Zuna et al. 2020, 2021). Délky testovaných úseků se pohybovaly převážně v rozmezí od 3 do 7 m, výjimečně do 25 m.

- Ve vrtu S-27 se vyskytovaly dva úseky s vyššími hodnotami hydraulické vodivosti okolo 5·10⁻⁸ m.s⁻¹, u ostatních úseků byla změřena hydraulická vodivost v řádu 10⁻⁹ a 10⁻¹⁰ m·s⁻¹.
- Ve vrtu S-31 se pohybovala hydraulická vodivost v rozmezí od 1,35·10⁻⁶ do 8,81·10⁻¹¹ m·s⁻¹, časté byly úseky s hydraulickou vodivostí v řádu 10⁻⁸ m·s⁻¹ a úseky s velmi nízkou vodivostí na hranici řádů 10⁻¹⁰ a 10⁻¹¹ m·s⁻¹ a nižší.
- Ve vrtu S-36 byly zastiženy úseky s hydraulickou vodivostí od 1,5·10⁻⁶ do 1,4·10⁻⁹ m·s⁻¹. Testování bylo zaměřeno především na intervaly s očekávanou vyšší propustností, proto mezi naměřenými hydraulickými vodivostmi nejsou zastoupeny velmi nízké hodnoty. Převažovala hydraulická vodivost v řádu 10⁻⁸ a 10⁻⁹ m·s⁻¹, vyšší hodnoty na pomezí řádů 10⁻⁶ a 10⁻⁷ m·s⁻¹ byly zjištěny u navzájem komunikujících etáží vrtu.

Hydraulické testování hornin se v rámci projektu "Získání dat z hlubokých horizontů dolu Rožná" (Bukovská et al. 2020) orientovalo na úseky vrtů BGS12-H (vrt na 12. patře v prostoru PVP Bukov II) a BGS24-VU (24. patro). Testovány byly úseky o délce 0,2 m bez viditelných makropuklin. Změřená hydraulická vodivost byla v rozmezí od 5,5·10⁻¹³ po 9,9·10⁻¹² m·s⁻¹. Uvedená nejvyšší i nejnižší hodnota byla zjištěna u vrtu BGS12-H, hodnoty tří testovaných intervalů na vrtu BGS24-VU byly v úzkém rozmezí 1,2 – 2,7·10⁻¹² m·s⁻¹.

Hydrodynamické testy proběhly také v rámci projektu "Hydrogeologický a hydrochemický monitoring podzemních a důlních vod v prostoru PVP Bukov" (Polák et al. 2019). Vodní tlakové zkoušky byly realizovány na etážích o délce 1 m ve vrtech BGS20/1-VD, BGS20/2-VD, BGS20/1-H, EDZ20-HD na 20. patře dolu Rožná. V prvních dvou případech se jedná o vrty svislé, další dva vrty jsou subhorizontální. Pro měření byly vybírány jak neporušené úseky hornin, tak úseky výrazně porušené. Hydraulická vodivost měřených a vyhodnocených úseků se pohybovala v rozmezí od 1,3.10⁻⁴ po 1,7.10⁻⁷ m·s⁻¹, velmi časté byly hodnoty v řádu 10⁻⁷m·s⁻¹. Hodnoty hydraulické vodivosti změřené v rámci tohoto projektu nejsou srovnatelné s výše uvedenými výsledky z důvodu využitého technického vybavení a metodiky testů. K měření průtoku nebyly využívány vysoce citlivé průtokoměry, ale pouze běžný vodoměr s manuálním odečtem, jehož citlivost byla v řádu jednotek litrů. Odečet probíhal na začátku a na konci tlakového stupně o délce trvání 10 minut. Pro výpočty tedy byly využívány celkové spotřeby za velmi krátký interval, v průběhu kterého dochází obvykle k prudkému poklesu spotřeb vtláčené vody. Nejednalo se tedy o spotřeby v ustáleném nebo kvazi ustáleném stavu, výsledné hodnoty jsou proto významně nadhodnocené. Řada testů proběhla v nenasyceném prostředí, v počátečních fázích testu proto byly zejména plněny pukliny v okolí testované etáže. Současně nebylo možné stanovit hydraulickou vodivost úseků se spotřebami vody nižšími než 1 l za 10 minut – za tlakový stupeň (citlivost vodoměru a manuálního odečtu). Tyto úseky zůstaly nevyhodnocené.

Z výše uvedených hodnot vyplývá, že v rámci dolu Rožná je možné očekávat u propustných poloh (s výskytem otevřených vodivých puklin) hydraulické vodivosti v řádu 10^{-6} a 10^{-7} m·s⁻¹. U běžně či slabě porušených úseků je hydraulická vodivost v rozmezí 10^{-11} až 10^{-8} m·s⁻¹. Hydraulická vodivost horninové matrice (úseky bez znatelných makropuklin) je v řádech od 10^{-13} po 10^{-11} m·s⁻¹. Uvedené hodnoty platí pro měřítko realizovaných testů, tedy řádově v jednotkách metrů.

Je třeba brát v úvahu specifické prostředí dolu, kde je testování prováděno v částečně nenasyceném horninovém prostředí s velmi obtížně definovatelnými tlakovými poměry v okolí

testovaných vrtů. V horninovém prostředí neporušeném důlním dílem lze proto pravděpodobně očekávat nižní hodnoty hydraulické vodivosti.

Chemické složení podzemních vod

Chemické složení podzemních vod a jeho vývoj v rámci PVP Bukov a dolu Rožná byly podrobně popsány v závěrečné zprávě projektu "Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov" (Bukovská et al. 2017):

Chemické složení podzemních vod v dole Rožná a jeho vývoj je možné rozdělit do dvou částí. První je přirozená změna chemického složení podzemní vody se vzrůstající hloubkou jejího výskytu v krystalických horninách. V antropogenně neporušeném horninovém prostředí se od zemského povrchu do hloubek vyšších než 1 km vyskytují tyto typy podzemních vod (Obr. 23, Obr. 24):

- 1. Vody typu Ca-SO₄ se vyskytují v oxidační zóně krystalinika, v hloubkách maximálně prvních desítek metrů, v závislosti na míře porušení horninového prostředí. Typickým příkladem jsou pramenní vývěry v povrchové části lokality. Tyto vody mají vyšší poměrné zastoupení síranů nad 40 meq % (HCO₃ vždy pod 40 meq %). U kationtů převažuje vápník s mírně zvýšenými obsahy hořčíku u některých vývěrů.
- 2. Vody typu Ca-HCO₃ jsou typické pro redukční zónu krystalinika, podle poměrného zastoupení kationtů opět typ s převahou Ca (Ca 55 meq %, Mg 30 meq% a Na 15 meq %), mezi anionty převažuje HCO₃ (nad 70 meq %). Vody typu Ca-HCO₃ byly v rámci dolu Rožná zastiženy pouze v prostoru PVP jednalo se o první odběry vzorků z přítoků po vyražení chodeb s minimálním ovlivněním prostorem dolu. Hydrochemický typ Ca-HCO₃ převažuje také u odběrů z hlubších hydrogeologických vrtů (hloubka 40 až 100 m) na blízké lokalitě Kraví hora. Zastoupení HCO₃ je zde obvykle kolem 60 meq %. Hloubkový dosah typu Ca-HCO₃ není přesně znám, spodní hranice výskytu bude pravděpodobně v úrovni 12. patra dolu (cca 600 m pod zemským povrchem), níže se vody s převahou Ca nevyskytují (viz dále).
- 3. Vody typu Na-HCO₃ se v dole Rožná běžně vyskytují od 19. patra níže, tedy v hloubkovém intervalu 950 až 1200 m pod zemským povrchem, ojediněle byly vody tohoto typu odebrány i na 12 patře dolu. Reprezentují hluboké, prakticky stagnující podzemní vody s výskytem hluboko pod místními i regionálními erozními bázemi. Mezi kationty zcela převažuje sodík, poměrné zastoupení hydrogenuhličitanů je nad 80 meq %.
- 4. Vody typu Na-CI byl zastiženy pouze na 24. patře dolu, v jeho severní části (jáma Jasan). V ostatních částech 24. patra se vyskytovalo několik přítoků typu Na-HCO₃ se zvýšeným podílem chloridů. Je tedy možné předpokládat, že v hloubkách vyšších než cca 1200 m se budou vyskytovat hlubinné vody typu Na-CI.

Druhou částí vývoje chemického složení podzemních vod v oblasti je změna složení vlivem toku a stagnace podzemních vod v otevřených prostorách důlního díla, kde se vody dostávají do oxidačního prostředí. Dochází k vysrážení některých složek, a naopak i intenzivnímu nabohacení vod látkami v prostoru dolu (zejména v drenážním systému). Vliv dolu se projevuje zejména ve změně poměrného zastoupení aniontů, původně hydrogenuhličitanové vody se mění na síranové díky zvyšování obsahu rozpuštěných síranových iontů ve vodách. Mezi antropogenně ovlivněné patří v dole Rožná tyto typy vod:

 Vody typu Ca-SO₄ (modrá barva na Obr. 23 vznikají z původních podzemních vod typu Ca-HCO₃, a mají také obdobné poměrné zastoupení kationtů jako tento primární zdroj.
Vyhraněný typ vod Ca-SO₄ obsahuje obvykle nad 60 meq % síranů, je možné zastihnout řadu přechodných typů s postupně se měnícím poměrem HCO₃/SO₄. Vody typu Ca-SO₄ se v dole Rožná vyskytují od 3. do 12. patra, níže jejich výskyt zaznamenán nebyl. Z toho je možné usoudit, že v níže položených částech masivu jako primární zdroj převažují vody Na-HCO₃.

2. Vody typu Na-SO₄ (zelená barva na Obr. 23) obdobně vznikají z podzemních vod typu Na-HCO₃, mají opět stejné poměrné zastoupení kationtů (naprostá převaha sodíku) jako jejich původní zdroj a obsahují nad 70 meq % síranů. I zde je možné zastihnout řadu přechodných typů s postupně se měnícím poměrem HCO₃/SO₄. Vody typu Ca-SO₄ se v dole Rožná vyskytují v rozmezí od 12. do 24. patra, ojedinělý výskyt byl zaznamenán také na 10. patře.



Obr. 23 Piperův diagram složení podzemních vod v dole Rožná s vyznačením základních typů vod a vývojových trendů. Červené šipky – přirozená změna složení podzemní vody s narůstající hloubkou, černé šipky – změna chemického složení vlivem oxidačních procesů v dole



Obr. 24 Piperův diagram složení podzemních vod v povrchové části lokality (BP) a v PVP Bukov (BK)

Rozmezí hodnot a střední hodnoty pH a celkového obsahu rozpuštěných látek (TDS) zahrnuje Tab. 4.

		pН	-	TDS (mg.l ⁻¹)			
hydrochemický typ	minimum	geometrický průměr	maximum	minimum	aritmetický průměr	maximum	
přirozený vývoj							
Ca-SO ₄	6,07	7,18	8,42	186,4	271,7	493,6	
Ca-HCO₃	7,94	8,22	8,61	264,8	282,2	313,8	
Na-HCO₃	8,13	8,92	9,84	207,9	353,0	761,8	
Na-Cl	8,63		9,07	364,7		387,4	
antropogenně ovlivněné vody							
Ca-SO ₄	7,69	8,02	8,11	512,9	970,0	1819,2	
Na-SO ₄	7,72	8,63	9,97	309,3	754,9	2020,7	

Tab. 4 Přehled hodnot pH a celkového obsahu rozpuštěných látek (TDS) pro jednotlivé hydrochemické typy

Studium chemického složení podzemních vod v rámci projektu "Hluboké horizonty" se zaměřilo na pórové vody obsažené v horninové matrici. Odběry byly realizovány z vrtů na 12. a 24. patře dolu. Jednalo se jednak o odběry vody z vrtných jader, jednak o in-situ odběry z úseků vrtů bez znatelných makropuklin.



Obr. 25 Piperův diagram zobrazující složení pórových vod laboratorních experimentů (modul 1 a 2, 12. patro; modul 3 a 4, 24. patro.) a in-situ odběrů (BGS12_H, 12. p.; BGS24_VU, 24. p.; číslo značí interval odběru v rámci vrtu; Bukovská et al. 2020)

Z výsledků výzkumu vyplynulo (Bukovská et al. 2020):

 Pórové vody získané z laboratorních experimentů vykazují jako dominantní anionty uhličitany oproti pórovým vodám z in-situ experimentů, kde uhličitany doplňují chloridy a sírany. Obsah chloridů není zatím zcela prokazatelně objasněn. Mezi hlavní zdroje je možné řadit biotit/chloritizaci, salinní fosilní vody či fluidní inkluze. Složení získaných pórových vod neporušených hornin z in-situ odběrů se výrazně neliší od složení podzemních vod získaných na poruchových zónách v odpovídajících hloubkách pod zemským povrchem. Což velmi dobře dokumentuje Piperův diagram na Obr. 25. Vody odebrané na 12. patře odpovídají smíšeným typům Na-SO₄-HCO₃, u odběrů ze 24. patra je patrný zvýšený podíl chloridů mezi anionty, tedy posun k vodám typu Na-Cl (viz výše).

Hydrochemická data získaná odběrem vzorků vod v prostoru PVP Bukov II před zahájením ražeb shrnuje Piperův diagram na Obr. 26. Jedná se o vzorky vod odebrané z vrtů v osách plánovaných chodeb pracovníky DIAMO, s. p. (červená barva v diagramu) a vzorky odebrané v rámci projektu "Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov" na chodbě PŠ1-123 v blízkosti PVP Bukov II. S výjimkou vzorku BR56 mezi anionty jednoznačně převažuje sodík. Mezi anionty převládá opět s jednou výjimkou složka HCO₃, podíl síranů je u odběrů z předvrtů mezi 20 a 40 meq %. Jedná se primární typ (dle výše uvedeného členění) Na-HCO₃, slabé ovlivnění přítomností otevřených částí dolu se projevuje zvýšenými obsahy síranů. Vzorek BR56 byl odebrán přibližně 250 m severně od prostoru ražeb, v této části 12. patra se patrně primárně vyskytuje hydrochemický typ Ca-HCO₃.

Celkový obsah rozpuštěných látek byl u výše uvedených vzorků podzemních vod v rozmezí od 230 do 370 mg.l⁻¹, pH dosahovalo hodnot 8,2 až 9,4.



Obr. 26 Piperův diagram chemického složení podzemních vod v prostoru PVP Bukov II a v jeho blízkém okolí před zahájením ražeb.

Režim podzemních vod

Vydatnosti přítoků

Monitoring vydatnosti přítoků probíhal v letech 2015 až 2017 v rámci výstavby PVP Bukov (Bukovská et al. 2017). Ze získaných dat vyplynulo, že režim každého z monitorovaných přítoků je jedinečný, vývoj vydatnosti závisí na typu propustné struktury, na kterou je přítok vázán, její kapacitě a náchylnosti ke změnám a v neposlední řadě na celkové vydatnosti přítoků.

Vydatnější přítoky byly stabilnější, méně vydatné přítoky reagovaly citlivě na drobné změny v puklinové síti (ucpání nebo promytí jednotlivých puklin). U většiny přítoků byl v průběhu měření zaznamenán pokles vydatnosti – mírný do 25 % původní hodnoty, ale i výrazný (až 80 % původní hodnoty). Některé průsaky v průběhu výstavby vyschly zcela.



Vydatnost přítoků v prostoru PVP Bukov

Obr. 27 Kontinuální měření vydatnosti přítoků v prostoru PVP Bukov (Vylamová et al. 2021)

Na uvedený monitoring navázaly monitorovací práce v rámci projektu "Hydrogeologický a hydrochemický monitoring podzemních a důlních vod v prostoru PVP Bukov" (Vylamová et al. 2020, 2021). Tyto práce v současnosti stále probíhají, data jsou k dispozici ve finální verzi do konce roku 2020.

Vývoj vydatnosti monitorovaných některých přítoků zobrazuje graf na Obr. 27 (Vylamová et al. 2021). Obecný trend poklesu vydatnosti přítoků, zaznamenaný v prvních 2 až 3 letech od ražby podzemní laboratoře, již dále u většiny přítoků nepokračuje. U řady přítoků byla zaznamenána variabilita vydatnosti přítoků, poklesy/nárůsty vydatnosti byly následovány opětovným nárůstem/poklesem. Některé přítoky vykazují prakticky stabilní vydatnost. Režimy jednotlivých přítoků jsou rozdílné, u několika přítoků byl zaznamenán mírný nárůst vydatností v druhé polovině roku 2020. Trend nárůstu koncem roku 2020 s pokračováním v roce 2021 byl zaznamenán také u monitorovaného přítoku v rámci projektu "Interakční fyzikální modely insitu v PVP Bukov".

Na základě dat z monitoringu v prostoru PVP Bukov je možné předpokládat také v PVP Bukov II pokles vydatnosti přítoků v prvních letech od zastižení přítoku ražbou a individuální režim jednotlivých přítoků.

Chemické složení podzemních vod

Také data o vývoji chemického složení podzemních vod v čase pocházejí z výše uvedených projektů. V průběhu výstavby PVP Bukov byly zaznamenány dva základní typy vývoje chemického složení podzemní vody v čase:

- 1. Přítoky s mírnou variabilitou obsahů jednotlivých složek bez výrazného trendu v čase;
- přítoky s výrazným vývojem chemického složení v čase, u kterých došlo v průběhu tří let k výraznému nárůstu obsahu síranů, vápníku, hořčíku a chloridů, a naopak slabě poklesl obsah hydrogenuhličitanů. Vývojové trendy u těchto přítoků reprezentuje graf a diagram na Obr. 28 a Obr. 29.



Obr. 28 Vývoj chemického složení podzemní vody u přítoku BK15 – vybrané hlavní anionty a kationty

Následný hydrogeologický monitoring (Vylamová et al. 2021) potvrdil výše uvedené trendy. U řady přítoků v průběhu let 2016 až 2020 postupně mírně narůstaly zejména obsahy síranů a vápníku. Například celkový obsah rozpuštěných látek u výše uvedeného přítoku BK15 vzrostl v období 2014 – 2020 z 273 mg.l⁻¹ na 442 mg.l⁻¹. Obsahy hydrogenuhličitanů u většiny přítoků slabě kolísají bez výrazného trendu.



Obr. 29 Durovův diagram vývoje chemického složení přítoků BK07 a BK15

2.4.2 Hydrogeologická dokumentace

Dokumentace přítoků

V průběhu postupujících ražeb byla prováděna hydrogeologická dokumentace průsaků podzemní vody do nově ražených prostor podzemní laboratoře. Dále byly zdokumentovány přítoky na chodbě PŠ1-123 v okolí nové laboratoře. U průsaků byly dokumentovány následující parametry:

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

Naprostá většina dokumentovaných průsaků byla ve formě vlhkých skvrn na stěnách či stropě chodeb s občasným výskytem rozptýlených kapek. Měření fyzikálně-chemických parametrů podzemní vody bylo proto možné pouze výjimečně. Obdobně vzhledem k minimálním vydatnostem průsaků nebylo převážně možné měřit vydatnosti. Nejvydatnější průsak ze všech nově dokumentovaných byl v chodbě L8 a měl vydatnost cca 0,001 l.s⁻¹. Vyšší vydatnosti byly zaznamenány pouze u výtoků z vrtů projektu "Získání dat z hlubokých horizontů dolu Rožná;" na chodbě PŠ1-123.

Celkem bylo zdokumentováno 22 průsaků/výtoků z horninového prostředí/z vrtů. Počty dokumentovaných bodů v jednotlivých částech PVP Bukov II uvádí Tab. 5, detailní popis jednotlivých bodů obsahuje tabulka v Elektronická příloha 3. Graficky byla místa přítoků znázorněna na Obr. 30 na podkladu výsledků geofyzikálních měření. Pokud se vzdálenosti dokumentovaných bodů pohybují v prvních jednotkách metrů, jsou tyto body společně znázorněny na Obr. 30 jako zvodněná zóna.



Obr. 30 Zvodnění v nově ražených chodbách v PVP Bukov II na podkladu výsledků seismické tomografie (Chabr et al. 2021)

chodba	počet bodů	počet vzorků	metráže
L5	6	2	0,5; 4,5-5, 9,5-12,8; 12,8-16; 68
L6	1	0	25
L7	6	2	45; 49-50; 53-54; 53-55; 55,5-57; 58-62
L8	4	1	56,5-59; 60; 67-69; 87,5-88;
PŠ1-123	5	5	918,5-930; 928,8; 929,6; 930,2; 948-973

Tab. 5 Počty dokumentovaných hydrogeologických bodů a odběrů vzorků podzemních vod

Chodba L5

První průsaky byly při ražbě chodby L5 dokumentovány hned v úvodní části. Slabý průsak vázaný na foliační plochu se vyskytoval na metráži 0,5 m. Poměrně výrazný průsak ze zlomu orientace 143/84 a z foliačních ploch v jeho těsné blízkosti byl na metráži 5,5 m (d. b. 296HCR0014, Obr. 31), z tohoto průsaku byl odebrán vzorek podzemní vody. V současné době jsou oba tyto průsaky za výstrojí, respektive za nástřikem betonu. Průsak na metráži 5,5 m odvodnil horizontální vrt BGS12-H, tlak ve vrtu poklesl na nulu.



Obr. 31 Zlom s průsakem 296HCR0014, chodba L5

Obr. 32 Slabé zvodnění ve stropě chodby L5 (d. b. 296HCR0017)

Dále v chodbě L5 následuje prakticky souvislá velmi slabě zvodněná zóna na metráži 9,5 až 16 m (Obr. 32). Zóna se projevuje výrazným vlhnutím stěn, v intervalu 12,8 až 16 m s občasnými úkapy ze stropu, pravděpodobně z foliačních ploch a z menších puklin. Na metráži 15,2 v místě větší intenzity úkapů, byl z této zóny pomocí svodné plachy odebrán vzorek (296HCR0017).

Drobný průsak vázaný na okolí zlomu 317/72 byl dále na metráži 68 m. Opět se jednalo o průsak s minimální vydatností, který se projevoval vlhnutím stěny chodby.

Chodba L6

Na metráži 25 m byl dokumentován slabý průsak (vlhnutí stěny a stropu) na foliačních plochách. 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) 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.

Chodba L7

V chodbě L7 byla zastižena slabě zvodnělá zóna v úseku 45 až 62 m. Celkem bylo v této zóně dokumentováno 6 průsaků. U těchto průsaků opět převládá velmi nízká vydatnost, dokumentované průsaky jsou ve formě vlhkých stěn a stropu s občasným výskytem kapek. Vydatnosti těchto průsaků se pravděpodobně pohybují maximálně v desetinách až prvních jednotkách ml.s⁻¹. Vzhledem k velkému rozptylu občasných úkapů tyto nízké hodnoty není možné měřit. Zcela převažovaly průsaky z nebo v okolí foliačních ploch a na křížení foliace s menšími puklinami. Lokálně se zde také vyskytovaly slabé úkapy ze svorníků ve stropě chodby. Ve dvou případech byly drobné průsaky v okolí průběžných subvertikálních puklin (s orientací směr sklonu/sklon: 275/86, 251/74; ID162 na severní stěně L7). Celkem byly z této zóny odebrány 2 vzorky podzemních vod pro chemickou analýzu a to z d. b. 296HCR0004 a 296HCR0006.



Obr. 33 Puklina s průsakem 296HCR0004, chodba L7.

Obr. 34 Průsaky v okolí pukliny ve stropě chodby L7 (296HCR0006)

Chodba L8

Obdobně jako v chodbě L7, také v chodbě L8 se nachází širší slabě zvodnělá zóna, a to na metráži 56 až 69 m. Součástí této zóny jsou 3 samostatně dokumentované průsaky. Opět převažují vlhké stěny v okolí foliačních ploch a menších puklin. Z dokumentovaných průsaků v této zóně je nejvýraznější průsak 296HCR0011 (Obr. 35) vázaný zejména na zlom (279/87; ID 115 na jižní stěně L8) 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 na zlomu intenzivnější a více koncentrovaný v jedné části zlomu, což umožnilo terénní měření i odběr vzorku podzemní vody. V současnosti se jedná o nejvydatnější soustředěný průsak v rámci PVP Bukov II s vydatností přibližně 0,001 l.s⁻¹.



Obr. 35 Zlom s výrazným průsakem v chodbě L8Obr. 36 Průsak d. b. 296HCR0020 vázaný na
subvertikální puklinu v chodbě L8

Chodba PŠ1-123

V rámci rekognoskačních prací byly dokumentovány chodby v okolí PVP do vzdálenosti 150 m od PVP II. Naprostá většina revidovaných chodeb je suchá s výjimkou chodby PŠ1-123 v úseku 918 až 973 m (Obr. 30), jedná se o úsek přibližně mezi nově raženými chodbami L4 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. 38). Součástí zóny na metráži 918 až 930 m jsou současně tři dokumentační body (296HCR0005, 296HCR0007, 296HCR0008) přiřazené vrtům BGS12-H, BGS12-VU a BGS12-I (Obr. 37) z projektu "Získání dat z hlubokých horizontů dolu Rožná". 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. Vydatnost výtoku z vrtu BGS12-H je přibližně 0,013 I.s⁻¹, vydatnost vrtu BGS12-VU je 0,0025 I.s⁻¹. Dále byl odebrán vzorek na metráži 967,3 m (d. b. 296HCR0009) v místě velmi intenzivních úkapů.



Obr. 37 Odběr vzorku z vrtu BGS12-I (d. b. 296HCR0008)

Obr. 38 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 při rekognoskační dokumentaci na hlavní chodbě PŠ1-123 a dále s postupující ražbou PVP z průsaků na chodbách L5 až L8. Popis vzorkovaných hydrogeologických dokumentačních bodů je uveden v předchozí kapitole. Celkem bylo odebráno 10 vzorků podzemních vod.

Průsaky v nově ražených chodbách mají jen minimální vydatnosti. Odběr vzorku v relativně krátkém časovém intervalu byl možný pouze u přítoků 296HCR0011 a 296HCR0014, jejichž vydatnost se pohybovala v řádu prvních ml.s⁻¹. Ostatní vzorky byly odebrány v delším časovém intervalu po instalaci provizorních záchytných zařízení. Na kvalitu stanovení delší časový interval odběru neměl významný vliv, tyto vzorky se zásadním způsobem neodlišují od ostatních.

Výsledky chemických analýz shrnuje tabulka v Elektronická příloha 4. Graficky jsou analýzy znázorněny na v Durovově diagramu na Obr. 39.



Obr. 39 Durovův diagram chemického složení podzemních vod v PVP Bukov II a v jeho bezprostředním okolí

Podzemní vody v prostoru PVP Bukov II jsou typu Na-HCO₃ až Na-SO₄, vyskytují se zde také smíšené typy vod mezi uvedenými typy. Mezi kationty jednoznačně u všech odebraných vzorků převažuje sodík s více než 80 meq%. Vzorky s převahou hydrogenuhličitanů byly odebrány v prostoru chodeb L7 a L8, mírná převaha hydrogenuhličitanů nad sírany byla zjištěna i u vzorku z vrtu BGS12-H. Na druhou stranu u výtoků z vrtů a průsaků v chodbě L5 převažuje složka síranů. Celkový obsah rozpuštěných látek je v rozmez í od 240 do 370 mg.l⁻¹, nižší hodnoty mají průsaky v chodbách L7 a L8. Podzemní vody mají zásaditý charakter, pH je v rozmezí 8,6 až 9,1.

Shrnutí dosavadních poznatků

Míra zvodnění podzemí v prostoru PVP Bukov II je ve srovnání s PVP Bukov velmi nízká. Přítoky s vydatností v řádu 0,01 I.s⁻¹ a větší (poměrně běžné v PVP Bukov I) se zde nevyskytují. Naprostá většina průsaků do chodeb má charakter vlhnutí stěn s občasnými úkapy bez výrazné vazby na konkrétní strukturní prvky. Aktuálně nejvyšší měřitelná vydatnost relativně soustředěného přítoku v rámci PVP v chodbě L8 je přibližně 0,001 I.s⁻¹. Je možné rámcově odhadnout, že u plošných průsaků většího rozsahu, kde dochází k rozptýleným úkapům na více místech, bude celková vydatnost takového úseku v také v řádu tisícin I.s⁻¹.

Vazba řady dokumentovaných průsaků na konkrétní struktury není jasná, převažují průsaky v okolí foliačních ploch s převládajícím směrem 240° až 270° a sklonem 40° až 60°. Z výraznějších zvodnělých struktur byly zaznamenány subvertikální zlomy a pukliny běžící zhruba napříč chodbami s převládajícím směrem zapadání 270° až 320° a sklonem 75° až 90°. Ražbou chodeb dochází k rozvolňování a otevírání foliačních ploch, které postupně vytvářejí vodivou síť v okolí výrubu. Podzemní voda drénovaná chodbou často opouští

původní vodivé struktury (zlom, puklina) a prosakuje po otevřených foliacích. Průsaky mění v průběhu času svou pozici i rozsah v rámci chodby. Při primární dokumentaci je v některých případech vazba na konkrétní strukturu patrná a při revizní dokumentaci už dominuje vlhkost na foliačních plochách.



Obr. 40 Průsak 296HCR0011 dne 8. 6. 2021 Obr. 41 Průsak 296HCR0011 dne 3. 2. 2022

Na Obr. 30 je patrná velmi dobrá shoda mezi dokumentovaným zvodněním v PVP Bukov II a úseky s místy s nižší rychlostí šíření seismických vln. Zóna nižších rychlostí směru SSZ-JJV se ve všech aktuálně ražených či již vyražených chodbách projevuje širšími pásy slabého zvodnění horninového prostředí.

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). V jižní části PVP, v prostoru chodeb L7 a L8, je ovlivnění podzemních vod oxidačním prostředím dolu nižší, o čemž kromě převahy hydrogenuhličitanů svědčí i nižší obsahy rozpuštěných látek ve vodě.

Ovlivnění podzemních vod v prostoru hlavní chodby a chodby L5, je vyšší, což je dáno delší dobou od realizace vrtů pro projekt "Získání dat z hlubokých horizontů dolu Rožná", desítky let trvající oxidací horninového v okolí hlavní chodby PŠ1-123 a pravděpodobným propojením průsaků vzorkovaných v chodbě L5 s hlavní chodbou. Celkový obsah rozpuštěných látek je ale ve srovnání s vyhraněnými důlními vodami typu Na-SO₄ (viz Tab. 4) nízký. V obou případech se jedná o přechodné typy.

Z hydrochemického hlediska se tedy vody z PVP Bukov I a PVP Bukov II liší. U neovlivněných podzemních vod v PVP Bukov I dominoval typ Ca-HCO₃ a vlivem oxidačního prostředí docházelo a stále dochází u některých přítoků k posunu směrem k hydrochemickému typu Ca-SO₄.

2.5 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) a společností SG Geotechnika a.s. v průběhu roku 2021, v souladu s harmonogramem prací uvedeným v kap. 3 Realizačního projektu (Bukovská et al. 2021), uskutečněny tyto níže uvedené práce.

Na přelomu první a druhé dekády měsíce května 2021 bylo z odpalu ve staničení 85,8 m chodby L7 odebráno 11 kusů horniny, které byly následně pracovníky DIAMO, s.p., o.z. GEAM vyvezeny na povrch a uskladněny v areálu dolu Rožná I. Dne 8. 6. 2021 pak byl tento velkoobjemový vzorek (VO) transportován do laboratoří ÚGN. Zde proběhla příprava laboratorních zkušebních tělísek pro jednotlivé zkoušky FMV a bylo provedeno stanovení FMV dle jejich výčtu, uvedeného v kap. 1.7. Přílohy č. 1 Smlouvy - Specifikace Předmětu plnění. Zkušební tělíska o průměru cca 47 - 50 mm a štíhlostním poměru 2:1 resp. 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). Výsledky stanovení FMV VO vzorku z chodby L7 (evid. č. ÚGN 16962) jsou přehlednou tabelární formou prezentovány v následujících podkapitolách 2.5.1. až 2.5.5. V laboratoři SG Geotechnika a.s. byl obdobným způsobem testován vzorek z chodby L8 ze staničení 43,2 m.

Po stanovení příslušných FMV byl na většině z celkem 107 připravených zkušebních tělísek makropetrograficky stanoven typ horniny, určení provedla Mgr. Tereza Zelinková z ČGS. Výsledky petrografického zařazení jsou schematicky prezentovány v Tab. 6 a Tab. 7.

Laboratorní protokoly jednotlivých zkoušek realizovaných v laboratoři SG Geotechnika jsou obsahem Elektronická příloha 5.

K1	K11	K21	P1	P11	P21	B1	B11	B21
K2	K12	K22	P2	P12	P22	B2	B12	B22
K3	K13	K23	P3	P13	P23	B3	B13	B23
K4	K14	K24	P4	P14	P24	B4	B14	B24
K5	K15	K25	P5	P15	P25	B5	B15	B25
K6	K16	K26	P6	P16	P26	B6	B16	B26
K7	K17	K27	P7	P17		B7	B17	B27
K8	K18		P8	P18		B8	B18	B28
K9	K19		P9	P19		B9	B19	B29

Tab. 6 Petrografické zařazení jednotlivých zkušebních tělísek VO vzorku ze staničení 85,8 m chodby L7 (evid. č. ÚGN 16962)

К10 К20)	P10 P20	B10	B20	B30
---------	---	---------	-----	-----	-----

<u>Vysvětlivky</u>: **zeleně** – amfibolit, **oranžově** – biotit-amfibolická pararula, 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)

Průměrná objemová hmotnost amfibolitových zkušebních tělísek uvedených v Tab. 6 byla 2908 kg·m⁻³, u tělísek připravených z biotit-amfibolických pararul pak 2888 kg·m⁻³.

E0 (100: 0: 000)									
Těleso	Hornina	Poznámka	Těleso	Hornina	Poznámka				
75328/I TAH	А	páskovaný amfibolit	75329/TAH I	А	amfibolit				
75328/II TAH	А	amfibolit	75329/II TAH	А	páskovaný amfibolit				
75328/III TAH	А	amfibolit	75329/III TAH	А	amfibolit				
75328/IV TAH	А	páskovaný amfibolit	75329/IV TAH	А	amfibolit				
75328/V TAH	А	páskovaný amfibolit	75329/V TAH	А	páskovaný amfibolit				
75328/I PT	А	amfibolit	75329/I PT	А	páskovaný amfibolit				
75328/II PT	А	amfibolit	75329/II PT	А	amfibolit				
75328/III PT	А	páskovaný amfibolit	75329/III PT	А	páskovaný amfibolit				
75328/IV PT	А	páskovaný amfibolit	75329/IV PT	А	amfibolit				
75328/V PT	BAP	biotit-amfibolická pararula	75329/V PT	А	amfibolit				
75328CAI	BAP	biotit-amfibolická pararula	75329CAI	A	amfibolit				
75328-P	BAP	biotit-amfibolická pararula	75329-P	А	amfibolit				

Tab. 7 Petrografické zařazení jednotlivých zkušebních tělísek VO vzorku ze staničení 43,2 m chodby L8 (lab. č. SGGT 75328 směr kolmo na foliaci, 75329 směr paralelně s foliací)

2.5.1 Fyzikální vlastnosti

2.5.1.1 Chodba L7

Na zkušebních tělíscích, připravených z VO vzorku z chodby L7 byly stanoveny následující fyzikální vlastnosti hornin: měrná a objemová hmotnost, rychlost průchodu podélných ultrazvukových vln (UZV), celková pórovitost, nasákavost (po 48 a 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. 8 až Tab. 11 a na Obr. 42 až Obr. 45.

Tab.	8	Výsledky	stanovení	základních	fyzikálních	vlastností	horniny	v VO v	zorku	ze staniče	ní 85,8 n	1
choo	lby	[,] L7 (evid.	č. ÚGN 16	i962)								

Vlastnost	Jednotka	Počet stanovení	Minimální hodnota	Maximální hodnota	Ø	SD	C.V. [%]
Měrná hmotnost	kg⋅m ⁻³	12	2887	3059	2960	50	2
Objemová hmotnost	kg∙m-³	83	2785	3019	2897	57	2
Rychlost šíření UZV – <i>směr K</i>	km⋅s⁻¹	27	3,66	6,11	5,29	0,60	11
Rychlost šíření UZV – <i>směr P</i>	km⋅s⁻¹	26	5,86	7,12	6,47	0,33	5
Celková pórovitost	%	12	0,23	1,80	0,89	0,41	46
Nasákavost po 48 hod.	%	6	0,05	0,11	0,07	0,02	29
Nasákavost po 96 hodinách	%	8	0,07	0,18	0,10	0,04	40
Nasákavost do ustálení hmotnosti	%	8	0,08	0,20	0,11	0,04	36
Otevřená pórovitost	%	8	0,23	0,58	0,32	0,13	41

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

Tab. 9 Parametry pórovitosti horniny VO vzorku ze staničení 85,8 m chodby L7 (evid. č. ÚGN 16962)

Označení	Celkový obiem	Průměrná	Pórovitost pomocí MIP [%]		
zkušebního tělíska	pórů [cm ³ .g ⁻¹]	velikost póru (4V/A) [µm]	dílčí hodnoty	průměr	
16962/K8B/7	0,0006	0,0278	0,17	0.40	
16962/P8B/5	0,0005	1,1353	0,15	0,16	

Tab. 10 Koeficient hydraulické vodivosti při 10 °C (k_{10}) horniny VO vzorku ze staničení 85,8 m chodby L7 (evid. č. ÚGN 16962)

Označení zkušebního tělíska	Objemová hmotnost [kg.m ⁻³]	Průměr k ₁₀ [m.s ⁻¹]	Směrodatná odchylka [m.s ⁻¹]	Variační koeficient [%]	Počet měření		
16962/K7A	2884	průt	průtok pod mezí detekce				
16962/K7B	2881	průt	průtok pod mezí detekce				

16962/K8A	2871	3,4E-12	5,6E-13	16	5			
16962/P7A	2904	1,1E-11	2,8E-12	26	5			
16962/P7B	2909	průt	průtok pod mezí detekce					
16962/P8A	2986	průt	4					

Tab. 11 Koeficient plynopropustnosti horniny VO vzorku ze staničení 85,8 m chodby L7 (evid. č. ÚGN 16962) a z něj odvozený koeficient hydraulické vodivosti pro 10 °C (k_{10})

Označení zkušebního tělíska	Objemová hmotnost [kg.m ⁻³]	Boční tlak [MPa]	Objemový průtok [m³.s ^{⁻1}]	Koeficient plynopropustnosti k _p [m²]	Koeficient hydraulické vodivosti k ₁₀ [m⋅s⁻¹]
		5	4,8E-08	4,7E-19	3,5E-12
16962/K17	2879	10	1,3E-09	1,3E-20	9,8E-14
		15		průtok pod mezí dete	kce
		5	7,2E-05	7,0E-16	5,3E-09
		10	6,0E-05	5,9E-16	4,4E-09
16962/K18	2938	15	4,2E-05	3,8E-17	2,9E-10
		20	3,0E-05	2,8E-17	2,1E-10
		25	2,3E-05	2,2E-17	1,7E-10
		30	2,0E-05	1,8E-17	1,4E-10
		3,3	3,0E-07	2,9E-18	2,2E-11
16962/P17	3019	5	2,1E-07	2,0E-18	1,5E-11
		10		průtok pod mezí dete	kce
		5	2,2E-08	2,2E-19	1,7E-12
16062/049	2955	10	5,2E-09	5,1E-20	3,8E-13
10902/118	2855	15	1,6E-09	1,4E-21	1,1E-14
		20	9,2E-10	8,5E-22	6,4E-15



Obr. 42 Plynopropustnost horniny VO vzorku ze staničení 85,8 m chodby L7 (evid. č. ÚGN 16962, zkušební tělísko K17 navrtáno kolmo k foliaci)



Obr. 43 Plynopropustnost horniny VO vzorku ze staničení 85,8 m chodby L7 (evid. č. ÚGN 16962, zkušební tělísko K18 navrtáno kolmo k foliaci)



Obr. 44 Plynopropustnost horniny VO vzorku ze staničení 85,8 m chodby L7 (evid. č. ÚGN 16962, zkušební tělísko P17 navrtáno rovnoběžně s foliací)



Obr. 45 Plynopropustnost horniny VO vzorku ze staničení 85,8 m chodby L7 (evid. č. ÚGN 16962, zkušební tělísko P18 navrtáno rovnoběžně s foliací)

2.5.1.2 Chodba L8

Výsledky laboratorních zkoušek fyzikálních vlastností realizovaných v laboratoři SG Geotechnika jsou obsahem následující tabulky (Tab. 12). Z výsledků je patrná nízká pórovitost a s ní související propustnost horninové matrice. Objemová hmotnost se pohybuje mezi 2700

a 2990 kg.m⁻³. Rychlost průchodu P-vln ve směru kolmo na foliaci je o 21 až 24 % nižší než ve směru paralelním s foliací.

Vzorek	Nasákavost [%]	Otevřená pórovitost [%]	Celková pórovitost [%]	Specifická hmotnost [kg.m ^{.3}]	Objemová hmotnost [kg.m ⁻³]	Rychlost P-vln [km.s ⁻¹] min/max	Plynopropustnost [m²] při 5 MPa	Koeficient hydraulické vodivosti [m.s ⁻¹]
75328	0.14	0.40	*	0700	2703/	4,513/	0.5-40-21	<1,0×10⁻
kolmo	0,14	0,40		2132	2947	5,900	0,0×10-	14
75329					2722/	4,633/		<1.0×10 ⁻
paralelně	0,12	0,37	0,73	2742	2990	5,834	6,6×10 ⁻¹⁹	14

Tab. 12 Výsledky stanovení fyzikálních vlastností horniny VO vzorku ze staničení 42,3 m chodby L8

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

2.5.2 Tepelné vlastnosti

2.5.2.1 Chodba L7

V rámci studia tepelných vlastností byly stanoveny následující parametry horniny ze staničení 85,8 m chodby L7: součinitel tepelné vodivosti, měrná tepelná kapacita, tepelná difuzivita a součinitel teplotní roztažnosti. Výsledky stanovení jsou uvedeny v Tab. 13 a Tab. 14 a na Obr. 46 a Obr. 47.

Vlastnost	Jednotka	Počet stanovení	Průměrná hodnota	Minimální hodnota	Maximální hodnota
Tepelná vodivost – <i>směr K</i>	W.m ⁻¹ .K ⁻¹	3	2,20	2,05	2,27
Tepelná vodivost – <i>směr P</i>	W.m ⁻¹ .K ⁻¹	3	2,38	2,35	2,43
Tepelná kapacita – <i>směr K</i>	MJ.m ⁻³ .K ⁻¹	3	1,94	1,87	2,01
Tepelná kapacita – <i>směr P</i>	MJ.m ⁻³ .K ⁻¹	3	2,00	1,95	2,07
Tepelná difuzivita – <i>směr K</i>	mm ² .s ⁻¹	3	1,13	1,10	1,16
Tepelná difuzivita – <i>směr P</i>	mm².s ⁻¹	3	1,19	1,14	1,25

Tab. 13 Výsledky stanovení základních tepelných vlastností horniny VO vzorku ze staničení 85,8 m chodby L7 (evid. č. ÚGN 16962)



Obr. 46 Dilatační (TMA) křivka tělíska 16962/K8B (ohřev na 1000 °C s následným ochlazením), vlevo – roztažnost sledována kolmo na foliaci, vpravo – roztažnost sledována ve směru foliace



Obr. 47 Dilatační (TMA) křivka tělíska 16962/P8B (ohřev na 1000 °C s následným ochlazením), vlevo – roztažnost sledována kolmo na foliaci, vpravo – roztažnost sledována ve směru foliace

Tab. 14 Koeficient teplotní roztažnosti horniny VO vzorku ze staničení 85,8 m chodby L7 (evid. č. L	ΊGN
16962)	

Označení zkušebního tělíska	Rozměry zkušebního tělíska [mm]	Teplota ohřevu [°C]	Rychlost ohřevu [°C/min]	Orientace vůči foliaci	α [K ⁻¹]
16962/K8B/12	10 x 10 x 10	1000	20	\perp	25,8·10 ⁻⁶
16962/K8B/14	10 x 10 x 10	1000	20	//	14,7·10 ⁻⁶
16962/K8B/19	10 x 10 x 10	150	1	\perp	7,3·10 ⁻⁶
16962/K8B/16	10 x 10 x 10	150	1	//	6,7·10 ⁻⁶
16962/P8B/12	9 x 9 x 9	1000	20	L	18,3·10 ⁻⁶
16962/P8B/13	9 x 9 x 9	1000	20	//	17,8·10 ⁻⁶
16962/P8B/20	9 x 9 x 9	150	1	L	6,5·10 ⁻⁶

Označení zkušebního tělíska	Rozměry zkušebního tělíska [mm]	Teplota ohřevu [°C] [°C/min]		Orientace vůči foliaci	α [K ⁻¹]
16962/P8B/18	9 x 9 x 9	150	1	//	5,7·10 ⁻⁶

2.5.2.2 Chodba L8

Výsledky laboratorních zkoušek tepelných vlastností realizovaných v laboratoři SG Geotechnika jsou obsahem následující tabulky (Tab. 15). Z výsledků je patrné, že je tepelná vodivost vyšší ve směru paralelním s foliací než ve směru kolmo na ní.

Tab. 15 Výsledky stanovení tepelných vlastností horniny VO vzorku ze staničení 42,3 m chodby L8

Vzorek	Tepelná vodivost [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	Tepelná kapacita [MJ.m ⁻³ .K ⁻¹]	Teplotní roztažnost [µm.m ⁻¹]
75328 kolmo	2,54	2,15	9
75329 paralelně	2,68	2,14	10

2.5.3 Pevnostní a deformační vlastnosti

Ve smyslu kap. 1.7. Přílohy č. 1 Smlouvy o realizaci geologické a geotechnické charakterizace horninového prostředí – PVP Bukov II (Specifikace Předmětu plnění) byly stanoveny tyto pevnostní a deformační vlastnosti horniny VO vzorku, odebraného ve staničení 85,8 m chodby L7: pevnost v prostém tlaku, modul přetvárnosti a Poissonovo číslo při zkoušce v prostém tlaku, modul přetvárnosti a elasticity při cyklickém zatěžování, pevnost v tlaku a modul přetvárnosti za trojosého stavu napjatosti a pevnost v příčném tahu tzv. brazilskou zkouškou. Výsledky stanovení jsou prezentovány v Tab. 16 až Tab. 18.

Tab. 16 Hodnoty základních pevnostních a přetvárných vlastností horniny VO vzorku ze staničení 85,8 m chodby L7 (evid. č. ÚGN 16962)

Vlastnost	Jednotka	Počet stanovení	Minimální hodnota	Maximální hodnota	Ø	SD	C.V. [%]
б _{Рd} – směr К	MPa	6	209	245	231	13	6
б _{Рd} – směr P	MPa	6	192	263	224	23	10
E _{20-40%} – <i>směr K</i>	GPa	6	56,5	61,5	59,2	2,1	4
E _{20-40%} – směr P	GPa	6	65,8	77,1	71,9	3,8	5
µ – směr K	-	6	0,14	0,26	0,19	0,04	20
µ – směr P	-	6	0,15	0,28	0,20	0,05	25
s _{Ptp} – tah⊥ k foliaci	MPa	13	6,4	11,6	9,0	1,4	16

σ _{Ρtp} – tah// s foliací	MPa	12	9,5	20,5	14,0	3,7	26

<u>Vysvětlivky</u>: σ_{Pd} – pevnost v prostém tlaku, $E_{20-40\%}$ – modul přetvárnosti stanovený v rozsahu 20–40 % maximální působící síly, μ – Poisonovo číslo, σ_{Ptp} – pevnost v příčném tahu stanovená tzv. brazilskou zkouškou, \emptyset - aritmetický průměr, S.D. – směrodatná odchylka, C.V. – variační koeficient

Tab. 17 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 ze staničení 85,8 m chodby L7 (evid. č. ÚGN 16962) v různých směrech zatěžování vůči metamorfní foliaci stanovené v režimu cyklického zatěžování

Označení zkušebního tělíska	б _{Рd} [MPa]	E _{1def} [GPa]	E _{1el} [GPa]	E _{2def} [GPa]	E _{2el} [GPa]	Poměr E _{1def} /E _{1e} [-]	Poměr E _{2def} /E _{2e} [-]
16962/K9	269	66,0	68,2	65,0	67,9	0,97	0,96
16962/K11	258	60,7	71,7	61,7	70,3	0,85	0,88
16962/P9	205	65,6	84,3	68,8	82,0	0,78	0,84
16962/P10	197	69,8	85,3	70,6	81,6	0,82	0,87

Tab. 18 Hodnoty pevnosti a modulu přetvárnosti (20–40% F_{max}) hornin VO vzorku ze staničení 85,8 m chodby L7 (evid. č. ÚGN 16962) v trojosém stavu napjatosti při různém plášťovém tlaku v různých směrech zatěžování vůči metamorfní foliaci

Označení Orientace zkušebního		Plášťový	Pevnost v stavu napja	v trojosém atosti [MPa]	Modul přetvárnosti
tělíska	tělíska vůči foliaci	tlak [MPa]	Dílčí hodnota	Průměr	napjatosti [GPa]
16962/K12			285		_
16962/K15		5	256	210	_
16962/K19		5	168	210	68,0
16962/K22			132		52,1
16962/K14			290		_
16962/K16		10	333	255	_
16962/K20			142		74,7
16962/K23	-	15	190	190	59,7
16962/K21		20	188	290	76,1
16962/K24		30	389	209	72,0
16962/P11			208		_
16962/P13		5	228	212	_
16962/P19		5	198	212	83,4
16962/P22			212		98,2
16962/P12		10	340	280	_
16962/P16		10	225	200	_

Označení zkušebního	Orientace zkušebního	Plášťový	Pevnost v stavu napja	v trojosém atosti [MPa]	Modul přetvárnosti v trojosém stavu
tělíska	tělíska vůči foliaci	tiak [MPa]	Dílčí hodnota	Průměr	napjatosti [GPa]
16962/P20			275		91,3
16962/P23		15	311	311	97,1
16962/P21		20	304	000	95,0
16962/P24		30	172	238	79,0

2.5.3.1 Chodba L8

Výsledky laboratorních zkoušek pevnostních a deformačních vlastností realizovaných v laboratoři SG Geotechnika jsou obsahem následující tabulky (Tab. 19). Z výsledků je patrné, že pevnost horniny je vyšší ve směru kolmém na foliaci než paralelně s ní.

Tab. 19 Výsledky stanovení pevnostních a deformačních vlastností horniny VO vzorku ze staničení 42,3 m chodby L8

Vzorek	Pevnost v příčném tahu [MPa]	Pevnost v prostém tlaku [MPa]	Pevnost v triaxiálním tlaku m [-]	Modul pružnosti [GPa]**	Modul přetvárnosti [GPa]**	Poissonovo číslo [-]**
75328 kolmo	16,0	165,3	*	59,0	62,0	0,25
75329 paralelně	12,7	140,0	*	78,0	76,0	0,21

*Pozn. Bude dodáno po realizaci všech laboratorních zkoušek v rámci další etapy.

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

2.5.4 Technologické vlastnosti

2.5.4.1 Chodba L7

Z technologických vlastností byla na dvou zkušebních tělíscích, připravených z VO vzorku ze staničení 85,8 m chodby L7, stanovena abrazivnost metodou CERCHAR. Měření bylo provedeno v laboratořích fy. SG Geotechnika a.s., výsledky jsou uvedeny v Tab. 20.

Označení zkušebního tělíska	Orientace vůči foliaci	Objemová hmotnost [kg⋅m⁻³]	Hornina	Abrazivnost CAI	Klasifikace abrazivnosti podle CAI
16962/K25	L	2902	BAP	3,22	vysoká

Tab. 20 Abrazivnost horniny VO vzorku ze staničení 85,8 m chodby L7 (evid. č. ÚGN 16962)

Označení Orientace zkušebního tělíska vůči foliaci		Objemová hmotnost [kg⋅m⁻³]	Hornina	Abrazivnost CAI	Klasifikace abrazivnosti podle CAI
16962/P25	//	2894	BAP	3,14	

Vysvětlivky: A – amfibolit, BAP – biotit-amfibolická pararula

2.5.4.2 Chodba L8

Výsledky laboratorních zkoušek technologických vlastností realizovaných v laboratoři SG Geotechnika jsou obsahem následující tabulky (Tab. 21). Z výsledků je patrné, že abrazivnost horniny je vysoká, a to jak v případě amfibolitu, tak biotit-amfibolické pararuly (viz Tab. 7).

Tab. 21 Výsledky stanovení technologických vlastností horniny VO vzorku ze staničení 42,3 m chodby L8

Vzorek	Abrazivnost CAI [-]		
75328 kolmo	3,3		
75329 paralelně	3,5		

2.5.5 Petrofyzikální vlastnosti

V etapě prací 2021 na PVP II byly ke stanovení petrofyzikálních parametrů dodány jádra z výrubů označených číslem L7 85,8 m (ev. číslo 16962) a L8 43,2 m. Vzorky byly dodány jednak jako jádra o průměru cca 48 mm a dva kusové vzorky. Vzorky jsou předběžně klasifikovány jako biotit–amfibolické pararuly, slabě migmatitizované. Bylo požadováno stanovení hustotních parametrů (objemová a mineralogická hustota a pórovitost), dále magnetické susceptibility, elektrické konduktivity, radioaktivity a anizotropie magnetické susceptibility.

Měření a vyhodnocení magnetické anizotropie provedl Prof. RNDr. František Hrouda, CSc. Vzorky byly měřeny pomocí střídavého můstku MFK1-FA ve fy. AGICO s.r.o. Brno. 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. Ostatní měření a vyhodnocení provedl Jaromír Hanák.

2.5.5.1 Úpravy vzorků a metodika měření

Z chodby L7 (85,8 m) bylo dodáno 5 tzv. "brazilských disků" o průměru ca 48 mm a 2 kusové vzorky. Brazilské disky byly všechny orientovány kolmo na foliaci ve směru jejich osy. Jelikož byla vyžadována stanovení elektrické konduktivity kolmo a rovnoběžně s foliací, byla v těchto směrech z kusových vzorků odvrtána 2 jádra v požadované orientaci (viz Obr. 48). Vzorky byly dále upraveny na délku 40 mm, která je požadována pro metodiku petrofyzikálních měření. Metodiky jsou blíže specifikovány např. Hanák et al. (2017). Hustotní parametry a magnetická

susceptibilita byly stanoveny u sedmi vzorků. Podle relativní látkové homogenity určené z těchto měření byly dále vybrány 3 vzorky pro stanovení elektrické konduktivity, anizotropie magnetické susceptibility a 2 vzorky pro stanovení radioaktivity.

Z chodby L8 (43,2 m) byla dodána 2 jádra o průměru ca 48 mm v orientaci rovnoběžně a kolmo na foliaci. Z každého jádra byly vyhotoveny 2 vzorky o délce ca 40 mm a na nich byly stanoveny hustotní parametry a magnetická susceptibilita. Ukázalo se, že jádra jsou fyzikálně látkově odlišná a tak každé jádro bylo nutno posuzovat zvláště. Pro stanovení elektrické konduktivity tedy bylo nutno vyříznout hranoly tak, aby bylo možno stanovit konduktivitu ve směrech rovnoběžně a kolmo na foliaci. Celkem byla provedena 4 stanovení hustotních parametrů a magnetické susceptibility a 4 stanovení elektrické konduktivity, 2 stanovení anizotropie magnetické susceptibility a 2 stanovení radioaktivity.

Pro stanovení radioaktivity u vzorků z obou lokalit byla požita metoda vyžadující podrcení vzorku na frakci pod 3 mm. Důvodem bylo snaha stanovit radioaktivní nerovnováhu mezi U a eU. Ukázalo se, že jde o nízko radioaktivní vzorky, a proto byla měření vždy opakována nejméně 5× z důvodů citlivosti použité metody. Pro nedostatek materiálu bylo také nutno použít vždy odřezků ze dvou blízkých vzorků. Radioaktivní nerovnováha je důležitým indikátorem recentních a subrecentních procesů v hornině.

U vzorků z obou lokalit, kde byly stanoveny obsahy radioaktivních prvků, byla vypočtena tepelná produkce (HPU). Formule námi používaná (převzato z Hanák et al. 2017) má podobu:

$$HPU = Do * (ekvTh * 26,61 + ekvURa * 96,96 + K * 35,8/1000)$$
(1)

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 dvou stanovení odpovídajících sloučeným vzorkům pro stanovení radioaktivity.

Přehled všech provedených laboratorních stanovení udává Tab. 22.

			•	•
pořadové číslo vzorku	vzorek	orientace vzorku vůči foliaci	použité petrofyzikální metody	
1	B26	K	Do, Dm, p, k, AMS	
2	B27	K	Do, Dm, p, k	
3	B28	K	Do, Dm, p, k, R	*
4	B29	K	Do, Dm, p, k, R	*
5	B30	K	Do, Dm, p, k, AMS	
6	16962 A	K	Do, Dm, p, k, R, EL, AMS	*
7	16962 B	Р	Do, Dm, p, k, R, EL, AMS	*
8	L8 43,2	P2	Do, Dm, p, k, R, EL	*
9	L8 43,2	P1	Do, Dm, p, k, EL, AMS	*

Tab. 22 Seznam měřených vzorků z L7 85,8 m a L8 43,2 m a stanovené parametry

10	10 L8 43,2 K1 Do, Dm, p, k, R, EL							
11	11 L8 43,2 K2 Do, Dm, p, k, EL, AMS							
	Vysvětlivka: Do - objemová hustota, Dm - mineralogická hustota,							
	p - pórovitost, k - magnetická susceptibilita, EL - elektrická vodivost,							
R - radioaktivita, AMS - anizotropie magnetické susceptibility.								
* na radioaktivitu byly vždy sloučené odřezky ze dvou vzorků v tabulce barevně odlišených								

2.5.5.2 Výsledky stanovení hustotních parametrů, magnetické susceptibility, radioaktivity a elektrické konduktivity

L7 85,8 m (16962)

Tab. 23 udává hodnoty hustotních parametrů a magnetické susceptibility u sedmi vzorků z L7. V Tab. 24 jsou uvedeny hodnoty obsahů radioaktivních prvků pro výběrové vzorky s vypočtenou tepelnou produkcí (HPU). Na Obr. 49 jsou graficky zobrazeny hodnoty mineralogických hustot a magnetické susceptibility, na Obr. 50 pak obsahy radioaktivních prvků.

Hodnoty elektrické konduktivity, která je měřena ve spektru několika frekvencí, jsou uvedeny v tabulce a grafu v Obr. 51.

Anizotropie magnetické susceptibility (AMS) je spolu se vzorky z lokality L8 43,2 hodnocena v kapitole 2.5.5.3.



Obr. 48 Odvrtaná jádra z kusového vzorku a zrudnění patrné na odlomené ploše – L7 85,8 m

Vzorek L7 85,8 m (16962)			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	B26	K	2,921	2,936	0,50	1004
2	B27	К	2,887	2,899	0,41	2462
3	B28	К	2,937	2,945	0,28	1424
4	B29	К	2,925	2,933	0,28	2173
5	B30	К	2,904	2,911	0,27	2984
6	16962A	К	2,867	2,875	0,30	4062
7	16962B	Р	2,896	2,901	0,18	7070
Vysvětlivka	K – kolmo, P – paralelně s foliací					

Tab. 23 Hustotní parametry (Do, Dm, p) a magnetická susceptibilita (k) – naměřené hodnoty, L7 85,8 m



Obr. 49 Porovnání hodnot mineralogických hustot Dm (g.cm⁻³) a magnetických susceptibilit k (10⁻⁶ j.SI) u hornin z L7 (16962)



Obr. 50 Distribuce hodnot pórovitosti (p - %) u vzorků hornin z L7 (16962)

Tab. 24 Obsahy radioaktivních prvků eTh, U, eU	v ppm a K v % a vypočtená tepelná produkce (HPU
µW.m ⁻³) u vzorků hornin z L7 85,8 m (16962)	

	Lokalita 169	62	hmotnost vzorku	obsahy eTh	obsahy U	obsahy eU	obsahy K	HPU
pořadové		orientace						
číslo		vzorku vůči						
vzorku	vzorek	foliaci	[g]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[%]	[µW.m ⁻³]
6 a 7	1692 A a B	КаР	332	1,5	1,2	1,2	0,87	0,54
pro měřer	ní byly slouč	eny odřezky	332	1,7	0,8	1,3	0,96	0,59
ze vzor	ků 6 a 7, mě	ěření bylo	332	1,9	0,8	0,9	0,86	0,49
prove	edeno 5x a v	ypočten	332	1,9	1,1	1,1	0,95	0,55
aritm	etický prům	ěr AM a	332	1,3	0,8	1,2	0,91	0,53
směrodat	tná odchylka	a SD. HUP -	AM	1,7	0,9	1,1	0,91	0,54
tepelna produkce		ikce	SD	0,3	0,2	0,2	0,05	0,03
	Lokalita 169	62	hmotnost vzorku	obsahy eTh	obsahy U	obsahy eU	obsahy K	HPU
pořadové		orientace						
číslo		vzorku vůči						
vzorku	vzorek	foliaci	[g]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[%]	[µW.m ⁻³]
3 a 4	1692 3 a 4	К	326	1,6	1,3	1,1	0,63	0,50
pro měřer	ní byly slouč	eny vzorky 3	326	1,4	0,8	1,3	0,58	0,54
a 4, měře	ení bylo prov	vedeno 7x a	326	1,9	0,9	1,3	0,61	0,58
vypočten	aritmetický p	orůměr AM a	326	1,3	1,3	1,0	0,74	0,46
směro	odatná odch	ylka SD.	326	1,9	0,4	1,0	0,70	0,51
HUP - tepelná produkce			326	2,3	1,4	0,9	0,58	0,50
			326	2,0	1,1	0,9	0,63	0,48
			AM	1,8	1,0	1,1	0,64	0,51
			SD	0,4	0,4	0,2	0,06	0,04



Obr. 51 Porovnání aritmetických průměrů obsahů radioaktivních prvků (eTh, U, eU a K) ve 2 vzorcích hornin z L7 85,8 m (lokality 16962)



Obr. 52 Elektrická konduktivita σ (μ S.m⁻¹) stanovená na vzorcích L7 (16962) K 6 (kolmo k foliaci) a L7 85,8 m (16962) P 7 (rovnoběžně s foliací)

Vyhodnocení naměřených dat z L7 85,8 m (16962)

<u>Distribuce hodnot mineralogických hustot (Dm) a magnetické susceptibility (</u>K) pro horniny z L7 je znázorněna na Obr. 49. Hodnoty mineralogických hustot se pohybují mezi 2,875 g.cm⁻³ až po 2,936 g.cm⁻³, magnetická susceptibilita je poměrně vysoká a vykazuje hodnoty mezi 1004 10⁻⁶ j.SI až po 7070 10⁻⁶ j.SI. Na vzorcích lze makroskopicky zřetelně indikovat zrudnění (viz

Obr. 48). Tyto minerály budou hlavní příčinou hodnotového rozdílu hustot, ale i magnetické susceptibility, která s mineralogickou hustotou vykazuje nevýznamnou korelaci. Lze usoudit, že susceptibilita studovaných vzorků je zčásti nesena paramagnetickými (tmavé silikáty) a zčásti (snad převážné) feromagnetickými minerály (pravděpodobně magnetit).

Na tomto místě je nutné se zmínit i o <u>vyšší pórovitosti (</u>Obr. 50<u>)</u>, která se pohybuje mezi 0,1 až 0,5 %. Upozorňuje tak na možnou "alteraci" hornin. Obecně pórovitost kolem 0,5% je považována jako indikátor možného postižení horniny druhotnými procesy. S vyšší pórovitostí klesá objemová hustota.

<u>Obsahy přirozených radioaktivních prvků</u> byly stanoveny u 2 výběrových vzorků (jak je zdůvodněno výše) - viz Obr. 51. a jsou relativně nízké ve všech parametrech! Aritmetické průměry u obsahů eTh se pohybují mezi 1, 7 až 1,8 ppm, obsahy eU (1,1 ppm) a K (0,64 a 0,91%). Z toho vyplývá i nízká tepelná produkce – kolem 0,5 (µW.m⁻³). Radioaktivní rovnováha mezi obsahy U a eU u obou sledovaných vzorků není porušena.

<u>Pro stanovení elektrické konduktivity</u> byly vzorky měřeny ve směru foliace a kolmo na foliaci. Na grafu na Obr. 52 je zřejmé, že ve směru foliace jsou hodnoty elektrické konduktivity až řádově vyšší, než ve směru kolmém na foliaci. Při frekvenci 1000 Hz má elektrická konduktivita ve směru foliace hodnotu 16,743 (µS.m⁻¹), ve směru kolmém pak 2,126 (µS.m⁻¹). Důležitou roli ve stanovených hodnotách hraje jistě zrudnění a u jiných vzorků se mohou konduktivity lišit v závislosti na obsahu rudních minerálů. Vzorky jsou měřeny tzv. v suchém stavu, tedy základním faktorem ovlivňujícím elektrickou konduktivitu je kostra horniny (matrix), větší vliv pórovitostí by se projevil až po nasycení vzorků elektrolytem.

Lokalita L8 43,2 m

Tab. 25 udává hodnoty hustotních parametrů a magnetické susceptibility u 4 vzorků z lokality L8 43,2. V Tab. 26 jsou uvedeny průměrné hodnoty obsahů radioaktivních prvků pro výběrové vzorky s vypočtenou tepelnou produkcí (HPU). Na Obr. 53 jsou graficky zobrazeny hodnoty mineralogických hustot a magnetické susceptibility, na Obr. 54 pak obsahy radioaktivních prvků. Hodnoty elektrické konduktivity, která je měřena ve spektru několika frekvencí, jsou uvedeny v tabulce vložené v Obr. 55. Anizotropie magnetické susceptibility (AMS) je spolu se vzorky z lokality 16962 hodnocena v kapitole 2.5.5.3.

Lokalita L8 43,2 m			Hustotn	í parametry a m	agnetická susc	eptibilita
pořadové číslo vzorku	vzorek foliaci		Objemová hustota (Do)	Mineralogická hustota (Dm)	Pórovitost (p)	Magnetická susceptibilita (k)
			[g.cm ⁻³]	[g.cm ⁻³]	[%]	[10 ⁻⁶ j. SI]
8	L8 43,2	P2	2,833	2,837	0,14	798,3
9	L8 43,2	P1	2,743	2,748	0,17	1083,0
10	L8 43,2	K1	2,984	2,989	0,15	3086,7
11	L8 43,2	K2	2,995	3,000	0,19	4981,6

Tab. 25 Hustotní parametry (Do, Dm, p) a magnetická susceptibilita (k) – přehled naměřených hodnot, lokalita L8 43,2 m

```
vysvětlivka
```

K - kolmo, P - paralelně s foliací



Obr. 53 Porovnání hodnot mineralogických hustot Dm (g.cm⁻³) a magnetických susceptibilit k (10⁻⁶ j.SI) u hornin z lokality L8 43,2 m

Tab. 26 Obsahy radioaktivních prvků eTh, U,	eU v ppm a K v % a	a vypočtená tepelná	produkce (HPU
uW.m ⁻³) u vzorků hornin z lokality L8 43,2 m			

	Lokalita L8 43,2		hmotnost vzorku	obsahy eTh	obsahy U	obsahy eU	obsahy K	HPU
pořadové		orientace vzorku						
číslo vzorku	vzorek	vůči foliaci	[g]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[%]	[µW.m ⁻³]
			284	6,3	2,7	3,1	1,81	1,59
10 a 11	L8 43,2	К	284	6,6	2,9	3,4	1,84	1,71
pro měření	byly slouč	eny odřezky ze	284	6,2	2,9	3,2	1,77	1,61
vzorků 10 a11	, měření by	/lo provedeno 5x a	284	6,3	2,8	2,8	1,49	1,47
vypočten	aritmetický	průměr AM a	284	7,0	2,1	2,8	1,57	1,54
směrodatná	odchylka S	D. HUP - tepelná	AM	6,5	2,7	3,1	1,70	1,58
	produkc	е	SD	0,3	0,3	0,3	0,16	0,09
Lokalita L8 43,2		43,2	hmotnost vzorku	obsahy eTh	obsahy U	obsahy eU	obsahy K	HPU
pořadové		orientace vzorku						
číslo vzorku	vzorek	vůči foliaci	[g]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[%]	[µW.m ⁻³]
8 a 9	L8 43,2	Р	328	3,0	2,4	3,0	1,14	1,15
pro měření	í byly slouč	eny odřezky ze	328	2,9	2,7	2,8	0,96	1,07
vzorků 8 a 9, měření bylo provedeno 5x a			328	3,6	2,2	2,4	1,02	1,02
vypočten aritmetický průměr AM a			328	2,7	2,7	3,0	0,89	1,10
směrodatná	odchylka S	D. HUP - tepelná	328	3,7	2,2	2,5	0,99	1,05
	produkc	e	AM	3,2	2,4	2,7	1,00	1,08
			SD	0,4	0,3	0,3	0,09	0,05



Obr. 54 Porovnání obsahů radioaktivních prvků (eTh, U, eU a K) ve 2 vzorcích hornin z lokality L8 43,2



Obr. 55 Elektrická konduktivita stanovená na vzorcích z lokality L8 43,2 - K 8 a K2-11 (kolmo k foliaci) a P1-9 a P10 (rovnoběžně s foliací)

Vyhodnocení naměřených dat z L8 43,2 m

<u>Hodnoty mineralogických hustot (Dm) a magnetické susceptibility (</u>k) pro horniny z lokality označené jako L8 43,2 jsou znázorněny v grafu na Obr. 53. U jádra L8 43,2 P jsou stanovené hodnoty mineralogických hustot 2,837 g.cm⁻³ a 2,748 g.cm⁻³, magnetická susceptibilita vykazuje hodnoty 798,3 10⁻⁶ j.SI a 1083 10⁻⁶ j.SI. Vzorek L8 43,2 K pak má hodnoty

mineralogických hustot i magnetické susceptibility výrazně vyšší, 2,9 až 3,0 g.cm⁻³ a ca 3000 až 5000 10⁻⁶ j.SI. U tohoto vzorku lze makroskopicky pozorovat zrna granátů, které by pak byly příčinou vyšší hustoty. Pórovitost je nízká a pohybuje se u obou vzorků mezi 0,14 až 0,19%.

<u>Obsahy přirozených radioaktivních prvků</u> byly stanoveny u 2 výběrových vzorků (jak je zdůvodněno výše) a jsou znázorněny v grafu na Obr. 54. U sloučeného vzorku 10 a 11 K je aritmetický průměr u obsahů eTh 6,5 ppm, obsahy eU 3,1 ppm a K 1,7 %. Tepelná produkce je 1,58 μ W.m⁻³.

Vzorek 8 a 9 P je aritmetický průměr u obsahů eTh 3,2 ppm, obsahy eU 2,7 ppm a K 1,0 %. Tepelná produkce je 1,08 μ W.m ⁻³.

Radioaktivní rovnováha mezi obsahy U a eU u obou sledovaných vzorků není porušena.

<u>Z výše uvedených dat vyplynulo, že studovaná jádra z lokality L8 43,2 jsou látkově odlišná a</u> pro stanovení elektrické konduktivity bylo nutno z metodických důvodů jádra upravit do tvaru hranolu. Tak bylo umožněno měření elektrické konduktivity ve směrech foliace a kolmo na foliaci. Na grafu na Obr. 55 je zřejmé, že ve směru foliace jsou hodnoty elektrické konduktivity až řádově vyšší, než ve směru kolmém. U vzorků připravených z jádra L8 43,2 8 a 9 má elektrická konduktivita při frekvenci 1000 Hz ve směru foliace hodnoty 11,939 (μ S.m⁻¹), ve směru kolmém pak 3,560 (μ S.m⁻¹). U vzorků připravených z jádra L8 43,2 10 a 11 má elektrická konduktivita při frekvenci 1000 Hz ve směru foliace hodnoty 8,950 (μ S.m⁻¹), ve směru kolmém pak 3,965 (μ S.m⁻¹).

2.5.5.3 Magnetická anizotropie (AMS) vzorků z L7 85,8 m a L8 43,2 m

2.5.5.3.1 Metodika měření AMS

Byly měřeny válcové vzorky určené pro měření jiných fyzikálních vlastností hornin. Cílem bylo zjistit, jak jsou tyto vzorky orientovány vhledem 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 representována symetrickým tenzorem druhého řádu, který ve svém tvaru odráží přednostní orientaci magnetických minerálů v hornině, a tedy magnetickou vnitřní stavbu horniny. Tato representace, ač matematicky velmi výhodná, je však nenázorná a není užívána v geofyzikálních a geologických interpretacích. Místo tenzorového vyjádření se užívá tzv. geometrické representace, 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

$$P = k1/k3 \tag{2}$$

$$T = 2 \ln (k2/k3) / \ln (k1/k3) - 1,$$
(3)

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 presentovat 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

$$L = k1/k2 \tag{4}$$

$$F = k2/k3 \tag{5}$$

$$U = (2k2 - k1 - k3)/(k1 - k3)$$
(6)

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

$$Km = (k1 + k2 + k3)$$
 (7)

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. <u>Střední susceptibilita měřených vzorků je relativně vysoká, kolísá od 1 × 10⁻³ do 7,3 × 10⁻³ [j.Sl] a může se mírně lišit od susceptibilit prezentovaných výše a měřených v jednom směru.</u>

2.5.5.3.2 Vyhodnocení AMS

Vyhodnocení výsledků stanovení AMS je znázorněno na Obr. 56. I když specializované studium magnetických minerálů nebylo provedeno, můžeme z výše uvedených hodnot soudit, že susceptibilita studovaných vzorků je zčásti nesena paramagnetickými (tmavé silikáty) a zčásti (snad převážné) feromagnetickými minerály (pravděpodobně magnetit). Takovéto hodnoty susceptibility jsou charakteristické pro některé granitoidní horniny a některé ortometamorfity. Stupeň anizotropie je též poměrně vysoký a relativně stabilní, kolísá od 1,3 po 1,8 a se stoupající susceptibilitou se mírně zvyšuje. I to naznačuje, že AMS studovaných vzorků je nesena tmavými silikáty a pravděpodobně magnetitem. Magnetická vnitřní stavba kolísá od téměř dokonale lineárně-planární (vzorky 9 a 11) po středně planární (ostatní vzorky). Orientace magnetické foliace a lineace je presentována v souřadné soustavě vzorku (osa válce leží ve středu plochojevné projekce). Póly magnetické foliace vzorků 1, 5, 6 a 11 jsou dobře rovnoběžné s osou válcového vzorku, což svědčí o tom, že válce byly vyvrtány kolmo na horninovou foliaci. V případě vzorku 9 je pól magnetické foliace sice také blízký ose válce, ale přece jen se od ní významně odchyluje, asi o 30°. U vzorku 7 je pól magnetické foliace kolmý na osu válce (válec je vyvrtaný rovnoběžně s horninovou foliací). Magnetická lineace je podle definice AMS elipsoidu kolmá na pól magnetické foliace a je přibližně stejně
orientovaná u vzorků 1, 5, 6 a přibližně kolmo na ně u vzorků 9 a 11. U vzorku 7 je magnetická lineace blízká ose válce.



Obr. 56 Magnetická anizotropie vzorků z L7 85,8 m a L8 43,2 m

2.5.5.4 Závěr

Ke stanovení petrofyzikálních parametrů byly v etapě prací 2021 dodány jádra označená jako L7 (16962) a L8 43,2. Vzorky byly dodány jednak jako jádra o průměru ca 48 mm a dva kusové vzorky, bez bližšího petrografického určení. Vzorky jsou předběžně klasifikovány jako biotit amfibolické pararuly slabě migmatitizované. Bylo požadováno stanovení hustotních parametrů (objemová a mineralogická hustota a pórovitost), dále magnetické susceptibility, elektrické konduktivity, radioaktivity a anizotropie magnetické susceptibility.

Z naměřených výsledků vyplývají některé závěry, které však platí jen pro dodané a námi měřené horniny z L7 (16962) a L8 43,2. Pro přesnější charakteristiku by bylo nutné odebrat více vzorků v sériích dopředu petrograficky blíže specifikovaných.

Horniny z L7 (16962) jsou fyzikálně odlišné od lokality L8 43,2 a 2 jádra dodaná z lokality L8 43,2 jsou fyzikálně odlišná mezi sebou. Vzorky se liší jak v látkových parametrech (hustotní parametry, magnetická susceptibilita, radioaktivita), tak i v hodnotách elektrické konduktivity. V obecné rovině vzorky z lokality 16962 vykazují vyšší hodnoty mineralogických hustot (kolem 2,9 g.cm⁻³) a vyšší hodnoty magnetické susceptibility (v tisících j.Sl 10⁻⁶). Vzorky z této lokality mají nízkou radioaktivitu ve všech parametrech a vyšší hodnoty elektrické konduktivity než vzorky z lokality L8 43,2. Souvislosti je nutno hledat v přítomnosti rudních minerálů a dalších akcesorií a petrografickém složení hornin. Dvě jádra z lokality L8 43,2 jsou fyzikálně i petrograficky (makroskopický vzhled) odlišná (viz popis výše).

<u>Anizotropie magnetické susceptibility AMS studovaných vzorků je nesena tmavými silikáty a pravděpodobně magnetitem</u>. Magnetická vnitřní stavba kolísá od téměř dokonale lineárně – planární (vzorky 9 a 11) po středně planární (ostatní vzorky). Póly magnetické foliace vzorků jsou dobře rovnoběžné s osou válcového vzorku, což svědčí o tom, že válce byly vyvrtány kolmo na horninovou foliaci. Dokladem této magnetické stavby je i vzorek 9, který byl odvrtán

pod úhlem ca 20 až 30° šikmo. Vzhledem k foliaci. Jeho pól magnetické foliace je blízký ose válce, ale přece jen se od ní významně odchyluje, asi o 30°, což souhlasí s pozicí foliace na tomto jádru. U vzorku 7 je pól magnetické foliace kolmý na osu válce (válec je vyvrtaný rovnoběžně s horninovou foliací). Magnetická lineace je podle definice AMS elipsoidu kolmá na pól magnetické foliace a je přibližně stejně orientovaná u vzorků 1, 5, 6 a přibližně kolmo na ně u vzorků 9 a 11. U vzorku 7 je magnetická lineace blízká ose válce.

Pro identifikaci nositelů magnetizace by bylo vhodné měření doplnit termomagnetickou analýzou. V každém případě podrobný petrografický výzkum vzorků by byl vhodný, zejména pro upřesnění akcesorií (granát??, rudní minerály apod.), které mohou významně ovlivňovat hodnoty stanovených parametrů.

Stanovení rovnováhy mezi uranem a radiem, posuzované podle poměru U/eU 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. 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 vzorků z L7 85,8 m (16962) a L8 43,2 m nebyla radioaktivní nerovnováha prokázána.

2.6 Geofyzikální charakterizace

Stěny dokončených laboratorních chodeb L7 a L8 byly po ukončení hornických prací a po vyklizení pracoviště sledovány a popsány souborem geofyzikálních metod. Účelem měření bylo hodnocení kvality horninového masivu HM v části blízké stěnám díla, jejíž znalost bude zohledněna při plánování pozice zkušebních komor. Součástí sledování je také posouzení prostorového rozsahu porušení HM vlivem trhacích prací – hloubkový dosah EDZ.

Princip použitých geofyzikálních metod, přístrojové vybavení a metodika měření jsou podrobně popsány v následujících dílčích podkapitolách. V každé doposud měřené chodbě byla realizována trojice průzkumných profilů vedených ve stěnách výrubu. Staničení profilů je zavedeno shodně ve smyslu se staničením hornického díla, tedy od ústí chodby (0 m) směrem k její čelbě (90 m). Všechny pozice snímačů (geofony a měřící elektrody s krokem 0,5 m) byly zaměřeny kombinací geodetického zaměření totální stanicí a fotogrammetrie v souřadném systému JTSK. Stranové označení jednotlivých profilů, použité v jejich názvu, je míněno ve smyslu pohledu do rostoucích staničení. Chodba L7 byla měřena v období května 2021, chodba L8 pak během srpna 2021.

2.6.1 Georadar

Princip georadarové metody je založen na vysílání vysokofrekvenčního elektromagnetického vlnění ve formě krátkého pulsu do prostředí a registraci časového průběhu vlnění přicházejících zpět do detekční části systému. Jedná se zejména o vlny odražené od výrazných nehomogenit - reflexních rozhraní. Obvykle používané frekvence vysílaného signálu se pohybují od desítek MHz do jednotek GHz. Hlavní frekvence generovaného signálu určuje rozlišovací schopnost měření (vyšší frekvence = vyšší rozlišení) a také jeho hloubkový dosah (nižší frekvence = vyšší hloubkový dosah). Měřící systém georadaru obvykle sestává z dvojice stíněných antén (vysílací a přijímací) a řídící jednotky, která kontroluje vysílání jednotlivých elektromagnetických pulzů a jejich registraci. Vysílací a přijímací antény se pohybují po sledovaném profilu, přičemž jejích vzájemná vzdálenost se nemění. Vysílací anténa emituje elektromagnetický pulz (nebo sérii pulzů) v pravidelných délkových intervalech, které jsou určeny spouštěcím zařízením (obvykle oedometrem na měřícím kolečku, v případě diskrétních měření ručně operátorem). Současně s tímto je provedena registrace signálu z přijímací antény, na každý vyslaný pulz či sérii pulzů připadá jedna registrovaná stopa (časový záznam signálu přijímače). Sestavením jednotlivých zaznamenaných tras vedle sebe vzniká profilový radarový časový řez.

Vlnový obraz je ovlivněn přítomností reflexních rozhraní, tato vznikají na rozhraní dvou prostředí s odlišnými elektromagnetickými vlastnostmi charakterizovanými vlnovými čísly. Vlnové číslo k je ovlivněno elektrickou vodivostí prostředí a jeho permitivitou. Odrazná rozhraní mohou vznikat na puklinách nebo foliačních plochách vyplněných vodou či potažených rudními minerály, v místech výrazněji rozevřených trhlin či drobných kaveren, na kontaktech vodivostně výrazně odlišných prostředí. Nehomogenity uvedeného charakteru způsobují v radarových časových řezech charakteristické změny v registrovaném signálu.

Pukliny a drobné trhliny v HM vzniklé v důsledku trhacích prací (EDZ) zvyšují pórovitost horniny a mění její elektromagnetické vlastnosti, zejména pokud jsou vyplněny vodivou kapalinou. Změny vlastnosti HM mohou být popsány na základě změn elektromagnetického signálu způsobených jeho disperzním chováním. Charakter signálu lze popsat na základě

spektrální analýzy provedené například pomocí STFT (Short Time Fourier Transformation; Irving a Knight 2003). Porovnání frekvenčních spekter pro různá prostředí z hlediska EDZ ukazuje obrázek Obr. 57.



Obr. 57 Porovnání frekvenčních spekter vypočtených pro případ mělké a hluboké EDZ při použití stejného časového okna (0 - 6 ns), podle Heikkinen et al.(2010).

2.6.1.1 Použité přístrojové vybavení, způsob měření, zpracování

Georadarové měření v obou laboratorních chodbách L7 a L8 bylo provedeno s využitím georadarové aparatury MALÅ GX (Ground eXplorer), výrobce Malå (Švédsko), které sestává z následujících komponent:

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

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

Každá stěna laboratorní chodby 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.



Obr. 58 Měření georadarem na stěně chodby L7

Krok měření (tedy vzdálenost mezi jednotlivými radarovými stopami) byl pro anténu 450 MHz zvolen 0,05 m, pro anténu 750 MHz pak 0,02 m. 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).

Zpracování naměřených radarových dat bylo provedeno v komplexním programovém prostředí ReflexW (Sandmeier Geophysical Research, Německo). Hlavní kroky základního zpracování byly následující:

- délkové vyrovnání záznamu;
- odstranění stejnosměrné složky (DC filter)
- odstranění velmi nízkých frekvencí (DEWOW);
- frekvenční filtrace;
- úprava zesílení;
- klouzavý průměr.

Pokročilé zpracování a analýza alternativně zahrnovaly následující procedury:

- dekonvoluce;
- migrace;
- F-t filtrace;
- STFT transformace.



Obr. 59 Příklad georadarového řezu pro měření s anténou 450 MHz (nahoře) a 700 MHz (dole), chodba L8 – levá stěna

2.6.2 ERT

Geoelektrické stejnosměrné odporové metody sledují horninové prostředí z hlediska změn měrného elektrického odporu, běžně jsou tyto metody nazývány ERT (Electrical Resistivity Tomography). Základní princip měření odporů zemního prostředí je dobře ilustrován na Obr. 60, který vysvětluje postup měření v metodě VES (vertikální elektrické sondování). Dvojicí proudových elektrod A, B je zaváděn do sledovaného prostředí proudový impuls, jehož odezva je měřena dvojicí potenčních elektrod M, N. V případě tzv. symetrických uspořádání vzdálenost proudových elektrod AB určuje hloubkový dosah měření, ten je kromě toho ovlivněn také elektrickými odporem sledovaného prostředí. Naměřená hodnota je přiřazena do pozice středového bodu mezi měřícími potenčními elektrodami M, N a k hloubce odpovídající vzdálenosti AB/x, kde hodnota x se pohybuje v rozmezí 2-5 (v závislosti na odporových vlastnostech prostředí). Pro jednu pozici profilového staničení takto získáváme několik naměřených hodnot přiřazených různým hloubkovým úrovním. Posunem celého měřícího uspořádání ve směru profilu je možné změřit obdobnou sadu bodů pro další pozice staničení. Pro tento systém měření je výhodné použití tzv. multielektrodových aparatur, kdy je současně zapojeno (uzemněno) několik desítek až stovek elektrod, z nichž jsou vybírány dvě proudové a dvě měřící elektrody, které určují aktuální měřící konfiguraci. Výběr elektrod a vlastní měření se obvykle děje automaticky podle přednastavených kritérií. Vzdálenost mezi elektrodami je u těchto aparatur většinou konstantní. Posun měřícího uspořádání po profilu se děje "rolováním", kdy skupina elektrod umístěná na nejnižších pozicích staničení je přesunuta na konec uspořádání do vyšších staničení. Princip měření multielektrodovou aparaturou je ilustrován na Obr. 61.



Obr. 60 Princip měření elektrických odporů v různých hloubkových úrovních v metodě VES, C1C2 označuje proudové elektrody (v textu AB), P1P2 označuje měřící elektrody (v textu MN). Zdroj: <u>www.guidelinegeo.com</u>

Získaný datový soubor obsahuje velký počet měření, kde každý bod je určen hodnotou zdánlivého měrného elektrického odporu a prostorovými souřadnicemi. Takto velkou sadu dat je možné zobrazit ve formě izoohmického odporového řezu a efektivně zpracovat iteračními metodami. Z naměřených dat je řešením obrácené úlohy vytvořen odporový model prostředí a pomocí přímé úlohy je vypočtena teoretická odezva takového prostředí. Takto získaný soubor "hypotetických" odporů je porovnán se skutečně naměřenými daty a podle zjištěné odchylky je upraven prvotní model rozložení měrných elektrických odporů v masívu tak, aby soubor vypočtených odporů lépe odpovídal skutečným měřeným hodnotám pro všechny použité kombinace rozestupů a poloh měřících a proudových elektrod. Tento postup je několikrát opakován (iterován), výsledkem je modelový odporový řez, který reprezentuje stav horninového prostředí. Podrobně je teorie uvedeného způsobu zpracování rozebrána například v publikaci Loke (2004).



Obr. 61 Schematické znázornění principu měření s mnohaelektrodovým kabelem, které je využíváno při měření ERT. Podle: www.guidelinegeo.com



Obr. 62 Závislost měrného elektrického odporu na litologickém typu (Loke 2004)

Modelový odporový řez může reflektovat litologické, petrografické či geomechanické změny. V případě prostředí, které je tvořeno metamorfovanými nezvětralými horninami, je jeho elektrický odpor závislý zejména na četnosti diskontinuit v daném prostředí, na stupni nasycení těchto mikroprostor kapalinou a na její vodivosti. Vliv může mít také lokální výskyt rudních minerálů či grafitu na foliačních nebo jiných plochách. Intenzivní rozpukání horniny očekáváme zejména jako důsledek hornické činnosti v těsném okolí budovaných laboratorních chodeb. Vlivem trhacích prací dochází k určité aktivaci foliačních ploch a k jejich rozevření, částečně vznikají i nové diskontinuity jako důsledek ražby. Elektrický odpor zastoupených hornin bez rozpukání (migmatit, pararula, amfibolit) se pohybuje ve vysokých hodnotách řádově vyšších tisíců až desetitisíců ohm.m. Přítomnost částečně otevřených puklin bez přítomnosti vodivé kapaliny v prostředí elektrický odpor ještě zvýší, to je ovšem obtížné identifikovat v rámci již

tak velmi vysokých odporů. Zvodnělé pukliny naopak měřené elektrické odpory sníží, intenzita poklesu bude záviset na stupni nasycení volných prostor, na měrném odporu kapaliny a na vzájemném propojení puklinové sítě. Podzemní vody v místě průzkumu jsou většinou vodivé díky velkému množství rozpuštěných látek, pokles elektrických odporů může být proto značný a dobře detekovatelný.

2.6.2.1 Použité přístrojové vybavení, způsob měření, zpracování

Geoelektrické odporové měření v laboratorních chodbách L7 a L8 bylo provedeno s využitím následujícího přístrojového vybavení:

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

Obr. 63 Provádění měření ERT v chodbě L7

Odporové měření proběhlo na stěnách obou laboratorních chodeb při použití vzdálenost mezi jednotlivými elektrodami 0,5 m. Z tohoto vyplývá minimální použitá vzdálenost proudových elektrod A, B 1,5 m. Maximální rozestup mezi elektrodami A, B, který byl při měření použit, činil 15 m při měření v chodbě L7, pro následné měření na stěně chodby L8 byl u jednoho z trojice profilů použit maximální rozestup 30 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.

Zpracování naměřeného souboru dat je realizováno programovým balíkem Res2DInv (GeoTomo Software, Malaysia). Obvyklé kroky při pracování jsou následující.

- základní editace dat, odstranění chybných měření;
- zavedení opravy pro měření v prostoru (přechod z geometrie 2π do geometrie 4π);
- implementace geometrických souřadnic do datového souboru;
- řešení inverzní úlohy získání modelového odporového řezu;
- export vypočteného řezu.

Grafická vizualizace profilového odporového řezu je pak provedena za pomocí programu Surfer (Golden Software, USA).

Obr. 64 Měření ERT – příklad modelového odporového řezu, chodba L8 – pravá stěna

2.6.3 Mělká refrakční seismika

Refrakční seismika analyzuje časy tzv. prvních nasazení, tedy nejnižší časy, ve kterých seismická vlna dorazí od zdroje k přijímači. Jako první překoná trasu mezi vysílačem a přijímačem přímá vlna (v oblasti malých vzdáleností od zdroje energie) nebo vlna čelná (dále od zdroje), označovaná také jako lomená či refragovaná. Klasické metody refrakční seismiky popisují zkoumané zemní prostředí jako vrstevnaté, kde každá vrstva je charakterizována svou mocností a rychlostí šíření seismických vln. Tento přístup má několik omezení, zejména pak v prostředí bez výrazných skokových změn seismických rychlostí nepřináší realistické výsledky. V těchto situacích, kdy se rychlostí mění spojitě (gradientově), je výhodnější zpracování metodou seismické refrakční tomografie. V tomto případě je na sledované prostředí nahlíženo jako na spojité (Azwin et al. 2013).

Pro účely výpočtu je prostředí reprezentováno sadou buněk, ve kterých je určena rychlost šíření seismických vln (Osypov 2001).

Metodami matematické inverze je hledán takový model prostředí (tedy přiřazení rychlostí šíření jednotlivým buňkám), jehož teoretická odezva nejlépe vystihuje měřená data. Volba malé (submetrové) vzdálenosti snímačů (krok geofonů) umožňuje detailní sledování horninového prostředí v blízkosti povrchu stěny laboratorní chodby (ovšem za cenu menšího hloubkového dosahu). Výsledkem průzkumných měření je rychlostní profilový řez, který zobrazuje rychlostní pole.

Rychlost šíření podélných seismických vln v hornině je závislá na jejím geomechanickém stavu. Přítomnost mechanického porušení (rozpukání) snižuje hodnoty rychlosti šíření seismických vln. Intenzitu porušení lze charakterizovat vzdáleností diskontinuit (v souladu s ČSN EN ISO 14689). Její vliv na změny seismických rychlostí je v daném prostředí významnější než změny v petrografii hornin. Výsledky průzkumu s využitím seismické

tomografie, který proběhl v prostoru horninového bloku na 12. patře před začátkem ražby, ukázaly, že seismické rychlosti v masivu mimo těsné okolí důlních chodeb se pohybují v rozmezí 5400–6300 m.s⁻¹.

V prostoru zóny EDZ očekáváme nejvýraznější změny detekovaného rychlostního obrazu. Obvykle je patrný gradient rychlostí, pokles gradientu ve směru od líce stěny do masivu pak ohraničuje zónu EDZ.

2.6.3.1 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 obou laboratorních chodeb v celé jejich délce, na pravém boku jeden profil, na levém boku pak dva profily. Vzdálenost mezi jednotlivými geofony (přijímači) byla zvolena 0,5 m, vzdálenost zdrojových bodů pak činila 1 m pro odpaly uvnitř linie snímačů, pro odpaly mimo linii (offset) pak 5–10 m.

Obr. 65 Měření seismické refrakční tomografie na stěně chodby L7

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

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

Pro lepší identifikaci hranice EDZ byl vypočten průběh gradientu rychlosti ve směru kolmém k ose x (osa chodby).

Grafická prezentace profilových rychlostních řezů je provedena v prostředí softwaru Surfer (Golden Software, USA).

Obr. 66 Přiklad seismického rychlostního řezu a zobrazení gradientu rychlostí (ve směru kolmo na osu x) – chodba L8 – pravý bok

2.6.4 Výsledky geofyzikálních měření v chodbě L7

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). Nejčastěji je hranice interpretována ve vzdálenosti 0,5–0,7 m od líce stěny, lokálně leží i ve větších vzdálenostech. Maximální zachycená vzdálenost je 1,0 m, a to v pravé stěně chodby v úseku staničení 36–40 m. Horninové prostředí je rozděleno na relativně kompaktní úseky, ve kterých je vzdálenost diskontinuit patrných ve stěně výrubu střední (600–200 mm) a na úseky mírně až středně porušené, kde je vzdálenost diskontinuit malá (200–60 mm). Tyto dvě oblasti jsou zobrazeny odlišným šrafováním. 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 přítomností zvodnělých puklin, charakterizovaných snížením elektrického odporu, a to i v úsecích mimo zvodnění popsané v rámci hydrogeologického sledování (vyznačeno v řezu také pomocí šrafování). Na pozadí řezu je zobrazen petrografický popis formou barevné

výplně a jsou také zakresleny pozice vybraných významných puklin (obojí převzato z výsledků strukturně geologického mapování).

Pravá stěna chodby L7 je podrobně zobrazena v Elektronická příloha 6 interpretovaný podélný profil je také uveden na obrázku Obr. 67. Rozdělení HM podle interpretovaného mechanického porušení je následující:

- 0–3,2 m HM porušený ražbou hlavního překopu;
- 3,2–15,3 m kompaktní hornina se střední vzdáleností diskontinuit, bez výplně vodou (vyšší elektrické odpory). Seismické rychlosti mimo oblast EDZ nad 6000 m.s⁻¹;
- 15,3–18,5 m úsek snížených seismických rychlostí ukazuje na vyšší rozpukání, vysoké elektrické odpory indikují otevřené pukliny bez vlhkosti;
- 18,5–24,0 m málo porušený HM;
- 24,0–25,2 m úzká zóna v okolí lokální poruchy (dle strukturně geologické dokumentace na staničení 25,5 m), zvýšení elektrických odporů spolu s nižšími seismickými rychlostmi ukazují na nezvodněné pukliny;
- 25,2–32,6 m úsek málo porušeného HM, snížení seismických rychlostí při líci stěny mizí se vzrůstající vzdáleností od stěny, elektrické odpory ukazují na nižší intenzitu rozpukání;
- 32,6–35,5 m úsek indikovaný výrazným poklesem elektrických odporů, rychlostní řez výrazně nižší rychlosti v těsné blízkosti stěny (výrazné projevy EDZ), hodnoty rychlostí ale rychle stoupají směrem do masivu. Předpokládáme přítomnost zvodnělých puklin, které snižují elektrické odpory, rozpukání je také indikováno georadarem;
- 35,5–39,8 m HM je v tomto intervalu málo narušený, hustota diskontinuit střední. Patrná je v rychlostním řezu mírně zvýšená mocnost EDZ;
- 39,8–43,2 m oblast výraznějšího rozpukání, vzdálenost diskontinuit malá. Vyšší hodnoty elektrických odporů ukazují na pukliny bez vlhkosti, na vyšší intenzitu rozpukání ukazují také snížené seismické rychlosti;
- 43,2–47,5 m oblast s málo intenzivním porušením HM, seismické rychlosti vyšší, elektrické odpory bez anomálií;
- 47,5–51,4 m úsek s výskytem vody v HM, odporový řez ukazuje úzké anomálie, které indikují lokální zvodnělé pukliny. Projevy zvodnělých puklin jsou také patrné na georadaru. S ohledem na vyšší seismické rychlosti je vzdálenost diskontinuit v HM střední;
- 51,4–52,9 m krátký úsek málo porušeného HM;
- 52,9–62,3 m širší úsek s indikacemi vyššího porušení HM, vzdálenost puklin je v této části malá, tomu odpovídají snížené seismické rychlosti. Nízké elektrické odpory v úseku mezi metrážemi 55–58 m ukazují na přítomnost zvodnění v puklinách. V úseku 58,0–52,0 m jsou odpory naopak zvýšené, což indikuje suché prostředí;
- 62,3–74,7 m v této části je HM málo narušený, vyšší hodnoty elektrických odporů ukazují na prostředí bez podzemní vody v puklinách. Podle vyšších seismických rychlostí se jedná o prostředí se střední vzdáleností diskontinuit;
- 74,7–82,0 m úsek s nižšími hodnotami seismických rychlostí, HM je zde porušený, vzdálenost diskontinuit malá. Vyšší hodnoty elektrických odporů v části mezi metrážemi 74,7–79,0 m ukazují na pukliny bez vlhkosti, pokles odporů v okolí metráže 80,0 naopak indikuje možné lokální zvodnění, v okolí metráže 80 je také patrná anomálie v radarovém řezu;

 82,0–90,0 m – málo porušený HM v konci chodby, vyšší seismické rychlosti indikují střední vzdálenost diskontinuit, pukliny dle elektrických odporů suché.

Obr. 67 Interpretovaný podélný profil v pravé a levé stěně chodby L7

Elektronická příloha 7 zobrazuje interpretovaný řez levou stěnou chodby L7, interpretovaný podélný profil je na obrázku Obr. 67. Popis stavu HM v levé stěně je následující:

- 0–5,3 m porušení HM, intenzivní rozpukání vlivem ražby v blízkosti hlavní chodby.
 Ve staničení 5 ukazují snížené elektrické odpory na vyšší vlhkost puklin;
- 5,3–13,8 m vyšší hodnoty seismických rychlostí indikují málo narušený HM, se střední vzdáleností diskontinuit;
- 13,8–18,1 m interval více narušeného HM, nízké seismické rychlosti ukazují na malou vzdálenost diskontinuit, s ohledem na spíše vyšší hodnoty elektrických odporů jsou pukliny v HM bez vodivé výplně;
- 18,1–23,0 m úsek bez známek intenzivnějšího narušení HM. Vyšší seismické rychlosti indikují střední vzdálenost diskontinuit;
- 23,0–24,9 m krátký porušený úsek, pokles seismických rychlostí ukazuje na vyšší intenzitu rozpukání, podle odporového řezu jsou pukliny suché;
- 24,9–41,7 m úsek interpretovaný jako méně porušený HM, zejména s ohledem na charakter rychlostního řezu (spíše vyšší seismické rychlosti). Snížení elektrických odporů v okolí staničení 28 m indikuje vyšší nasycení puklin vodou;
- 41,7–49,0 m indikace intenzivněji porušeného HM v rychlostním řezu oblast snížených seismických rychlostí. Úzké anomálie v odporovém řezu ve staničení 46,5– 47, 5 m (horní i dolní profil) ukazují na zvodnělé pukliny v HM.
- 49,0–53,2 m část HM s projevy mírného porušení, spíše vyšší seismické rychlosti ukazují na střední vzdálenost diskontinuit;

- 53,2–58,7 m oslabený úsek HM, pokles seismických rychlostí indikuje malou vzdálenost diskontinuit, indikace v odporovém řezu při okraji úseku (staničení 53,2–54,0 m) ukazuje na přítomnost zvodnění v puklinách;
- 58,7–65,4 m část HM s málo intenzivním porušením, vyšší seismické rychlosti ukazují na střední vzdálenost puklin. Snížení elektrických odporů v okolí staničení 61,5 m indikuje vyšší vlhkost puklin;
- 65,4–68,1 m oblast charakterizovaná výrazným snížením seismických rychlostí, vyšší intenzita porušení s malou vzdáleností diskontinuit. V odporovém řezu bez anomálií, pukliny suché;
- 68,1–75,1 m úsek s indikacemi málo intenzivního porušení HM, vyšší seismické rychlosti ukazují na střední vzdálenost diskontinuit;
- 75,1–78,3 m intenzivněji porušená část HM, pokles hodnot seismických rychlostí ukazuje na malou vzdálenost diskontinuit, v odporovém řezu je patrný částečný pokles hodnot, který patrně indikuje vyšší vlhkost puklin;
- 78,3–90,0 m interval HM s malým porušením, vyšší hodnoty seismických rychlostí ukazují na kompaktní horninu, podle elektrických odporů jsou pukliny suché.

2.6.5 Výsledky geofyzikálních měření v chodbě L8

Obdobně jako v případě chodby L7 je i v tomto případě provedena společná interpretace výsledků geofyzikálních měření, která je graficky prezentována ve formě podélného profilového řezu. V interpretačním řezu je vyznačen průběh hranice EDZ, sestavený zejména podle průběhu gradientu seismických rychlostí a s přihlédnutím k radarovému měření. Obvyklé vzdálenosti hranice porušení od líce stěny se pohybují v rozmezí 0,5-0,7 m. Maximální dosah EDZ je zachycen v pravé stěně chodby v úseku metráží 32-36 m a pohybuje se kolem 1,2 m. V levém boku lze sledovat lokální nárůst mocností EDZ k hodnotám kolem 1,0 m v intervalech staničení 50–53 m a 67–76 m. Horninové prostředí je rozděleno na málo porušené úseky, ve kterých je vzdálenost diskontinuit střední (600-200 mm) a na oblasti mírně až středně porušené, kde je vzdálenost diskontinuit malá (200-60 mm). Tyto úseky jsou zobrazeny odlišným šrafováním. Členění horninového masivu bylo provedeno s využitím výsledků seismických refrakčních měření (rychlostní řez) a výsledků geoelektrického odporového profilového řezu získaného měřením metodou ERT s přihlédnutím k výsledkům georadaru. Výsledky odporových měření byly také použity pro vyhledání poloh s možnou přítomností zvodnělých puklin, charakterizovaných snížením elektrického odporu, a to i v úsecích mimo zvodnění popsané v rámci hydrogeologického monitorování (vyznačeno v řezu také pomocí šrafování). Barevný podklad řezu zobrazuje petrografický popis převzatý ze strukturního mapování, podle stejných podkladů jsou také zakresleny pozice vybraných významných puklin.

Grafická příloha pro pravou stěnu chodby L8 je označena jako Elektronická příloha 8. Část přílohy s interpretačním podélným profilem je součástí Obr. 68. Rozdělení HM podle interpretovaného mechanického porušení je následující:

- 0–15,2 m úvodní úsek stoky je hodnot seismických rychlostí více porušený rozpukáním. Vyšší hodnoty elektrických odporů v úseku mezi staničením 5–15 m ukazují na pukliny bez vlhkosti;
- 15,2–21,3 m interval málo porušeného HM, podle seismických rychlostí vzdálenost diskontinuit střední;

- 21,3–26,0 m úsek s intenzivnějším porušením HM v okolí významnější pukliny určené strukturním mapováním. S ohledem na nižší seismické rychlosti malá vzdálenost diskontinuit;
- 26,0–42,0 m část stěny se známkami málo intenzivního oslabení HM, podle charakteru seismického rychlostního řezu lze vzdálenost diskontinuit popsat jako střední. V okolí staničení 35 m je patrný pokles elektrických odporů v místě významnější pukliny (identifikované při strukturním mapování), očekáváme vyplnění volného mikroprostoru vodivou kapalinou. Zvodnělá struktura je dobře patrná také na radarovém řezu. V okolí pukliny lze také sledovat vyšší hloubkový dosah EDZ do 1,2 m;
- 42,0–45,0 m indikace více rozpukaného HM, pokles seismických rychlostí a změny v odporovém řezu ukazují na malou vzdálenost diskontinuit, které mají vyšší vlhkost. Změna vodivosti vlivem nárůstu vlhkosti je dobře patrná v radarovém řezu ve staničení 42–45 m;
- 45,0–54,1 m úsek stěny bez známek výrazného rozpukání, vyšší hodnoty elektrických odporů ukazují na pukliny bez vodivé výplně. Vzdálenost diskontinuit je dle seismického řezu střední;
- 54,1–60,0 m oslabený HM v této části chodby, výraznější rozpukání horniny, podle průběhu hodnot elektrických odporů jsou pukliny nasycené vodou (v místě také dokumentován přítok podle hydrogeologického monitorování). Pokles seismických rychlostí indikuje malou vzdálenost diskontinuit;
- 60,0–66,2 m interval málo narušeného HM, vyšší hodnoty elektrických odporů ukazují na pukliny bez vodivé výplně, podle seismického řezu je vzdálenost diskontinuit střední;
- 66,2–72,1 m úsek s indikacemi intenzivnějšího oslabení HM, pokles elektrických odporů podle ERT indikuje zvodnění v puklinách, snížení úrovně seismických rychlostí ukazuje na malou vzdálenost diskontinuit v tomto úseku;
- 72,1–90,0 m oblast málo porušeného HM, vyšší hodnoty elektrických odporů ukazují na pukliny bez přítomnosti vody, pouze v okolí metráže 87–88 m je patrný pokles odporů v místě průsaku zachyceného i hydrogeologickým sledováním. Úsek staničení 84–87 m je anomální také v radarovém řezu (indikace zvodnělých puklin). Podle seismického řezu je vzdálenost puklin střední.

Obr. 68 Interpretovaný podélný profil v pravé a levé stěně chodby L8

Popis výsledků geofyzikálních měření na levé stěně chodby L8 je součástí Elektronická příloha 9 a Obr. 68. Rozdělení HM podle intenzity porušení je následující:

- 0–3,0 m narušený HM v úvodní části chodby v blízkosti křížení s hlavním překopem, intenzivní rozpukání;
- 3,0–9,8 m úsek kompaktního HM s malým porušením puklinami, střední vzdálenost mezi diskontinuitami. Podle vyšších hodnot elektrických odporů jsou pukliny suché;
- 9,8–15,0 m rozpukaný HM v okolí významnější pukliny popsané strukturně geologickým mapováním ve staničení 10,5 m. Indikace snížených seismických rychlostí ukazuje na malou vzdálenost diskontinuit. Podle odporového řezu jsou pukliny suché;
- 15,0–38,1 m interval málo porušeného bloku HM se střední vzdáleností diskontinuit. V okolí staničení 21 m je v odporovém řezu patrná indikace s nižšími hodnotami elektrických odporů. To je interpretováno jako lokální puklina vyplněná vodou. V seismickém řezu je odezva této pukliny také patrná, ale jen do vzdálenosti cca 1,5 m od líce stěny. Podobná lokální indikace zvodnění v puklinách je zachycena v okolí metráže 34 m. Obě struktury jsou patrné také v radarových řezech;
- 38,1–41,2 m oblast snížených seismických rychlostí, vzdálenost diskontinuit malá. S ohledem na vyšší elektrické odpory pukliny bez výplně;
- 41,2–47,8 m úsek bez známek intenzivnějšího rozpukání HM. Vyšší seismické rychlosti ukazují na střední vzdálenost diskontinuit, elektrické odpory jsou také spíše vyšší, v okolí metráže 45 m je patrný pokles hodnot odporů, spolu s radarovou indikací se jedná o projev zvodnělých puklin;
- 47,8–57,0 m interval staničení s indikacemi intenzivnějšího rozpukání HM, indikovaný poklesem seismických rychlostí i hodnotami elektrických odporů

ve výsledcích ERT. V okolí staničení 54.5 m ukazují snížené elektrické odpory a georadarové indikace na nasycení puklin vodou;

- 57,0–80,5 m úsek chodby s indikacemi méně intenzivního porušení HM, zejména podle seismického rychlostního řezu, vzdálenost diskontinuit je střední. Snížené odpory v modelovém řezu podle ERT a indikace z georadaru ukazují na přítomnost zvodnělých puklin v okolí metráží 61 a 65 m;
- 80,5–90,0 m indikace výrazněji rozpukané horniny v konci chodby. Indikace vysokých elektrických odporů v úseku 80,5–83,5 ukazuje na pukliny bez zvodnění. V okolí staničení 87,5 je dokumentovaný průsak do chodby, na odporovém řezu leží tento prostor mimo pokrytí. Vzdálenost diskontinuit v této části je převážně malá.

2.7 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 vrtnému schématu. Měření účinků trhacích prací probíhá formou sledování rychlosti kmitání pomocí třísložkových snímačů – geofonů. Popis seismického eventu je prezentován ve formě maximální rychlosti kmitání z každého odstřelu i z každé dílčí nálože na časový stupeň a hodnotě frekvence nesoucí maximální kmit 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. Frekvenční spektrum seismického záznamu, zachycené v určité vzdálenosti od místa trhací práce, je významnou měrou ovlivněno prostředím, kterým se vlny šíří. 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 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, zabírka 2 m max):

Profil (m²)	Perunit E (kg)	Bleskovice 100 (m)	Rozbuška (ks)
14,8	75	105	104

2.7.1 Měření seismických účinků trhacích prací

Sledování seismických účinků trhacích probíhá s využitím následujícího technického vybavení:

- průmyslový počítač TANK 870 (Intel® Core i7-6700TE 2.4GHz, 4GB RAM, výrobce iEi Integration Corp., Tchaj-wan);
- A/D převodníková karta PCI-6255 série M, 40 kanálů diferenciálně, 750 kS/s (výrobce National Instruments, USA);
- třísložkové snímače rychlosti kmitání osazené snímacími elementy SM6 (výrobce Sensor, Holandsko).

Základní nastavení režimu záznamové aparatury jsou vzorkovací frekvence 10 000 Hz a délka záznamu 10 s. Spuštění měřící aparatury je řízeno koincidencí seismického signálu na třech snímačích s překročením hodnoty rychlosti kmitání 2,5 mm.s⁻¹.

Blokové schéma měřící a registrační linky je ilustrováno na Obr. 69.

Obr. 69 Blokové schéma měřící linky

Třísložkové seismické snímače (geofony) byly instalované v pozicích dle zadání ve východní stěně dopravního ochozu PŠ1-123 v pozicích mezi jednotlivými raženými chodbami (snímače 1–4, od března 2021) a od srpna 2021 také na konci laboratorních chodeb L7 (snímač 5) a L8 (snímač 6). Pozice snímačů vychází z návrhu SÚRAO. Snímače jsou umístěny do mělkých vývrtů ve skalním masivu, pouzdro snímače je k masivu pevně fixováno pomocí vinylesterové pryskyřice. Měřícími elementy ve snímačích jsou geofony SENSOR SM6 s vlastní frekvencí 4,5 Hz. Jedná se o indukční snímače, kdy pohybem cívky v poli permanentního magnetu vzniká elektrické napětí přímo úměrné rychlosti kmitání tělesa cívky. V každém snímači jsou umístěny tři měřící elementy, jeden ve vertikálním směru (odpovídá kanálu 1) a dva horizontální (podélná složka na kanálu 2 je orientována dle možností ve směru osy laboratorních chodeb, příčná složka odpovídá kanálu 3 a je orientována kolmo k podélné). Citlivost snímačů je 28,8 V/m/s⁻¹. Vzorkovací frekvence pro převod analogového napětí do digitální formy byla po úvodních měřeních upravena na 35 kHz.

Pozice snímačů byla geodeticky zaměřena, včetně směru podélné osy, který je dán spojnicí dvou bodů (Tab. 27):

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

Tab. 27 Pozice seismických snímačů

Pozice 1 odpovídá snímači ve stěně, pozice 2 pak průmětu osy snímače na stěnu protější strany chodby.

Obr. 70 Umístění snímačů pro monitorování seismických účinků trhacích prací

Měření probíhá v kontinuálním režimu. Měřící aparatura, do které jsou kabeláží svedeny analogové signály ze všech snímačů, je umístěna v místě dle zákresu na Obr. 70. Průmyslový počítač osazený A/D převodníkovou deskou National Instruments je umístěn v oceloplechové skříni. Provoz systému je jištěn záložním zdrojem a automatickým restartem počítače při výpadku proudu. Spouštění aparatury k registraci jednotlivých záznamů z trhacích prací je prováděno na základě koincidence eventů v shodném časovém úseku na jednotlivých snímačích při překročení prahové amplitudy rychlosti kmitání (2,5 mm.s⁻¹). Měřící zařízení je

průběžně kontrolováno cca 1 krát za 14 dní, sběr naměřených dat probíhá v ručním režimu v rámci kontroly.

Obr. 71 Měřící počítač TANK 870

2.7.2 Vyhodnocení záznamů seismických účinků trhacích prací

Všechny seismické záznamy jsou ukládány v naměřeném formátu (*.mio, standardní formát předního výrobce A/D měřících karet). Záznamy jsou průběžně vyhodnocovány, to představuje vyhodnocení maximální hodnoty rychlosti kmitání s odpovídající frekvencí seismické odezvy. Tyto hodnoty jsou vyčísleny pro:

- každou zaznamenanou složku snímače,
- pro každý časový stupeň jednotlivého odstřelu v každé složce,
- pro každou zaznamenanou složku snímače s omezením horní frekvencí 2000 Hz,
- pro každý 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 Obr. 72. Kompletní tabulka je součástí Elektronická příloha 10. 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, 1 odstřel trvá cca 2–2,5 s. Příklad souhrnného seismogramu je na Obr. 73;

- 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 na vypočtené prostorové rychlosti. Příklad tohoto výstupu je včetně detailního popisu uveden na Obr. 74;
- Grafy maximálních rychlostí kmitání pro skupinu událostí (odstřelů) zobrazují logický celek sestavený z několika dílčích záznamů. Pro záznamy odpalů na čelbách v jedné chodbě jsou zobrazeny úrovně pro jednotlivé snímače (příklad pro chodbu L5 je na Obr. 75) a také souhrnně prostorové rychlosti pro všech 6 snímačů (ilustrační graf pro chodbu L5 je na Obr. 76). Grafická prezentace výsledků je náplní Elektronická příloha 11.

Záznam	datum a čas	chodba	staničení		S	1	S	2	S	3	S	4	S	5	S	6
					V max	fmax										
Bukov086	27.08.2021	L5	34.60	1	3.7	1000	15.9	1296	49	1667	21.8	745	1.4	1750	1.2	1061
	16:32:17	L5	34.60	2	7.3	778	17.3	1296	34.8	921	19	593	1.8	574	1.3	1842
		L5	34.60	3	9	1346	22.6	1522	49.5	673	32	921	1.7	1129	2.4	700
		L5	34.60	P	11.3	1207	27.6	1522	57.5	686	33.6	921	2.2	1207	2.5	729
Bukov087	27.08.2021	V78	7.80	1	18.3	1842	9.4	2059	5.8	1167	2.2	556	173.6	1400	27.6	921
	18:24:10	V78	7.80	2	9.7	1250	4.6	946	5.1	1667	3.8	1061	111.8	1167	19.6	1842
		V78	7.80	3	16.8	1750	12.1	1667	6.2	946	5.7	1129	84.6	1400	30.7	1842
		V78	7.80	P	18.6	2059	12.7	1667	8.1	636	6.9	1094	177.4	1400	33.3	2059
Bukov088	31.08.2021	L5	36.20	1	3	1346	11.4	1029	31.4	921	22	1029	1.5	1944	1	796
	2:54:57	L5	36.20	2	4.1	1029	10	1029	22.3	946	17.5	778	1.5	1400	0.99	673
		L5	36.20	3	5.1	1000	16.8	1842	24.1	761	35.4	1250	1.7	1522	1.2	714
		L5	36.20	P	6.5	1061	19.4	1458	32.4	833	35.6	1250	1.8	1061	1.3	1346
Bukov089	01.09.2021	V78	9.20	1	18.7	1750	9.6	2059	7.1	946	2.3	1000	173.6	1458	13.3	1667
	1:09:54	V78	9.20	2	11.2	700	4.7	1667	4.6	1458	2.6	1094	92.7	1296	11.3	1842
		V78	9.20	3	18.4	1667	11.4	1842	5.8	875	4	1129	85.1	1522	14.3	1129
		V78	9.20	P	19.4	1842	12.3	1842	7.5	1167	4.7	1029	176.7	1522	14.8	972
Bukov090	01.09.2021	V78	10.20	1	30.7	1667	8.3	1944	9.1	921	2.3	761	173.6	1591	24.7	1029
	18:30:25	V78	10.20	2	19.4	1207	6	1296	5.3	1346	3.7	1029	79.5	972	17.8	1944
		V78	10.20	3	23.1	1750	13.1	1522	6.8	875	5.8	1129	116.2	1522	26.4	1591
		V78	10.20	Р	37.1	1250	14.1	1591	11	1400	6.9	1094	196.7	1591	27	1207

Obr. 72 Ukázka vyhodnocení seismických záznamů účinků trhacích prací (Vmax - maximální rychlost kmitání, fmax - frekvence kmitání nesoucí maximální rychlost, 1 - vertikální složka, 2 - horizontální složka podélná, 3 - horizontální složka příčná, P - prostorová složka)

Obr. 73 Ukázka souhrnného seismogramu pro číslo měření 92 pro TP na čelbě větrací chodby V78 ve staničení 12,6 m

Obr. 74 Ukázka vyhodnoceného seismogramu pro číslo měření 92 na snímači č.6 pro TP na čelbě větrací chodby V78 ve staničení 12,6 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 V1xH1xH2). V levé části jsou odečtené hodnoty maximálního zákmitu, ve střední části je okno s časovým průběhem rychlosti a vpravo frekvenční spektrum

Obr. 75 Hodnoty rychlostí kmitání na snímači 1 pro jednotlivé složky kmitání (vertikální, podélnou H1 a příčnou H2) při odpalech v chodbě L5

Obr. 76 Hodnoty prostorových rychlostí kmitání měřené na snímačích 1 - 6 pro odpaly v chodbě L5

Měřící systém je koncipován tak, že pro každý odstřel je odlišná vzdálenost mezi místem odstřelu a registračním snímačem. Velikosti dílčích náloží se mění ve velmi malém rozmezí a na registrovanou odezvu by neměly mít vliv. Z Obr. 76 je patrné, že na regulérní přenos se snižováním amplitudy se vzdáleností je patrný na snímačích S3 a S6. Na snímači S1 a S5 je registrovaná odezva prakticky konstantní, na snímači S2 dochází dokonce k mírnému nárůstu amplitudy se vzdáleností.

2.8 Systém klasifikace horninových bloků - rešerše

2.8.1 Konvenční klasifikační systémy

Klasifikační systémy jsou používány k určení způsobu zabezpečení výrubu a nepracují s požadovanou dlouhodobou bezpečností uložiště (mnoho bezpečnostních aspektů však koreluje s těmi inženýrskými). Dále jsou tyto hodnotící stupnice převážně používány pro mělce uložené tunely, kdežto uložiště radioaktivního odpadu jsou navrhovány v hloubkách dosahujících stovek metrů. Klasifikační systémy nezohledňují požadovanou vzdálenost podzemního díla od poruchových zón ani křížení díla s puklinami.

Konvenční klasifikační systémy lze rozdělit na popisné (RG system a Posiva systém) a na numerické (Q system, Q modifikovaný, RMR, QTS).

2.8.1.1 RG-system (Finnish engineering geological classification system)

Klasifikační systém hodnotí horninový masív podle parametrů kvality horniny (e-q) a podle rozpadavosti horniny (5-7):

- a) stupeň zvětrávání (4 třídy),
- b) struktury (3 třídy),
- c) převažující velikost zrn (4 třídy),
- d) horninotvorných minerálů (7 tříd),
- e) typ rozpadu (4 typy),
- f) četnost puklin (4 třídy),
- g) charakter puklin (3 skupiny s podskupinami).

Klasifikační systém je používán pro sjednocení popisu charakteru hornin v různých lokalitách.

2.8.1.2 Klasifikace horninového masívu použitá na lokalitách Posiva

Pro klasifikaci na těchto lokalitách byl použit Q-systém, místy však byly hodnoceny i následující parametry:

- a) "strength/stress ratio";
- b) četnost puklin, napětí na puklinách ("frictional properties"), hydrogeologické vlastnosti (vodivost, "water ingres", "grouting properties"), strukturní charakteristika horniny v poruchových zónách;
- c) obsah chloridů v podzemní vodě, rozevření puklin, stupeň zvětrávání.

2.8.1.3 Q-systém (Barton 1974)

Klasifikační systém hodnotí horninový masív podle parametrů:

- a) RQD (rozsah 10-100),
- b) počet puklin Jn (rozsah 0,5–20),
- c) charakter puklin (drsnost) Jr (rozsah 0,5-4),

- d) charakter stěn puklin (výplň) Ja (rozsah 0,75–20),
- e) vliv podzemní vody Jw (rozsah 0,05–1,0),
- f) napjatostní poměry masívu (SRF) (rozsah 0,5–400),

Jednotlivým parametrům jsou pro různé nabývané hodnoty/stavy přiřazeny body. Výsledné numerické hodnocení je stanoveno podle vztahu:

$$Q = \frac{RQD}{Jn} * \frac{Jr}{Ja} * \frac{Jw}{SRF}$$

Rozsah výsledného hodnocení je mezi hodnotami 0,001 až 1000. V případě hodnocení horninového masívu 10–40 body se jedná o horninu třídy B – dobrou.

2.8.1.4 Q` – modifikovaný Q (Grimstad a Barton 1993)

Jedná se o výše uvedený vzorec redukovaný o poslední člen Jw/SRF. Tento člen se redukuje vzhledem k problematičnosti stanovení hodnoty napjatostního poměru masívu SRF.

2.8.1.5 RMR (Bieniawsky 1989)

Klasifikační systém hodnotí horninový masív podle těchto parametrů:

- a) pevnost v prostém tlaku;
- b) RQD;
- c) vzdálenost puklin;
- d) charakter diskontinuit (výplň);
- e) vliv podzemní vody;
- f) orientace diskontinuit vzhledem k ražbě.

Jednotlivým parametrům jsou pro různé nabývané hodnoty/stavy přiřazeny body. Jednotlivé přiřazené body jsou sečteny (parametry 1 až 5) a následně redukovány podle orientace diskontinuit vzhledem k probíhajícímu směru ražby (parametr 5). Podle hodnocení RMR je možné horninu hodnotit v rozsahu 0–100 bodů. Horniny s 61–80 body jsou zatřiďovány do kvalitativní skupiny II – dobrá.

2.8.1.6 QTS (Tesař 1990)

Klasifikační systém hodnotí horninový masív podle těchto parametrů:

- a) pevnost v prostém tlaku Tsa;
- b) vzdálenost diskontinuit TSb;
- c) rozevření diskontinuit TSc;
- d) orientace diskontinuit vzhledem k ražbě α;
- e) charakter diskontinuit (výplň, ϕ) β ;
- f) přítok vody γ , σ .

2.8.2 Host Rock Classification (HRC; Hagros 2006)

Systém klasifikace horninového masívu z hlediska ukládání radioaktivního materiálu do horninového prostředí vypracovaný Hagros (2006) byl vyvinutý a testovaný v prostředí Skandinávie. Skandinávie z hlediska regionální geologie představuje prostředí prekambrického štítu, který je významně ovlivněn kvartérním odlehčením vlivem ústupu ledovců. Parametr "strength/stress ratio", který je v klasifikaci použit, bude v českém prostředí výrazně odlišný. Další skandinávské specifikum je výskyt slaných podzemních vod, který se promítá do parametru chemického indexu podzemní vody (GCI).

Pro hodnocení míry agresivity prostředí je další důležitým údajem materiál, ze kterého budou vyrobeny obaly odpadu a materiál bariéry v okolí obalů odpadu (tedy na co nesmí být prostředí chemicky agresivní). V neposlední řadě vstupuje do hodnocení i samotná navrhovaná geometrie plánovaného úložiště vzhledem ke strukturním prvkům horninového masívu.

Systém HRC byl vyvinut pro prekambrické horniny pro uložení vyhořelého radioaktivního odpadu dle konceptu KBS-3V. Odpad by dle tohoto konceptu měl být uložen do vertikálních 7–8 m hlubokých otvorů, hloubených ze dna ukládacích tunelů do měděnoocelových obálek. Prostor mezi obálkou odpadu a horninou by měl být vyplněn bentonitem. Ukládací tunely jsou napojeny na hlavní tunely a ty na přístupové šachty. Tyto přístupové cesty by měly být vyplněny např. směsí bentonitové směsi a vytěžené horniny a zazátkovány betonovými zátkami, aby tyto tunely nebyly preferenčními cestami pro podzemní vodu. V Kanadě je uvažována předpokládaná doba trvanlivosti tohoto zařízení na 100 000 let (podobný styl uložení).

V rámci vhodnosti horninového masívu pro uložení radioaktivního odpadu se horninové prostředí hodnotí ve třech velikostních měřítcích. Největší měřítko (dále v textu označováno jako M1, "depository") hodnotí, zda je v dané lokalitě vůbec úložiště možné realizovat. V menším měřítku (dále v textu označováno jako M0,1, "tunnel") se hodnotí dílčí části samotného úložiště (ukládací chodby), v nejmenším hodnoceném celku (dále v textu označováno jako M0,01) se uvažuje o vhodnosti ukládací komory ("canister").

Požadavky pro M1 jsou definovány obvykle na úrovni jednotlivých států. Obvykle se jedná o samostatný horninový blok omezený regionálními zlomy. Pro specifikaci vlastností pro M1 jsou uvažovány především:

- g) poloha a orientace poruchových zón (u diskontinuit se hodnotí jejich délka, průběžnost, rozevření, transmisivita, hydraulická vodivost);
- h) pevnost a napětí hornin a distribuce napětí v horninách;
- i) salinita prostředí v případě dosahu slané vody (obsah Cl- a TDS);
- j) pro dlouhodobou bezpečnost jsou v měřítku M1 důležité obsahy např. Ca²⁺, Mg²⁺, pH, redoxní potenciál Eh;
- k) nejlepší orientace pro ukládací tunely je rovnoběžně, případně kolmo k hlavním poruchovým zónám a k foliaci.

Pro navrhování klasifikačního systému hornin podle vhodnosti pro vybudování úložiště je důležité:

a) čím jsou lepší podmínky horninového masívu pro výstavbu, tím je potřeba méně konstrukčních prvků a betonu, beton ovlivňuje negativně chemismus podzemní vody;

- b) uvažovat existenci inženýrské bariéry (bentonit, ocelovoměděná schránka) je možné připustit lokální odchylky od chemismu v místě úložných míst, hlavní je, aby horninový masív zabezpečil mechanickou odolnost horninového masívu a adekvátní geochemické podmínky;
- c) případné nevhodné termální vlastnosti horninového masívu v místě úložných prostor je možné kompenzovat konstrukcí samotných úložných pouzder, podle konzervativního odhadu jsou průměrné termální vlastnosti hornin dostatečné pro určení geometrie úložných prostor jednotlivých schránek, mechanické vlastnosti a hydrogeologické vlastnosti hornin jsou mnohem důležitější pro hodnocení vhodnosti horninového masívu;
- d) orientace zlomů, foliace a horninové napětí in situ jsou důležité pro navržení úložiště, ale nemusí být obsaženy v klasifikačním systému, alespoň ne v měřítku M1, je to důležité například pro orientaci tunelů (M0,1);
- e) mechanická stabilita úložiště je určena parametrem "strength/stress ratio" a vlastnostmi zlomů a zlomových pásem a toto musí být obsaženo v HRC systému, tyto parametry jsou sice obsaženy v konvenčních klasifikačních systémech, ale tyto systémy nehodnotí dlouhodobou stabilitu, která musí být uvažována pro úložiště; pro klasifikační systém musí být uvažováno s budoucími vlivy na území (např. seismicita a další zatížení oblasti);
- není příliš praktické v rámci klasifikace hodnotit mnoho chemických parametrů, pouze několik parametrů může ovlivnit chování v rámci měřítka M1, samotné geochemické parametry jsou pro hodnocení jednotlivých oblastí specifické a těžko je zevšeobecňovat;
- g) redoxní potenciál není vhodným parametrem pro klasifikaci;
- h) úložiště by mělo být vybudováno v dostatečné vzdálenosti od propustných poruchových zón (dané propustností hornin), pevnost hornin by měla být větší než je její napětí, aby nedošlo ke kolapsu úložných prostor;
- v měřítku M1 jsou nejdůležitějšími parametry pro hodnocení regionální a lokální poruchové zóny, "strength/stress ratio", hydrochemie podzemní vody, hydraulická vodivost horninového masívu.
- j) V měřítku M0,1 jsou nejdůležitější parametry hydraulická vodivost, místní zlomová pásma, četnost poruch, napětí na puklinách ("frictional properties").
- k) V měřítku M0,01 jsou nejdůležitějšími parametry hydraulická vodivost, četnost poruch, rozevření (šířka) poruch a délka poruch.

Pro vytvoření klasifikačního systému je důležité si uvědomit, že pro výběr hodnotících parametrů je nutné uvažovat i interakci inženýrské bariéry s prostředím, termické ovlivnění horninového masívu vlivem uskladněného odpadu, budoucího vývoje klimatu a seismického ovlivnění.

Pro klasifikaci horninového masivu v rámci tohoto úkolu jsou vhodná modifikovaná kritéria pro měřítka M0,1 a M0,01.

Požadavky na horninový masív vzhledem k dlouhodobé bezpečnosti (long-term safety):

- a) izolační funkce "isolation function": horninový masív musí splňovat požadavky na mechanicky a chemicky stabilní prostředí. V M0,01: pevnost horniny, vlastnosti puklin, které procházejí okolím ukládací komory, hydrostatický tlak, hydraulická vodivost jednotlivých puklin, výplň puklin, geochemie podzemní vody – největší vliv na bentonit mají obsahy TDS (celkový obsah rozpuštěných látek, v případě vyšší salinity více než 100g/l), Ca2+, Mg2+, Na+, nejvýznamnější vliv na trvanlivost schránky má hodnota redoxního potenciálu Eh, obsah HS- a Fe2+ v podzemní vodě, obsah Fe je ovlivněn obsahem sulfidů, oxidů a silicitů železa na puklinách, dalším činitelem, který ovlivňuje trvanlivost inženýrských bariér jsou termální vlastnosti horniny. V M0,1: "stress distribution" v okolí ukládací komory (výrazně je ovlivněno ražbou). V M1: poloha a délka místních a regionálních zlomových pásem.
- b) zpomalovací funkce ("retardation function"): v případě, že izolace schránky odpadu selže, tak by hornina měla sloužit jako další bariéra: možnost prostupnosti radionuklidů skrz horninu v blízkém okolí ("near-field") je ovlivněna: prouděním podzemní vody, rozevření, geometrie a průběžnost puklin, geochemie podzemní vody. Ve větším měřítku ("far-field") je zpomalovací funkce šíření radionuklidů ovlivněna hydraulickou vodivostí a transmisivitou poruchových zón. Rozpustnost uvolňovaných radionuklidů v blízkém okolí odpadu je předurčena hydrogeochemickými parametry Eh, TDS, pH a obsah HCO⁻³. Poloha a propustnost puklin poruchových zón ovlivňuje rychlost transportu radionuklidů.

Pro úložiště nejsou vhodné lokality:

- a) s výskytem horninových bloků s nedostatečnou velikostí,
- b) rudní a nerudní revíry,
- c) seizmicky aktivní lokality,
- d) s korozně agresivní podzemní vodou v předpokládané hloubkové úrovni,
- e) s vysokým geotermickým gradientem.

V Tab. 28 jsou uvedeny hodnotící parametry používané pro jednotlivá hodnocená měřítka. Použití jednotlivých hodnotících parametrů pro jednotlivá měřítka hodnocení je v tabulce hodnoceno jako "+" pokud je uvažováno použití tohoto parametru a jako "-" pokud není uvažováno použití tohoto parametru. Nejistota v určení jednotlivých parametrů je závislá na teplotních změnách a na heterogenitě horninového masívu. Dále musí být uvažováno i měřítko (M1 až M0,01), v kterém je měření provedeno. V neposlední řadě musí být uvažováno i ovlivnění horninového masívu během výstavby, samotnými pracemi a novými konstrukčními prvky, které jsou do horninového masívu během výstavby vneseny.

hodno	ocený j	parametr / hodnocené měřítko	M1	M0, 1	M0,01
_	1.	délka	+	+	+
v v	2.	rozevření	+	+	+
ruch zón	3.	transmisivita (m ² /den)	+	+	+
d	4.	Q` (upravený Q systém)	+	+	+
				(přesnost 1 m)	(přesnost 1 m)
5.	pevno	ost horniny / napětí masívu	+	-	-
6.	hydra	aulická vodivost K	+	+	+
7.	geocl	hemický index podzemní vody	+	-	-
8.	rozev	rření trhlin	-	-	+
9.	délka	trhlin	-	-	+

Tab. 28 Sady hodnotících parametrů pro jednotlivé měřítka hodnocení horninového masívu

Souhrnně vyjádřené vlastnosti masívu jsou důležitější než jednotlivé hodnotící faktory. V případě nepříznivého jednoho faktoru, lze tento parametr kompenzovat jiným parametrem. Dále některé parametry mohou mít nižší nebo vyšší váhu. **Jakýkoliv parametr může ale nabýt takové limitní hodnoty, že už to nelze kompenzovat žádnými opravnými faktory.**

Pro měřítko M1 je za nejdůležitější faktor považována přítomnost poruchových zón. Existence poruchové zóny nelze kompenzovat žádným dalším parametrem. Pro ostatní parametry může například platit, že méně vhodné chemické parametry podzemní vody (GSI index) může být kompenzováno nižším koeficientem hydraulické vodivosti (K).

Pro měřítko M0,1 je za nejdůležitější považován parametr Q`. Tento parametr v sobě obsahuje v podstatě 4 jiné parametry, u kterých určuje jejich významnost (součin a podíl). V tomto měřítku je důležitým aspektem vzdálenost poruchových zón od ukládacích tunelů a nejistota, zda tato vzdálenost je dostačující. V případě blízkosti poruchové zóny k chodbě je pak vyšší význam parametrů Q` a K. Mírně snížená hodnota parametru Q může být nahrazena lepším parametrem hodnoty K. Je těžké stanovit limitní hodnoty parametrů Q a K. V případě nepříznivosti obou parametrů je celková vhodnost horninového masívu výrazně snížena.

<u>V měřítko M0,01</u> jsou vyloučena místa s poruchovými zónami. Parametr K a šířka poruch spolu souvisí. Pro posuzování vhodnosti jsou uvažovány pouze poruchy s vyšší šířkou dle limitních parametrů níže. Pouze nejméně desítky metrů dlouhé poruchy mohou způsobit poruchy úložných obálek odpadu.

Limitní hodnoty uváděných parametrů není možné stanovit s celosvětovou platností, místní specifika budou ovlivňovat hodnoty všech parametrů.

2.8.2.1 Poruchová pásma

- a) musí být v blízkosti úložiště vyloučeny (přinejmenším v měřítku M0,01),
- b) musí být uvažován rozsah seismických pohybů,
- c) musí být zhodnoceny hydraulické a transportní vlastnosti obzvláště z hlediska dlouhodobé bezpečnosti,

d) musí být zhodnoceny geotechnické a mechanické vlastnosti z hlediska možnosti výstavby a z hlediska dlouhodobé bezpečnosti.

Vzdálenost poruchového pásma dále uváděná je odvozená od výzkumů, které byly prováděny ve švédsku, Finsku a Kanadě. Uváděné hodnoty mohu být příliš konzervativní pro oblasti, kde nejsou vyvinuty zlomy spojené s odlehčením po ústupu ledovce a příliš optimistické pro méně stabilní podloží, než jsou prekambrické štíty (přinejmenším, když uvažujeme nebezpečí seismické aktivity).

Pro hodnocení poruchových pásem je použita klasifikace podle jejich délky:

- a) 0–3 km, místní poruchové zóny, není nutno být jakkoliv vzdálen od tohoto poruchového pásma,
- b) 3–10 km, hlavní lokální poruchové zóny, úložiště musí být vzdáleno více než 100 m, s poloměrem 50 m,
- c) více než 10 km, regionální poruchové zóny, úložiště musí být vzdáleno více než 100 m, s poloměrem 50 m.

Požadované vzdálenosti od jednotlivých typů poruchových pásem se u jednotlivých autorů liší a převážně respektují seismické riziko a nezohledňují hydraulické parametry. Seismický vliv je obecně považován za významnější než hydraulický vliv. Parametr K>10⁻⁵ m²/s je považováno již za hodnotu, která by způsobila významné obtíže při výstavbě, a proto by takovéto struktury neměly křížit úložné tunely M0,1.

V Kanadě je požadován odstup 50 m pro zóny s K na úrovni 10⁻⁷ m²/s. Nicméně stanovované vzdálenosti uvažují i s materiálem, z kterého budou vyrobeny obálky pro uložené odpady. A dále je nutno zohlednit inženýrskou bariéru v okolí obálky odpadu (bentonit). SKB uvažuje s minimální vzdálenosti 3 m od místních poruchových zón. Další autoři stanovují vzdálenosti od významných hydraulických poruchových zón a od geotechnicky významných zón.

Při budování úložiště je vhodné se vyhnout zónám s vysokou transmisivitou a tím snížit problémy spojené s nepříznivými hydraulickými a geochemickými vlivy.

2.8.2.2 Strength/stress ratio

- a) je nutno stanovit přípustné hodnoty v jednotlivých úložných prostorách (M0,01),
- b) stanovit hodnotu σUCS/σ1, které ještě nezpůsobí ztrátu stability,
- c) kolik úložných komor (M0,01) je možné nepoužít v rámci úložiště (ovlivní cenu výstavby i dlouhodobou bezpečnost-prodloužení tunelů M0,1)

V Kanadě je uvažováno, že hornina musí být schopná odolávat tlaku bez významných strukturních deformací. Ovšem definice tohoto konstatování je obtížná.

- a) σUCS/σ1>10 výstavba úložiště bez problémů,
- b) σUCS/σ1=5-10 odprýskávání ("spalling") se může vyskytovat,
- c) σUCS/σ1=3-5 střední riziko odprýskávání,
- d) σUCS/σ1<3 očekávají se problémy se stabilitou.

Pro stanovení výše uvedených hodnot je používána numerická analýza v různých možných orientacích podzemních děl vůči maximálnímu horizontálnímu napětí σH.

Pro modelování a numerickou analýzu je však nutno zhodnotit homogenitu prostředí.

2.8.2.3 Chemický index podzemní vody (GSI)

GSI parametr obsahuje pouze 1–3 dílčí subparametry. Ve Švédsku se stanovuje obsah rozpuštěného kyslíku (Eh), obsah Fe^{II}, obsah sulfidů a salinita (TDS<100 g/l v úrovni M1). Dále bylo hodnoceno pH (doporučeno 6–10), obsah organických částic (DOC<20 mg/l), obsah koloidních částic (méně než 0,5 mg/l), obsah NH4, obsah Ca2+ a Mg2+ (v souhrnu méně než 4 mg/l), obsah radonu a radia, koncentrace dvojmocných kationtů, koncentrace NaCl. Ve Finsku hodnotí obsah látek, které by mohly poškodit účinnost inženýrské bariéry v okolí odpadu. Salinita prostředí ovlivňuje bobtnání jílových minerálů.

Limitní parametry prostředí jsou často vázány na míru agresivity vůči betonu. Parametry jsou rozděleny do tří tříd náročnosti.

2.8.2.4 Hydraulická vodivost

Náročnost výstavby je závislá na hodnotách hydraulické vodivosti, a tedy i míry přítoku do podzemního díla. Hydraulická vodivost 10⁻⁹ m/s zhruba odpovídá přítoku 1 l/min na 100 m tunelu v hloubce 400 m, (dle Fransson a Gustavson 2001). Podle přítoků do díla na 100 m tunelu se člení podmínky výstavby takto:

a)	<5 l/min	normální,
b)	5-20 l/min	náročné,
c)	>20 l/min	velmi náročné.

Podle této klasifikace hornina s K≥10⁻⁸ m/s není vhodná pro M0,01. Ovšem hodnota K platí pro měřítko několika metrů. Samozřejmě však záleží i na měřítku, v kterém bylo měření provedeno. Pro hodnocení horninového masívu je někdy i používáno hodnocení podle Darcyho rychlosti, podle hydraulického gradientu a podle hodnoty rychlosti proudění (litrů za rok). Podle předešlých studií lze hrubě korelovat hodnotu Q` s parametry K a T.

2.8.2.5 Parametr Q`

Hlavní role parametru Q` je upřesnit jaká míra frakturace horninového masívu je přípustná z hlediska konstrukčního řešení, tak i z hlediska dlouhodobé stability. Hodnoty Q nad 1 reprezentují normální požadavky na konstrukční řešení. Pro hodnocení stability tunelů (M0,1) se uvažuje šíře výrubu 4 m, pro měřítko M0,01 pak 2 m. Pro hodnotu Q=1 se pro šíři výrubu 2 m (M0,01) podle závislosti počtu bodů a typem zajištění výrubu již nemusí uvažovat vystrojení. Pro převod bodů Q na Q` se uvažuje pro normální podmínky pro výstavbu o hodnotách 2–3. Obecně lze konstatovat, že v místě úložných komor (M0,01) by se neměly objevovat jílové výplně diskontinuit, ani hladké a rovinné diskontinuity.

2.8.2.6 Šířka puklin

Pukliny užší než 5 mm, bez výplně, případně s pevnou výplní odpovídají normálním podmínkám pro výstavbu. Pokud však již mají diskontinuity měkkou výplň, jedná se o náročné podmínky pro výstavbu. Pukliny nad 5 mm již odpovídají velmi náročným podmínkám výstavby. Z hlediska dlouhodobé stability je důležitá šíře puklin pro degradaci bentonitu erozí

vlivem proudění podzemní vody. Eroze bentonitu je závislá na jeho objemové hmotnosti a na rychlosti proudění podzemní vody (souvisí s hydraulickým gradientem).

2.8.2.7 Délka puklin ("fracture trace length")

Seismická aktivita může způsobit porušení obálky odpadu vlivem posunu podél diskontinuity. Nejdůležitějším parametrem pro hodnocení možnosti porušení je magnitudo zemětřesení. Samozřejmě záleží na vzdálenosti úložiště od pukliny. Aby bylo možno vyloučit porušení uložiště v M0,01 je nutno vyloučit pukliny s rozsahem >100 m. Dále se doporučuje jejich vzdálenost alespoň 2–3 m od úložiště.

Normální podmínky pro výstavbu odpovídají délce puklin menší než 5 m, náročné podmínky odpovídají vzdálenosti 5–10 m délky, vice než 10 m délky puklin odpovídá velmi náročným podmínkám pro výstavbu.

Délka pukliny, která je patrná v tunelu nemusí odpovídat maximálnímu rozsahu pukliny, a skutečný rozsah pukliny může být násobně větší. Parametr délky puklin souvisí dalším parametrem, a to je šířka puklin. Při hodnocení délky puklin je nutné zohlednit i kolik úložných prostor (M0,01) bude touto puklinou zastiženo.

2.8.3 Klasifikace HRC pro měřítko M1 – úložiště

- a) povrchový průzkum stanoví hloubku úložiště, předběžně vymezí hlavní poruchové zóny, respektive oblast rozčlení do dílčích bloků – panelů (oddělených poruchovými zónami), podle tohoto stupně by mělo být jasné, zda je lokalita vhodná pro úložiště,
- b) podzemní průzkum.

Při stanovování všech parametrů je nutné zohlednit všechny zastižené geotechnické typy. Pokud budou testovány poruchové oblasti, které budou následně z vybudování úložiště vyloučeny jako nevhodné, musí být vyloučena i tyto data z posuzování.

Hodnocení poruchových pásem

Do třídy A1 jsou řazeny poruchová pásma regionálního měřítka, do třídy B1 pak poruchová pásma lokální. Požadovaná vzdálenost ("respect distance") je odvozena od maximálního možného zemětřesení v místě poruchové zóny, které nezpůsobí posun v řádu větším než 0,1 m. Hodnocení seismického vlivu je v HRC systému zohledněn ještě v parametru délky puklin. Třídy poruchových pásem A2, B2 a B3 jsou stanoveny za účelem minimalizace hydraulického efektu poruchových zón (ochrana vyplavování bentonitové výplně okolo odpadu) a k přispění ke zpomalení transportu radionuklidů při případném kolapsu inženýrské bariéry okolo odpadu. Požadovaná vzdálenost ("respect distance") závisí na charakteru masívu a puklin mezi jednotlivými úložnými prostorami (M0,01). Požadovaná vzdálenost musí být velká natolik, aby nedošlo ke zvýšení přítoku do úložiště vlivem blízkosti poruchové zóny, horninový masív musí zabezpečit významné zpomalení šíření radionuklidů. Předpokládá se, že třída A2 nebude protínat centrální tunely (M1–M0,1). Třída B2 může protínat centrální tunel, avšak musí být dostatečná vzdálená od ukládacích tunelů (M0,1). Všechny stanovené požadované vzdálenosti ("respect distance") by měly obsahovat 10 m široké okrajové pásmo, a výsledná hodnota by měla být nejméně dvakrát větší než viditelné přechodové oblasti. Poruchové zóny třídy B4 by měly obsahovat nejméně 5 m široká okrajová pásma a jejich šíře

by měla být taková, že poruchová zóna nemůže způsobit žádné významné ovlivnění úložiště. Přehled klasifikace poruchových pásem je v Tab. 29.

Class	Fracture zones in the class	Basis	for the definition of fracture zone class	Respect distance			
А	Fracture zones that must not be	A1	$Length \geq 10 \; km$	Site-specific			
	intersected by any part of the repository except for the access tunnels/shafts above the disposal depth.	A2	$T_{ref} \ge T_{A2}$	Site-specific			
В	Fracture zones that must not be	B1	$3 \text{ km} \leq \text{length} < 10 \text{ km}$	Site-specific			
	intersected by deposition tunnels (or deposition holes) but can be intersected by other parts of the repository.	B2	$T_{B2}^{} \! \leq \! T_{ref}^{} \! < \! T_{A2}^{}$	Site-specific			
		B3	$T_{B3} \! \leq \! T_{ref} \! < \! T_{B2}$	Site-specific			
		B4	$Q^{\prime} < 0.3$ and thickness $\geq 5~m$	Site-specific			
T _{ref} = transmissivity at a reference depth level (the most probable disposal depth)							

Tab. 29 Klasifikace poruchových pásem (převzato z Hagros 2006)

 T_{A2}, T_{B2}, T_{B3} = limit values for transmissivity

= modified Q-value (rock mass quality)

Na základě hodnocení poruchových pásem dojde ve vertikálním měřítku k rozdělení masívu do tříd A a B.

Podle Geochemického indexu se masív rozčlení do tříd I, II a III. Třída I – příznivé chemické prostředí, II – nepříznivé prostředím, které lze akceptovat pouze, když hydraulická vodivost je tak nízká, že se sníží nepříznivý vliv, III – nepříznivé podmínky, neslučuje se s výstavbou úložiště. Nesmí být zapomenuto na možnou laterální proměnlivost parametru GCI.

Posledním krokem ke klasifikaci na úrovni úložiště (M1) je určení procentuálního zastoupení:

- a) horninového masívu s "strength/stress ratio" nad limitní hodnotou,
- b) horninového masívu pod kritickou hodnotou.

V Tab. 30 je návrh na členění masívu do tříd podle vhodnosti (Rep1-Rep4) s ohledem na členění masívu podle klasifikace poruchových pásem (viz výše). Popis jednotlivých tříd vhodnosti je uveden v Tab. 31.

Tab. 30 Klasifikace masívu podle vhodnosti (převzato z Hagros 2006)

Table 13. The suitability classes (Rep1–Rep4) for volumes of rock classified at the repository scale on the basis of fracture zones and their respect zones, the Groundwater Chemistry Index (GCI) and the percentages of hydraulic conductivity (K) and strength/stress (σ_{UCS}/σ_1) values with respect to the critical values (CV_K and CV_S , respectively). The classes Rep1–Rep4 are explained in Table 14.

GCI	Percentage K < CV _K	Percentage $\sigma_{UCS}^{}/\sigma_1^{} > CV_S^{}$					
		> 90 %	70-90 %	< 70 %			
Volumes of	rock outside all Class	A or B respect zones					
Class I	> 90 %	Rep1	Rep2	Rep3			
	70-90 %	Rep2	Rep3	Rep4			
	< 70 %	Rep3	Rep4	Rep4			
Class II	> 95 %	Rep2	Rep2	Rep3			
	90-95 %	Rep3	Rep4	Rep4			
	< 90 %	Rep4	Rep4	Rep4			
Class III	0-100%	Rep4	Rep4	Rep4			
Volumes of	rock outside Class A	respect zones, with sparse	ely occurring Class B frac	cture zones 1)			
Class I	> 90 %	Rep2	Rep2	Rep3			
	70-90 %	Rep2	Rep3	Rep4			
	< 70 %	Rep3	Rep4	Rep4			
Class II	> 95 %	Rep3	Rep3	Rep4			
	0-95 %	Rep4	Rep4	Rep4			
Class III	0-100%	Rep4	Rep4	Rep4			

 Volumes where the occurrence of Class B fracture zones limits the extent to which the volume of rock can be used for locating repository panels (Stage 1) or deposition tunnels (Stage 2), but does not make the volume completely unusable (i.e. the sub-volumes bounded by Class B respect zones are considered large enough to host panels or deposition tunnels and can be classified further). Volumes with a high density of Class B fracture zones are unusable and need not be classified any further.
Tab. 31 Charakteristika jednotlivých tříd vhodnosti horninového masívu (převzato z Hagros 2006)

Table 14. The suitability classes for classification at the repository scale and the implication of these for decisions made at the stage of the surface-based investigations (locating the whole repository) and at the stage of investigations of the repository panels (locating individual panels).

Code	Suitability class	Implications at the stage of surface-based investigations (whole repository)	Imlications at the stage of investigations of the repository panels	
Rep1	High suitability	Very probable that the volume of rock is suitable for locating individual panels.	Very probable that the volume of rock is suitable for locating deposition tunnels.	
Rep2	Moderate suitability	Probable that most of the volume of rock is suitable for locating individual panels.	Probable that most of the volume of rock is suitable for locating deposit tunnels.	
Rep3	Low suitability	Volume of rock should preferably be avoided, unless potentially suitable sub-volumes for individual panels can be identified or the low suitability compensated for by, for example, a significant amount of grouting or rock support.	Volume of rock should preferably be avoided, unless potentially suitable and sufficiently large sub-volumes can be identified or the low suitability compensated for by, for example, a significant amount of grouting or rock support.	
Rep4	Very low suitability	Volume of rock needs to be avoided unless potentially suitable sub- volumes for individual panels can be identified after more detailed investigations.	Volume of rock needs to be avoided unless potentially suitable and sufficiently large sub-volumes can be identified after more detailed investigations.	

Kritická hodnota pro σ_{UCS}/σ_1 by měla ležet v rozsahu 3–5. Pro jeho stanovení musí být uvažováno s případným budoucím zaledněním, změnou termálních podmínek a dalšími případnými vlivy. Kritická hodnota parametru hydraulické vodivosti C_{VK} by měla obecně ležet v řádu 10⁻⁸ m/s, ale musí být stanovena místně.

Klasifikace je pak následně provedena v hloubkových intervalech vrtů podle parametrů:

- a) poruchové zóny (třídy A1 až B4),
- b) geochemický index,
- c) "strength/stress ratio",
- d) hydraulická vodivost.

V hloubkových intervalech jsou horniny zatříděny podle Tab. 29 (klasifikace poruchových pásem) a Tab. 30 (klasifikace masivu podle vhodnosti) do jednotlivých tříd. V případě výskytu poruchových zón, které jsou neslučitelné s výstavbou úložiště, tak v jejich rozsahu a v požadované vzdálenosti od nich není masív dále hodnocen. Následně jsou hloubkové intervaly hodnoceny podle vhodnosti dle Tab. 31. Hodnocení získané z klasifikace na této úrovni může být vlivem dalšího zkoumání v nižších měřítcích (M0,1, M0,01) upraveno oběma směry.

Klasifikace horninového masívu může ovlivnit následující:

- a) požadovanou vzdálenost od poruchových zón;
- b) konečnou hloubku úložiště;

- c) změna geometrického uspořádání uložiště;
- d) změna směru úložných tunelů vzhledem ke směru σ₁;
- e) revize a možné změny v klasifikaci na úrovni měřítka M0,1 a M0,01.

2.8.4 Klasifikace pro měřítko tunel M0,1

Dva stupně průzkumu:

- a) pilotní horizontální průzkumné vrty z centrální chodby (3-4 paralelní vrty, měření hydraulické vodivosti, geofyzikální měření mezi vrty),
- b) ražba tunelů (mapování tunelu).

Tato klasifikace je určená pro ukládací tunely, ale lze jí i využít pro přístupové (hlavní, centrální) tunely s tím, že požadavky pro ukládací tunely jsou adekvátně vyšší.

Pilotní vrty pro hodnocení ukládacích tunelů by měly být vrtány cca 1 m nad podlahou tunelu, jádro získané vrtáním by mělo být orientované, případně je nutné zajistit kamerovou prohlídku vrtu za účelem zjištění orientace puklin. Hodnoty zjišťovaných parametrů z pilotních vrtů jsou následně srovnávány s hodnotami zjištěnými během ražby tunelu. Existence nových puklinových systému při ražbě může vést k jejímu zastavení.

Hodnocení poruchových zón se děje na základě hodnocení uvedeného v Tab. 32. Tabulka pracuje s kategorií poruchy C, která může být zastižena v přístupové chodbě (M0,1), ale nesmí být zastižena v ukládacím prostoru (M0,01), požadovaná vzdálenost (respect distance) je v řádech metrů. Požadovaná vzdálenost pukliny třídy C2 by měla být taková, aby její přítomnost významně nesnížila stabilitu nejbližšího úložného prostoru, dále se doporučuje, aby nekřížila ukládací tunel pod úhlem menším než 30°a aby její délka nepřesáhla 10 m. Požadovaná vzdálenost pro pukliny třídy B se pohybuje v řádu 5-10 m v závislosti na míře přesnosti jejího určení.

Tab. 32 Hodnocení poruchových zón

Table 17. The fracture zone classes considered at the tunnel scale. Any respect distances to Class A fracture zones apply to the central and deposition tunnels and the deposition holes, any respect distances to Class B fracture zones apply to the deposition tunnels and deposition holes and any respect distances to Class C fracture zones apply only to the deposition holes.

Class	Fracture zones in the class	Basis	for the definition of fracture zone class	Respect distance
А	Fracture zones that must not be	A1	$Length \geq 10 \ km$	Site-specific
	intersected by any part of the repository except for the access tunnels/shafts above the disposal depth.		$T_{ref} \!\geq\! T_{A2}$	Site-specific
В	Fracture zones that must not be		$3 \ km \leq length < 10 \ km$	Site-specific
	intersected by deposition tunnels (or deposition holes) but can be intersected by other parts of the repository.	B2	$T_{B2} \! \leq \! T_{ref} \! < \! T_{A2}$	Site-specific
		B3	$T_{B3} \! \leq \! T_{ref} \! < \! T_{B2}$	Site-specific
			$Q^{\prime} < 0.3$ and thickness $\geq 5~m$	Site-specific
С	Fracture zones that can be intersected by deposition tunnels but must not be intersected by deposition holes.	C1	$T_{c1} \le T_{ref} < T_{B3}$	Site-specific
		C2	$Q^\prime < 0.3$ and thickness $< 5~m$	Site-specific
			$T_{ref}\!<\!T_{C1}$ and $Q'\!\geq\!0.3$	Site-specific

 $\begin{array}{ll} T_{ref} & = \mbox{transmissivity at a reference depth level (the most probable disposal depth)} \\ T_{A2}, T_{B2}, T_{B3}, T_{C1} & = \mbox{limit values for transmissivity} \\ Q' & = \mbox{modified Q-value (rock mass quality)} \end{array}$

Klasifikace vhodnosti pro umístění ukládacích tunelů jsou:

- a. Výskyt poruchových zón a jejich blízkosti (tzn. požadovaná vzdálenost),
- b. Hydraulická vodivost,
- c. Q` body určené na rozsah 1, případně více metrů.

Hodnocení horninového masívu je v tomto případě prováděno pouze jednoosově (osa tunelu – průzkumný vrt/tunel). Klasifikace vhodnosti je pak vztažena pro celou délku vrtu/tunelu. Zařazení do jednotlivých tříd vhodnosti je uvedeno v Tab. 33.

Tab. 33 Třídy vhodnosti pro umístění tunelu (převzato z Hagros 2006)

Table 18. The suitability classes (Tun1–Tun4) of the volumes of rock classified at the tunnel scale on the basis of the presence of fracture zones, hydraulic conductivities (K) and Q'-values. Only volumes that are outside all Class A and B respect zones will be classified. Q'_1 , Q'_2 , Q'_3 , K_1 , K_2 , K_3 = limit values. The classes Tun1–Tun4 are explained in Table 19.

Hydraulic	Q'						
conductivity (m/s)	$\mathbf{Q}' > \mathbf{Q}'_1$	$\mathbf{Q'}_2 < \mathbf{Q'} \le \mathbf{Q'}_1$	$\mathbf{Q'}_3 < \mathbf{Q'} \le \mathbf{Q'}_2$	$\mathbf{Q}' \leq \mathbf{Q}'_3$			
Volumes of rock at a distance of > 20 m from the boundaries of Class A and B respect zones and outside Class C respect zones							
$K < K_1$ Tunl Tun2 Tun3 Tun4							
$\mathbf{K}_1 \leq \mathbf{K} < \mathbf{K}_2$	Tun2	Tun3	Tun3	Tun4			
$\mathbf{K}_2 \leq \mathbf{K} < \mathbf{K}_3$	Tun3	Tun3	Tun4	Tun4			
$\mathbf{K} \ge \mathbf{K}_3$	Tun4	Tun4	Tun4	Tun4			
Volumes of rock at a distance of $0-20$ m from the boundaries of Class A and B respect zones and outside Class C respect zones							
$K < 0.5 \cdot K_1$ Tun1 Tun2 Tun3 Tun4							
$0.5 \cdot K_1 \le K < 0.5 \cdot K_2$	Tun2	Tun3	Tun3	Tun4			
$0.5 \cdot K_2 \le K < 0.5 \cdot K_3$	Tun3	Tun3	Tun4	Tun4			
$\mathbf{K} \ge 0.5 \cdot \mathbf{K}_3$	Tun4	Tun4	Tun4	Tun4			
Volumes of rock within Class C respect zones							
K < K ₂	Tun3	Tun3	Tun3	Tun4			
$\mathbf{K}_2 \leq \mathbf{K} < \mathbf{K}_3$	Tun3	Tun3	Tun4	Tun4			
$K \ge \overline{K_3}$	Tun4	Tun4	Tun4	Tun4			

Parametr Q1 odpovídá podmínkám, kdy prostředí je mechanicky stabilní a nepožaduje žádné vystrojení (šíře 2 m, $J_w > 1$, SRF>1). Parametr Q2 odpovídá méně stabilnímu prostředí ($J_w = 1$, SRF=1, Q`>0,3). Q3 odpovídá podmínkám, kde nebude ražba prováděna.

Hodnocení jednotlivých tříd vhodností pro umístění ukládacích tunelů je uvedeno v Tab. 34.

Tab. 34 Hodnocení jednotlivých tříd vhodností pro umístění ukládacích tunelů (převzato z Hagros 2006)

Code	Suitability class	Implications for decisions made before tunnelling (pilot hole stage)	Implications for decisions made during tunnelling	
Tun1	High suitability	The volume is favourable for disposal purposes and a tunnel can be excavated in the volume.	The volume is favourable for disposal purposes and the tunnelling can be continued.	
Tun2	Moderate suitability	The volume may be acceptable for disposal purposes. Some grouting or rock support may be needed.	The volume may be acceptable for disposal purposes. Some grouting or rock support may be needed.	
Tun3	Low suitability	The volume (that probably relates to a fracture zone) is unfavourable for disposal purposes. Significant amounts of grouting or rock support may be needed and a sealing structure (plug) may need to be installed at the intersection of the tunnel and this zone.	The volume (that probably relates to a fracture zone) is unfavourable for disposal purposes. Significant amounts of grouting or rock support may be needed and a sealing structure (plug) may need to be installed at the intersection of the tunnel and this zone.	
Tun4	Very low suitability	The volume (that is very likely to relate to a significant fracture zone) is very unfavourable for disposal purposes and reduces the suitability of the whole tunnel. If the length of this low quality rock in the pilot hole is > 5 m, it should not be intersected by a deposition tunnel, unless rock mass suitability can be confirmed by additional investigations.	The volume (that is very likely to relate to a significant fracture zone) is very unfavourable for disposal purposes and reduces the suitability of the whole tunnel. If the length of this low quality rock is > 5 m, the tunnelling should be stopped, unless rock mass suitability can be confirmed by additional investigations.	

 Table 19. The suitability classes at the tunnel scale and the implications of these for decisions made before and during tunnelling.

Výsledkem zhodnocení je grafické znázornění tříd vhodnosti na ose vrtu/tunelu v rámci klasifikace Tun1 až Tun4. Výsledek klasifikace po provedení průzkumných vrtů by měl být potvrzen během ražby tunelů. Při ražbě tunelů bude provedeno mapování celé plochy tunelů. Parametry, podle kterých se hodnotí třídy vhodnosti tunelů, jsou shodné s parametry, podle kterých se hodnotí unístění ukládacích komor.

Při zastižení třídy tun4 v délce postupu 5 m se předpokládá ukončení tunelování. Časté střídání jednotlivých tříd vhodnosti se jeví také jako nevhodné pro výstavbu. Je nutné zvážit, kolik ukládacích komor nebude možné vyhloubit.

Hodnocení předpokládaného tunelu na základě provádění průzkumných vrtů může být ovlivněno jejich místní vysokou proměnlivostí v měřítku vrtu. Jako celek se pak masív může chovat odlišně. Rovněž je možný opačný případ, kdy nepříznivé struktury jsou paralelní s osou vrtu a projeví s až při ražbě (lze vyloučit geofyzikálním měřením mezi vrty).

2.8.5 Měřítko úložná komora – "canister" - M0,01

3 stupně průzkumu:

- c) detailní mapování podlahy tunelu;
- d) pilotní průzkumné vrty;
- e) vyhloubení úložného prostoru ("canister").

Pro klasifikaci vhodnosti jsou stanoveny tyto parametry:

- f) poruchové zóny a jejich blízkost;
- g) hydraulická vodivost;
- h) hodnota Q` pro vzdálenosti 1 m;
- i) výskyt puklin širších než limitní hodnota (Fw) ve dně tunelu;
- j) výskyt puklin delších než limitní hodnoty (TL1, TL2), které protínají úložnu prostoru.

Nejprve je podle těchto kritérií hodnoceno dno tunelu, následně pak pilotní vrty a pak přímo hloubené ukládací prostory ("canister"). Třídy vhodnosti jsou určovány dle Tab. 35.

Tab. 35 Třídy vhodnosti pro měřítko M0,01 (převzato z Hagros 2006)

Table 21. The suitability classes (Can1–Can3) of the volumes of rock classified at the canister scale on the basis of fracture zones, hydraulic conductivity (K), Q'-value, fracture width and fracture trace length (Q'_1, Q'_2, K_1, K_2 , FW, TL₁, TL₂ = limit values). Only volumes of rock outside the respect zones of Class A and B fracture zones will be classified. The classes Can1–Can3 are explained in Table 22.

Maximum fracture	Hydraulic conductivity (m/s)	Q′			
width (mm)		> Q' ₁	$\mathbf{Q'}_2 < \mathbf{Q'} \le \mathbf{Q'}_1$	$\leq Q_{2}^{r}$	
Volumes of rock - at a distance of > 20 m from the boundaries of Class A and B respect zones and outside Class C respect zones, and - where the deposition hole is not intersected by any fractures with no end visible and with a trace length > TL ₁					
< FW	K < K ₁	Can1	Can2	Can3	
	$\mathbf{K}_1 \leq \mathbf{K} < \mathbf{K}_2$	Can2	Can3	Can3	
	$\mathbf{K} \ge \mathbf{K}_2$	Can3	Can3	Can3	
≥FW	[all values]	Can3	Can3	Can3	
Volumes of rock - at a distance of 0–20 m from the boundaries of Class A and B respect zones and outside Class C respect zones, and - where the deposition hole is not intersected by any fractures with a trace length > TL,					
< FW	$K < 0.5 \cdot K_1$	Can1	Can2	Can3	
	$0.5{\cdot}K_1^{}{\leq}K^{}{<}0.5{\cdot}K_2^{}$	Can2	Can3	Can3	
	$\mathbf{K} \ge 0.5 {\cdot} \mathbf{K}_2$	Can3	Can3	Can3	
\geq FW	[all values]	Can3	Can3	Can3	
Other volumes of rock (where the deposition hole is intersected by a Class C respect zone or by a fracture with a trace length > TL_1/TL_2)					
[all values]	[all values]	Can3	Can3	Can3	

Limitní hodnota šíře puklin (Fw) by měla být stanovena experimentálně. Maximální přijatelné parametry pro hodnoty TL1 a TL2 jsou také závislé na délce ukládacích tunelů. Limit TL1 je uvažován pro pukliny, u kterých nebyl zjištěn konec. Limit TL2 pak pro pukliny ohraničené svým rozsahem.

Charakteristika třídy vhodnosti k umístění úložných komor jsou uvedeny v Tab. 36.

Tab. 36 Třídy vhodnosti k umístění úložných komor (převzato z Hagros 2006)

Code	Suitability class	Implications for decisions made at the tunnel floor stage (Stage 1)	Implications for decisions made at the pilot hole stage (Stage 2)	Implications for decisions made at the deposition hole stage (Stage 3)
Can1	1 High suitability The tunnel section is favourable for disposal purposes and can be selected as a provisional canister location.		The proposed canister location is favourable for disposal purposes and a deposition hole can be bored at the location.	The proposed canister location is favourable for disposal purposes and a canister can be emplaced in the deposition hole (unless significant spalling has occurred in the hole).
Can2	Moderate suitability	The tunnel section may be acceptable for disposal purposes, but its suitability may need to be improved by technical measures.	The proposed canister location may be acceptable for disposal purposes, but its suitability may need to be improved by technical measures.	The proposed canister location may be acceptable for disposal purposes, but its suitability may need to be improved by technical measures.
Can3	Low suitability	The tunnel section is unfavourable for disposal purposes and should not be selected as a provisional canister location, unless its suitability can be determined by more detailed studies.	The proposed canister location is unfavourable for disposal purposes and a deposition hole should not be bored at the location, unless its suitability can be determined by more detailed studies.	The proposed canister location is unfavourable for disposal purposes and the deposition hole should be left unused and sealed properly (in such a manner that it does not reduce the suitability of the adjacent rock mass).

 Table 22. The suitability classes at the canister scale and the implications of these for decisions made at the tunnel floor stage (Stage 1), the pilot hole stage (Stage 2) and the deposition hole stage (Stage 3).

3 Plán prací 3/22-2/23

V rámci dalšího roku řešení projektu budou práce postupovat dle aktuálního plánu ražeb a zejména dle Realizačního projektu prací (Bukovská et al. 2021). Tyto se budou přímo odvíjet od stavu a postupu díla v podzemí a budou mu přizpůsobeny. Předpokladem, je realizace dokumentací pro chodby L5 a L6 a zkušební komory na L7, L8, dále vrty geotechnické stanice v koncové části L7 a vrtu pro VTZ (zřejmě kolem 56 m L8).

Dle informace od zadavatele prací (dle plánu z 17. 2. 2022) se předpokládá realizace prací související s plánem:

- konec června 2022: Konec února doražení L6, dále během března na L5 zajištění 75 m a doražení do 90 m, duben geologická a geofyzikální měření L5, dále VCh5-6 do konce května.
- Od června ražba ZK v L8 (4 komory, 18 dní/komora).
- Červenec celozávodní dovolená, od srpna ražba dalších komor v L8 až do října. Dále nástřel L4 do konce roku.
- V L7 vyvrtání geotechnické stanice + pilotní vrt do čelby 10 m (pro ražbu dalších 5 m), na začátku března začátek vrtání v L8 (vrt pro VTZ), poté vrtání geotechnické stanice v L7.

3.1 Geologická a strukturněgeologická charakterizace

Práce budou pokračovat obdobným způsobem jako v prvním roce řešení projektu. Budou přímo odvislé od stavu a postupu ražeb. Zahrnou primární geologickou a geotechnickou charakterizaci čeleb, strukturněgeologickou a petrografickou charakterizaci chodeb a zkušebních komor. Všechna data budou zpracována obdobným způsobem a využita pro účely klasifikačního systému.

3.2 Petrografická a geochemická charakteristika

V roce 2022 budou detailněji charakterizovány a popsány zastižené litologie v PVP II a vybrané výbrusy budou podrobeny analýzám chemického složení na elektronovém mikroskopu. Zároveň proběhnou výpočty PT podmínek vybraných litologií za účelem stanovení podmínek metamorfózy horninového prostředí.

Dále budou v roce 2022 provedeny analytické práce na vybraných vzorcích puklinových výplní z chodeb L7 a L8, zpracování a interpretace získaných dat. Dále budou odebrány vzorky z nových chodeb, bude provedena dokumentace vzorků, příprava vzorků na analýzy, separace minerálů i analytické práce.

Pro geochemickou charakteristiku budou v roce 2022 odebrány další reprezentativní litologie tvořící prostředí PVP II a všechny odebrané vzorky budou nadrceny, zhomogenizovány a odeslány do laboratoře na zhotovení celohorninových geochemických analýz.

3.3 3D strukturněgeologický model

V dalším roce řešení bude pokračovat tvorba 3D geologického modelu oblasti PVP II, která bude zaměřena na nově vyražené prostory – zejména L5 a L6 – obdobným způsobem jako

stávající část modelu. V rámci stávajícího modelu okolí L7 a L8 bude tato část modelu doplněna o data ze zkušebních komor, případně další získaná data z jiných metod než základní strukturněgeologické a petrografické dokumentace. Model bude opět sestaven na základě fotogrammetrie chodby, vynesených dat a archivních podkladů v místech, kde není jiná dokumentace k dispozici.

3.4 Hydrogeologická charakterizace

Hydrogeologické mapování

V následujícím roce řešení projektu bude pokračovat dokumentace průsaků do prostoru PVP s postupem ražeb chodeb L6, L4 (případně L5) a jednotlivých zkušebních komor ve stejném rozsahu a se stejnou metodikou, jako byly prováděny dosavadní práce. V intervalu 1x za rok proběhne revize dokumentovaných přítoků

Hydrogeologický monitoring a vzorkování

Dokumentované průsaky do PVP Bukov II mají v rámci aktuálního rozsahu chodeb velmi nízkou vydatnost. Podmínka vydatnosti v řádu minimálně 0,01 l.s⁻¹ nebo vyšších hodnotách řádu 0,001 l.s⁻¹ definovaná v projektu prací pro zařazení průsaku do monitorovací sítě není nikde splněna. Vzhledem k reálné situaci v PVP navrhujeme následující postup:

- Zopakovat odběr vzorků z již vzorkovaných přítoků v rozsahu ZDA (dle projektu prací) pro postižení případného vývoje obsahů hlavních iontů. Většina přítoků má tak malou vydatnost, že není možný odběr většího množství vody pro širší rozsah analýz.
- 2. Z přítoku 296HCR0011 v chodbě L8 odebrat podzemní vodu pro ZDA, TOC a stopové prvky.
- Osadit přítok 296HCR0011 svodným žlábkem a pokud v průběhu roku 2022 nedojde k poklesu vydatnosti přítoku či změně jeho charakteru, zařadit tento přítok do monitorovací sítě.
- 4. Zvážit možnost osazení vrtů BGS12-VU BGS12-I a S-33 průchozími pakry a hadičkami, které by umožňovaly odběr vzorku. V současné době jsou tyto vrty osazeny pakry s manometry, vzorkování ani měření vydatnosti výtoku z vrtu není možné. Po zprovoznění elektrické a datové sítě by byla u vrtů BGS12-VU a BGS12-I možná instalace průtokoměrů.
- 5. Další instalace a monitoring řešit operativně dle průsaků, které budou zastiženy nově raženými chodbami.

Studium původu a stáří vod

Studium bude realizováno v letech 2023 až 2024, po vyražení chodeb PVP Bukov II a stabilizaci poměrů v laboratoři. V roce 2022 budou pro izotopové a další speciální analýzy odebrány vzorky pouze v případě, že ražbou chodby/komory nebo průzkumným vrtem bude zastižen významný vydatný přítok do PVP a bude hrozit zánik tohoto přítoku z bezpečnostních či technických důvodů.

Vodní tlakové zkoušky

Vodní tlakové zkoušky charakterizují hydraulické parametry porušené horniny v blízkosti chodby i hydraulické parametry potenciálně neporušené horniny masivu. V dalším roce řešení je plánováno provedení několika vodních tlakových zkoušek (VTZ), které budou provedeny v k tomu určených vrtech o celkové délce cca 100 m. Nejdelším vrtem, na kterém budou

prováděny VTZ, bude cca 50 m dlouhý vertikální vrt geotechnické stanice v chodbě L7. Dále je naplánováno provedení VTZ na 30 m dlouhém vrtu v chodbě L8 ve staničení cca 54 m s úklonem 45°. Tento vrt je plánován za účelem zastižení vodivé struktury která protíná chodbu kolem 70 m. Vodní tlakové zkoušky jsou naplánovány i na krátkých předvrtech pro zkušební komory v chodbě L7 nebo L8. Tyto předvrty jsou dlouhé cca 10 m, 5° ukloněné a VTZ zkoušky v nich mají zjistit hydraulické parametry hornin zkušebních komor.

Všechny vrty (s možnou výjimkou krátkých 10 m vrtů) musí být před provedením VTZ zkoušek proměřeny akustickou kamerou, aby bylo možné zvolit měřené intervaly tak, aby bylo jasné, jaké struktury jsou vrtem zastiženy a aby bylo možné zvolit správnou pozici pakrů, které izolují měřený interval, kvůli jejich případnému obtékání během VTZ. Ve vrtech by měla být provedena kavernometrie a resistivimetrie. VTZ v delších vrtech (50 m a 30 m) budou provedeny s použitím dvou pakrů, které budou izolovat zkušební intervaly. Soustava dvou pakrů bude posunována vrtem tak, aby byly postupně provedeny VTZ podél celé délky vrtu. Na dvou krátkých 10 m vrtech budou provedeny VTZ s využitím jednoho pakru umístěným v blízkosti ústí vrtu a na každém 10 m vrtu bude provedeno jedno měření hydraulických parametrů. Tento rok je naplánováno měření 8 až 16 intervalů v rámci vrtů o kumulativní délce 100 m, pokud budou tyto vrty včas k dispozici.

3.5 Transportní charakteristiky

V tomto roce řešení projektu budou připravena zkušební tělesa pro realizaci difuzních a sorpčních experimentů v rozsahu specifikovaném v Realizačním projektu prací (Bukovská et al. 2021).

3.6 Stanovení fyzikálně mechanických a geotechnických vlastností hornin laboratorně

V průběhu období březen 2022 až únor 2023 je v oblasti testování FMV hornin plánováno zejména kompletní stanovení vlastností hornin z VO vzorku, odebraného z odpalu ve staničení 10–12 m chodby L6. Odběr jednotlivých horninových kusů proběhl v první dekádě měsíce listopadu 2021 a dne 1. 12. 2021 byl tento VO transportován do laboratoří ÚGN. Na začátku ledna 2022 byla zahájena příprava jednotlivých zkušebních tělísek v množství obdobném předcházejícímu vzorku z chodby L7.

Odběr VO z chodby L4a resp. L4b, příprava zkušebních tělísek a testování FMV pak závisí na dalším postupu ražeb v rámci PVP Bukov II.

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

V průběhu roku 2022 předpokládáme v oblasti koncové části chodby L7, po zhotovení první geotechnické stanice (GS-X), realizaci těchto geotechnických prací:

 analýzu RQD parametru na vrtném jádře vrtů BGS-X/VU, BGS-X/I, BGS-X/H a BGS-X/VD, v prvních třech vrtech bude provedena rovněž prostá videoinspekce,

- ve vrtu BGS-X/VD bude realizována optická (OBI) a akustická (ABI) karotáž, v tomto vrtu bude rovněž realizováno měření napětí HM metodu hydraulického štěpení stěn vrtu (hydrofracturing),
- nad rámec projektu je v oblasti GS-X plánováno mapování stěn důlní chodby L7 v délce cca 40 m,
- v oblasti odběru hornin pro FMV ve staničení 85,8 m chodby L7, bude prováděno orientační stanovení pevnosti hornin in situ na základě korelace naměřených hodnot odrazivosti na bocích důlních děl PVP Bukov II a naměřených hodnot pevnostních parametrů hornin v laboratoři; měření bude realizováno horizontálně orientovaným Schmidtovým kladívkem na identických litologických typech hornin vybraných pro testování v laboratoři,
- měření metodou seismické tomografie mezi vrty geotechnické stanice, seismokarotáž v těchto vrtech a měření vrtním georadarem.

3.8 Geofyzikální charakterizace

Po ukončení ražeb v laboratorních chodbách L5 a L6 bude provedeno na jejich stěnách geofyzikální měření s obdobným rozsahem a metodikou jako v chodbách L7 a L8.

3.9 Seismické účinky trhacích prací

Monitorování seismických účinků trhacích prací bude pokračovat v období 3/22–2/23 v konfiguraci se 6 třísložkovými snímači. V rámci prací v chodbách L7 a L8 (ražba komor) bude průběžně docházet k reinstalaci kabeláže tak, aby nedocházelo ke kolizím s průběhem prací.

3.10 Charakterizace EDZ/EdZ

V roce 2022 budou pokračovat práce na navržení a následné finalizaci sestavy měřícího zařízení pro vodní tlakové zkoušky ke zhodnocení charakteru EDZ/EdZ tak, aby koncem roku 2022, popř. začátkem roku 2023 (únor – březen) proběhlo odzkoušení navržené měřicí sestavy v Podzemní laboratoři Josef, která je provozována Centrem experimentální geotechniky (CEG) Fakulty stavební ČVUT v Praze.

3.11 Klasifikace horninových bloků

Pro přípravu klasifikačního systému horninových bloků byly připraveny tři odborné skupiny zahrnující řešitele zakázky a experty zadavatele. Tito se sejdou na několika jednáních, kde budou řešit přípravu klasifikačního systému. Práce budou stavět na výstupech workshopu s finskou organizací POSIVA a archivních datech (přehled dostupný na sdíleném úložišti Sharepoint a v kapitole 2.8.

4 Zhodnocení horninového prostředí chodeb L7 a L8

4.1.1 Zhodnocení horninového prostředí L7

Na základě průběžného geologického mapování během ražby díla (popis čeleb), strukturně geologické prohlídky stěn chodby, hydrogeologického mapování, s využitím výsledků geofyzikálních měření provedených na stěnách chodby L7 (mělká refrakční seismika, elektrické odporová tomografie, georadar a v předstihu provedená seismická tomografie mezi vrty) a s pomocí výsledků stanovení fyzikálně-mechanických vlastností hornin, odebraných ve staničení 85,8 m bylo vytvořeno korelační schéma, které zobrazuje zjištěné skutečnosti (Elektronická příloha 1). Dle jednotlivých metod jsou vymezeny jednak úseky tvořené málo porušenou horninou s nízkou četností diskontinuit, a také intervaly, ve kterých předpokládáme zvýšenou intenzitu rozpukání a následně relativní oslabení horninového masivu.

Průběžný popis čeleb a prováděná geotechnická klasifikace výrubu vymezuje úseky nejmenšího porušení masivu v intervalech staničení 35,8–37,0 m, 57,0–62,0 m a 67,7–79,8 m. Dokumentační práce byly prováděny až od staničení 35,8 m, proto není úvodní část ražby v tomto přehledu zohledněna.

Z hlediska prezentovaných výsledků lze konstatovat, že stran porušení horninového masivu je porušení poměrně homogenní, bez výrazných poruch, většina puklin je vyhojená, nevýrazná, skrz chodbu neprůběžná a nevýznamná. Strukturně geologická prohlídka zachytila několik výraznějších struktur lokalizovaných ve staničení 6,6 (L), 13,3 (P), 20,3 (P), 20,7 (L), 23,7 (P), 59,9 (P), 62,2 (L), 62,9 (L). Výplň poruch se mění v měřítku metrů a je svou mocností silně variabilní. Většinou je tvořena kalcitem a chloritem.

Hydrogeologické mapování vymezilo místa slabých průsaků podzemní vody do trasy díla. Jedná se o velmi slabé, neměřitelné průsaky ve staničení 45 m, 48 m, 52 a 56 m v pravém boku a ve stropu a přítok v metrážích 54 m v levém boku štoly. V úseku 45–56 m tak předpokládáme přítomnost otevřených slabě zvodnělých puklin nebo foliačních ploch, které oslabují celkovou kompaktnost horninového prostředí.

Geofyzikální sledování provedené na stěnách díla mělo hloubkový dosah v prvních jednotkách metrů. Sledovány byly rychlosti šíření seismických vln a elektrické odpory hornin. Úvodní část profilových řezů je více či méně ovlivněna ražbou, od vzdálenosti cca 1 m od líce stěn je tento vliv již velmi malý a metody charakterizují horninu v původním stavu. Podle výsledků refrakční seismiky byly na základě rychlostních profilových řezů vymezeny intervaly s výskytem málo porušené horniny charakterizované střední vzdáleností diskontinuit (200–600 mm). Jedná se o následující intervaly:

•	Levá stěna:	4–13 m, 2	0–43 m, 4	48–55 m,	69–76 m,	78–90 m.
---	-------------	-----------	-----------	----------	----------	----------

• Pravá stěna: 4–16 m, 19–40 m, 43–53 m, 60–75 m, 81–90 m.

Seismická tomografická měření provedená před zahájením ražby laboratorních chodeb mezi průzkumnými vrty (Chabr et al. 2021) umožnila sestavit horizontální rychlostní řez v celém horninovém bloku zájmového prostoru. Relativní oslabení horniny bylo podle výsledků tohoto měření zachyceno v úsecích staničení 52,5–60 m a 75–89 m. V plošné tomografii zachycená zóna na úrovni 52,6–60 m je těsně na východ od průsaků (může představovat izolátor) a není jednoduše korelovatelná s dokumentovanými poruchami. Jeví se koparalelní s průběhem metamorfní foliace.

Dosavadní výsledky stanovení fyzikálně-mechanických vlastností velkoobjemového vzorku, odebraného ve staničení 85,8 m ukazují, že se horniny v tomto úseku chodby L7 vyznačují nízkými hodnotami pórovitosti a propustnosti, a naopak vysokými až velmi vysokými pevnostmi, přičemž místo odběru vzorku je situováno do úseku relativního oslabení horninového masivu (75–89 m), vymezeného výše zmíněným horizontálním rychlostním řezem.

Celkově lze horninové prostředí v místě laboratorní chodby L7 charakterizovat jako velmi málo porušené, vzdálenost diskontinuit střední. Lokálně se objevují úseky, ve kterých je vzdálenost diskontinuit malá (pod 200 mm) a hornina je zde mírně oslabená. Jedná se hlavně o úsek s indikovanými průsaky ve staničení 45–56 m s rozšířením až k metráži 63 m (křížení několika významnějších puklin). Ovšem ani v těchto úsecích se nejedná o významné porušení, kvalita horninového bloku je relativně vysoká. Ve srovnání se situací na PVP Bukov nebo v severnější oblasti (nově ražená L5) je masiv velmi kompaktní a veškeré nehomogenity se nezdají být významné.

Na základě výše uvedeného navrhujeme, aby v první fázi realizace vrtů pro ověření míst vhodných pro ražbu zkušebních komor byly provedeny dva předvrty s tím, že jeden by byl lokalizován do úseků s minimálním porušením horninového masivu (např. 35,8–37,0 m, 57,0–62,0 m nebo 67,7–79,8 m) a druhý do oblasti s možným relativním oslabením masivu (např. 45,0–56,0 m). Na základě vyhodnocení kvality hornin vrtného jádra obou vrtů by pak byla upřesněna lokalizace dalších čtyř vrtů z celkových šesti, předpokládaných v chodbě L7.

4.1.2 Zhodnocení horninového prostředí L8

Na základě průběžného geologického mapování během ražby díla (popis čeleb), strukturně geologické prohlídky stěn chodby, hydrogeologického mapování, s využitím výsledků geofyzikálních měření provedených na stěnách chodby L8 (mělká refrakční seismika, elektrické odporová tomografie, georadar a v předstihu provedená seismická tomografie mezi vrty) bylo vytvořeno korelační schéma, které zobrazuje zjištěné skutečnosti (Elektronická příloha 2). Dle jednotlivých metod jsou vymezeny jednak úseky tvořené málo porušenou horninou s nízkou četností diskontinuit, a také intervaly, ve kterých předpokládáme zvýšenou intenzitu rozpukání, a tudíž relativní oslabení horninového masivu.

Petrograficky převažují v chodbě L8 migmatity střídané polohami migmatitizovaných biotitamfibolických pararul, migmatitizovaných amfibolitů a v různé míře migmatitizovaných epidotických amfibolitů. Zároveň jsou zde poměrně homogenně zastoupeny čočky granátických amfibolitů (obvykle o rozměrech 0,2–1,0 m).

Průběžný popis čeleb a prováděná geotechnická klasifikace výrubu vymezuje úseky nejmenšího porušení masivu v intervalech staničení 19–22, 30–36, 51–69, 73–77, 84–87 m. Dokumentační práce byly prováděny až od staničení 11,3 m, proto není úvodní část ražby v tomto přehledu zohledněna.

Z hlediska prezentovaných výsledků lze konstatovat, že stran porušení horninového masivu je porušení poměrně homogenní, bez výrazných poruch, většina puklin je vyhojená, nevýrazná, skrz chodbu neprůběžná a nevýznamná. Strukturně geologická prohlídka zachytila několik výraznějších struktur lokalizovaných ve staničení 55,3, 69,8 a 87,5 m. Výplň poruch se mění v měřítku metrů a je svou mocností silně variabilní. Většinou je tvořena kalcitem a chloritem,

případně epidotem, častý je i výskyt sulfidů. Jedná se maximálně o střižné pukliny, v žádném případě se nejedná o zlomy.

Hydrogeologické mapování vymezilo místa slabých průsaků podzemní vody do trasy díla. V rámci prohlídky provedené v srpnu 2021 byly slabé neměřitelné průsaky lokalizovány ve staničení 56,5 m, 58,5 m a 66,5 m v pravém boku a ve stropu a přítok v metrážích 59 m, 60 m a 69,2 m v levém boku štoly. Následné šetření v říjnu 2021 popisuje relativně významný průsak s intenzitou 1,5 ml/s ve staničení 56 m (oproti srpnu došlo k nárůstu vydatnosti). Průsaky v okolí metráže 60 m vymizely. V úseku 87,5–88 m je k říjnu lokalizován slabý neměřitelný průsak. Přítomnost alespoň lokálně zvodnělých puklin vzhledem k výše uvedenému předpokládáme v okolí staničení 56 m.

Geofyzikální sledování provedené na stěnách díla mělo hloubkový dosah v prvních jednotkách metrů. Sledovány byly rychlosti šíření seismických vln a elektrické odpory hornin. Úvodní část profilových řezů je více či méně ovlivněna ražbou, od vzdálenosti cca 1 m od líce stěn je tento vliv již zanedbatelný a metody charakterizují horninu prakticky v původním stavu. Podle výsledků refrakční seismiky byly na základě rychlostních profilových řezů vymezeny intervaly s výskytem málo porušené horniny charakterizované střední vzdáleností diskontinuit (200–600 mm). Jedná se o následující intervaly:

- Levá stěna: 4–13 m, 15–38 m, 41–51 m, 58–67 m, 71–89 m.
- Pravá stěna: 8–13 m, 15–21 m, 24–54 m, 60–66 m, 69–87 m.

Seismická tomografická měření provedená před zahájením ražby laboratorních chodeb mezi průzkumnými vrty umožnila sestavit horizontální rychlostní řez v celém horninovém bloku zájmového prostoru. Relativní oslabení horniny bylo podle výsledků tohoto měření zachyceno jednak v úvodní části chodby v rozmezí metráží 0–10 m, dále pak je patrný méně výrazný pokles rychlostí v okolí staniční 50–68 m. Zde se ovšem jedná o relativně malé snížení (seismické rychlosti neklesají pod 5600 m/s), stále lze hovořit o kvalitním masivu.

Celkově lze horninové prostředí v místě laboratorní chodby L8 charakterizovat jako velmi málo porušené, vzdálenost diskontinuit střední. Lokálně se objevují úseky, ve kterých je vzdálenost diskontinuit malá (pod 200 mm) a hornina je zde mírně oslabená. Jedná se hlavně o úsek s indikovanými průsaky v okolí staničení 56 m (křížení několika významnějších puklin). Ovšem ani v těchto úsecích se nejedná o významné porušení, kvalita horninového bloku je relativně vysoká. Ve srovnání se situací na PVP je masiv velmi kompaktní a veškeré nehomogenity se nezdají být významné.

5 Shrnutí

V prvním roce řešení zakázky Geologická a geotechnická charakterizace horninového prostředí – PVP Bukov II byly realizovány zejména dokumentační práce v oblasti nově vyražených chodeb L8 (0–90 m), L7 (0–90m), dílčí práce v L5 (0–73 m) a začátku L6 (~0–20 m). Práce se soustředily na základní popis čeleb v průběhu ražby díla, dokumentaci stěn a čelby kompletně vyražené chodby (L7, L8), realizace geofyzikálních měření na stěnách díla, průběžný monitoring seismických účinků trhacích prací a rešeršní práce pro tvorbu klasifikačního systému pro kvalitativní hodnocení raženého masivu.

Pro prostředí stávajících chodeb L7 a L8 jsou charakteristické pozvolné litologické přechody podél ploch foliace mezi amfibolity (≥80 % amfibolu) a pararulami. Tyto litologie jsou v různé míře migmatitizovány a jejich velká část přechází až do migmatitu. Ze strukturního hlediska jsou horniny poměrně homogenně rozpukané, jen výjimečně jsou přítomny drobné zlomy. Stavbě dominuje foliace upadající pod středními úhly k ~JZ. Z hydrogeologického hlediska jsou přítoky do chodeb L7 a L8 nevýznamné, jen výjimečně je možné odebrat vzorky pro charakterizaci vod. Průsaky se v čase i prostoru mírně mění.

Z hlediska petrografického (viz Tab. 1) je VO vzorek, odebraný z odpalu ve staničení 85,8 m chodby L7 tvořen převážně amfibolitem (60 % z celkového počtu zkušebních tělísek), z menší části pak biotit-amfibolickou pararulou (40 % z celkového počtu zkušebních tělísek).

Na základě údajů, uvedených v kap. 2.5. lze konstatovat, že stanovené FMV VO vzorků ze staničení 85,8 m chodby L7 a staničení 43,2 m chodby L8 jsou zcela v souladu s obecně známými a publikovanými materiálovými vlastnostmi krystalických hornin obdobného mineralogického složení a geneze a odpovídají poznatkům, zjištěným v jiných partiích dolu Rožná (Bukovská et al. 2020, Souček et al. 2018).

Konkrétně lze studované horniny z VO vzorků z chodeb L7 a L8 označit v intaktním stavu jako horniny s velmi nízkou pórovitostí a propustností pro vodu a plyny. Ve smyslu známých pevnostních klasifikací (např. Bieniawski 1989 nebo Hoek a Brown 1997) se pak jedná o horniny s vysokou až extrémně vysokou pevností.

Geofyzikální charakterizace prostředí se v průběhu prvního roku běhu projektu soustředila na práce v laboratorních chodbách L7 a L8, které byly zkoumány s využitím komplexu průzkumných metod. Detailní vyhodnocení terénních měření přineslo detailní pohled na geomechanický stav horninového masivu v blízkosti stěn nově budovaného hornického díla.

V průběhu dalšího roku řešení (03/22–02/23) budou tyto práce pokračovat s harmonogramem odpovídajícím postupu prací v podzemí a ražbě díla, kterou ze strany řešitelského kolektivu nelze ovlivnit. Předpokladem je dokončení charakterizačních prací na chodbách L5 a L6, zkušebních komorách v L7 a L8, pokračování laboratorních analytických prací a prací na klasifikačním systému horninového masivu, které budou navazovat na workshop s finskými kolegy z POSIVA (online 24. 2. 2022).

Reference

- ANNAN A. P. (2003): Ground penetration radar principles, procedures & aplications, Sensor&Software.
- AZWIN, I.N. ROSLI SAAD, NORDIANA M. (2013): Applying the Seismic Refraction Tomography for Site Characterization, APCBEE Procedia 5 (2013) 227 231, Elsevier B.V.
- BARTON N., LIEN R., LUNDE J. (1974). Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. Rock Mechanics 6(4), 189-236.
- BARTOŇ J., MÁTL V. (2018): Monitoring vodních zdrojů, vodních ploch a vodotečí v ploše průzkumného území Horka, Hrádek, Kraví hora Závěrečná zpráva pro lokalitu Kraví Hora. ZZ 287/2018, SÚRAO, Praha.
- 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.
- BUKOVSKÁ Z., BURIÁNEK D., DOBEŠ P., FRANĚK J., HALODOVÁ P., HANÁK J., HOLEČEKOVÁ P., HRDLIČKOVÁ K., RUKAVIČKOVÁ L., SOEJONO I., VERNER K. (2015): Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov. – TZ 1/2015. Archiv SÚRAO.
- BUKOVSKÁ Z., ŠVAGERA O., CHABR T., LEICHMANN J., SOSNA K., SOUČEK K., VAVRO M., ZUNA M., NAVRÁTIL P., BOHDÁLEK P., BOŠKOVÁ M., DOBEŠ P., FILIPSKÝ D., FRANĚK J., GALEKOVÁ E., GEORGIOVSKÁ L., HANÁK J., HAVLOVÁ V., HLISNIKOVSKÝ K., HOLECZY D., JANKOVSKÝ F., JAROŠ M., JELÍNEK J., 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., 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., 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
- 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.
- GRIMSTAD E. AND BARTON, N. (1993): Updating Q-systém for NMT. In: KOMPEN, R., OPSAHL, O.A. AND BERG, K.R. (eds.) (1993). Proceedings of the International Symposiumon Sprayed Concrete, Fagernes. Norwegian Concrete Association, Oslo, 46-66.

- HAGROS A. (2006). HRC (Host Rock Classification) systém for Nuclear Waste Disposal in Crystaline Bedrock, Academic Dissertation. Helsinky.
- HANÁK J., CHLUPÁČOVÁ M., ONDRA P. (2017): Stanovení petrofyzikálních charakteristik horninového prostředí pro území potenciálních lokalit HÚ (závěrečná zpráva). TZ 103/2017, Archiv SÚRAO.
- HEIKKINEN E., KANTIA P., LEHTIMÄKI T., SILVAST M., WILJANEN B. (2010): EDZ assessment in various geological environments using ground penetrating radar method. Posiva Working Report 2010-04, 73 p.
- HOEK E., BROWN E.T. (1997): Practical estimates of rock mass strength. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 34, 8, 1165–1186.
- CHABR T., FILIPSKÝ D. (2021): Zjištění prostorové homogenity horninového prostředí před provedením trhacích prací pomocí seismické tomografie (závěrečná zpráva) TZ 548/2021, Archiv SÚRAO.
- CHMELAŘ J. (2004): Hydrogeologické zhodnocení průzkumného vrtu MJe-1 Moravecké Janovice. GEOCECH, Nové Město na Moravě. MS Česká geologická služba, Praha.
- INTELLIGENT RESOURCES INC. (2021), Rayfract manual, http://rayfract.com.
- IRVING J. & KNIGHT R. (2003): Removal of wavelet dispersion ground-penetrating radar data. Geophysics vol. 68, no. 3 (p. 960-970).
- JAROŠ M., NAVRÁTIL P., PATOČKA M., HLISNIKOVSKÝ K., LEICHMANN J., ZEMAN J. (2021): Vyhodnocení průzkumných pilotních vrtů (S-28, S-29, S-30, S-32 a S-33) a geologická interpretace zájmového území PVP Bukov II. etapa. – TZ 541/2021, Archiv SÚRAO.
- KOKAVCOVÁ M. (2017): Hydrogeologické poměry dolu Rožná s ohledem na jeho zatápění. Diplomová práce. [online]. Dostupné z: https://theses.cz/id/g9xbtg/, [cit. 2022-01-19]. Masarykova univerzita Přírodovědecká fakulta, Brno.
- LEAKE, B. E., WOOLLEY, A. R., ARPS, C. E. S., BIRCH, W. D., GILBERT, M. C., GRICE, J. D., HAWTHORNE, F. C., KATO, A., KISCH, H. J., KRIVOVICHEV, V. G., LINTHOUT, K., LAIRD, J., MANDARINO, J. A., MARESCH, W. V., NICKEL, E. H., ROCK, N. M. S., SCHUMACHER, J. C., SMITH, D. C., STEPHENSON, N. C. N., YOUZHI, G. (1997). Nomenclature of amphiboles: Report of the subcommittee on amphiboles of the international mineralogical association, commission on new minerals and mineral names. – American Mineralogist. https://doi.org/10.1180/minmag.1997.061.405.13
- LOKE M.H. (2004): 2-D and 3-D electrical imaging surveys, www.geoelectrical.com
- MORIMOTO, N. (1988). Nomenclature of Pyroxenes. Mineralogy and Petrology. https://doi.org/10.1007/BF01226262
- NOHÁL M. (ED.) (2019): Geologicko strukturní mapa rudního pole Rožná Olší v úrovni cca 600 m pod povrchem (12. patro dolu Rožná = 10. patro dolu Olší). – MS DIAMO s.p., o.z. GEAM
- OSYPOV K. (2001): REFRACTION TOMOGRAPHY: A Practical Overview of Emerging Technologies, CSEG Recorder, Feb 2001, Vol. 26, No.02
- 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's Magnetic Interior. IAGA Special Sopron Book Series, vol. 1. Springer, pp. 292–301.

POLÁK M., VYLAMOVÁ P., MUSIL R., VENCL M. (2019): Hydrogeologický a hydrochemický monitoring podzemních a důlních vod v prostoru PVP Bukov – Vodní tlakové zkoušky. – TZ 427/2019, Archiv SÚRAO.

SANDMEIER, K. J. (2021), REFLEXW Manual, version 9.5, www.sandmeier-geo.de

- SOUČEK K., VAVRO M., STAŠ L., KALÁB Z., KONÍČEK P., GEORGIOVSKÁ L., KALÁB T., KONEČNÝ P., KOLCUN A., KRÁLOVÁ L., KUBINA L., LEDNICKÁ M., MALÍK J., MARTINEC P., PTÁČEK J., VAVRO L., WACLAWIK P., ZAJÍCOVÁ V. (2018): Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov - část II Geotechnická charakterizace. – TZ 221/2018, Archiv SÚRAO.
- SVOBODA J., KRUIS J., KREJČÍ T., RUKAVIČKOVÁ L., VEČERNÍK P. (2020): Interakční experiment Průběžná zpráva etap 7-9 č.2. TZ 478/2020, Archiv SÚRAO.
- SVOBODA J., RUKAVIČKOVÁ L., VEČERNÍK P. (2019): Interakční experiment Průběžná zpráva etap 7-9 č.1. TZ 417/2019, Archiv SÚRAO.
- SVOBODA J., VAŠÍČEK R., RUKAVIČKOVÁ L., ŘIHOŠEK J., VEČERNÍK P. (2021): Interakční experiment – Průběžná zpráva etap 7-9 č. 3. – TZ 537/2021, Archiv SÚRAO.
- ŠENK B. (2016): Pilotní charakterizace horninového masívu in situ v podzemním výzkumném pracovišti Bukov I. etapa – Vybudování podzemního výzkumného pracoviště Bukov – Závěrečná zpráva o průběhu výstavby PVP Bukov – Příloha X: Problematika vodní bilance ložiska Rožná před ukončením těžby. Archiv SÚRAO.
- TESAŘ O. (1989): Klasifikace skalních a poloskalních hornin pro podzemní stavby. Autoreferát k disertační práci. Věd. rada UK Praha, 23 s.
- UHLÍK J., KRÁLOVCOVÁ J., BAIER J., MILICKÝ M., GVOŽDÍK L., CHUDOBA J., ŘÍHA J., RUKAVIČKOVÁ L. (2018): Hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště Pasport detailního Modelu – lokalita Kraví Hora. – TZ 336/2018, Archiv SÚRAO.
- VYLAMOVÁ P., KOCMAN T., MUSIL R., PRŮCHA P. (2020): Hydrogeologický a hydrochemický monitoring podzemních a důlních vod v prostoru PVP Bukov, etapová zpráva za rok 2019. TZ 487/2020, Archiv SÚRAO.
- VYLAMOVÁ P., KOCMAN T., MUSIL R., PRŮCHA P. (2021): Hydrogeologický a hydrochemický monitoring podzemních a důlních vod v prostoru PVP Bukov, etapová zpráva za rok 2020. TZ 545/2021, Archiv SÚRAO.
- ZIELINA J. (2004): Závěrečná zpráva hydrogeologického průzkumu, Jan Berkovec, Mitrov Krčma. ENVIREX, s.r.o., Nové Město na Moravě. MS Česká geologická služba, Praha.
- ZUNA M., HAVLOVÁ V., JANKOVSKÝ F., HOFMANOVÁ E., KOCAN K., ŠVAGERA O., KRYL J., ZELINKOVÁ T., HOLEČEK J., ŘIHOŠEK J., SOSNA K., KOŘALKA S., GVOŽDÍK L. (2021): Výzkum puklinové konektivity v PVP Bukov - Průběžná zpráva č. 3. – TZ 551/2021, Archiv SÚRAO.
- ZUNA M., HAVLOVÁ V., JANKOVSKÝ F., ŠVAGERA O., KRYL J., ZELINKOVÁ T., HOLEČEK J., SOSNA K., KOŘALKA S., GVOŽDÍK L. (2020): Výzkum puklinové konektivity v PVP Bukov - Průběžná zpráva č. 2. – TZ 521/2020, Archiv SÚRAO.

Technické normy a standardy:

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



info@surao.cz | www.surao.cz