

Technická zpráva číslo 191/2017

**KOMPLEXNÍ GEOLOGICKÁ
CHARAKTERIZACE PROSTORŮ
PVP BUKOV**

ZÁVĚREČNÁ ZPRÁVA

Autoři: Zita Bukovská, Kryštof Verner
a kolektiv

Česká geologická služba
Praha, červen 2017

Název projektu: Výzkumná podpora pro bezpečnostní hodnocení hlubinného úložiště

Název dílčího projektu: Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov

Závěrečná zpráva

Evidenční číslo objednatele: 4.1.5.1 /č.j. ESS: SURAO-2014-2304

Evidenční číslo poskytovatele: PB-2017-ZL-U2304-004-BUKOV

ŘEŠITELÉ:

Česká geologická služba ¹, Ústav geoniky Akademie věd ČR v.v.i. ², ÚJV Řež, a.s. ³, SG Geotechnika, a.s. ⁴

Autoři: Zita Bukovská ¹, Kryštof Verner ¹

Autorský kolektiv: Lukáš Brázda³, David Buriánek¹, Petr Dobeš¹, Barbora Dudíková Schulmannová¹, Vojtěch Erban¹, Jan Franěk¹, Patricie Halodová¹, Jaromír Hanák, Václava Havlová³, Jan Holeček¹, Ivana Jačková¹, Jan Jelének¹, Vlastislav Kašpar³, Kateřina Kolomá³, Veronika Kopačková¹, Lucie Koucká¹, Petr Kučera⁴, František Laufek¹, Zdeňka Lněničková¹, Julia Kočergina¹, Petr Kučera⁴, Oldřich Myška¹, Radmila Nahodilová¹, Ivona Novotná⁴, Jaroslava Pertoldová¹, Lenka Rukavičková¹, Igor Soejono¹, Ondřej Švagera¹, Filip Tomek, František Veselovský¹, Milan Zuna³

Schválil				
Funkce	Instituce	Jméno	Datum	Podpis
Osoba poskytovatele zodpovědná za technické řešení	ČGS	RNDr. Kryštof Verner, Ph.D		
Osoba poskytovatele zodpovědná za koordinaci projektu	ÚJV Řež, a. s.	RNDr. Václava Havlová, PhD		
Osoba objednatele zodpovědná za koordinaci projektu	SÚRAO	Ing. Antonín Vokál, CSc.		



ČESKÁ
GEOLOGICKÁ
SLUŽBA



SG Geotechnika
An Arcadis Company



SÚRAO

Obsah

1 Úvod	28
2 Multidisciplinární geologická charakteristika horninového prostředí PVP Bukov	31
2.1 Geologický popis PVP Bukov	31
2.1.1 Geologická charakteristika studovaného území.....	31
2.1.2 Petrografická analýza horninového prostředí a vrtných prací	33
2.1.3 Geochemická charakteristika horninového prostředí	44
2.1.4 Mineralogická a geochemická analýza puklinových mineralizací	50
2.1.5 Strukturní charakteristika horninového prostředí	66
2.1.6 Analýza anizotropie magnetické susceptibility	82
2.1.7 Analýza přednostní orientace pomocí difrakce zpětně odražených elektronů (EBSD) 86	
2.1.8 Geologická mapa 1 : 10 000 Bukov	91
2.2 Stanovení petrofyzikálních charakteristik horninového prostředí PVP Bukov	95
2.2.1 Přehled odebraných a zpracovaných vzorků	95
2.2.2 Metodika měření	100
2.2.3 Výsledky měření.....	104
2.2.4 Zhodnocení výsledků	135
2.2.5 Závěry petrofyzikálních analýz	145
2.3 Spektrální analýza vrtného jádra	147
2.3.1 Úvod	147
2.3.2 Úvod do obrazové spektroskopie	147
2.3.3 Metodika zpracování vrtného jádra.....	148
2.3.4 Výsledky.....	154
2.3.5 Závěr.....	158
2.4 Hydrogeologické mapování	159
2.4.1 Úvod	159
2.4.2 Hydrogeologické poměry v PVP Bukov a v jeho širším okolí	159
2.4.3 Režimní měření v PVP Bukov a na povrchu lokality	172
2.4.4 Chemické složení podzemních vod v dole Rožná a celková představa o vývoji chemického složení podzemních vod na lokalitě.....	185
2.4.5 Závěry	192
2.5 Stanovení transportních charakteristik horninového prostředí PVP Bukov	194

2.5.1	Úvod	194
2.5.2	Metodika měření	195
2.5.3	Odběr vzorků horniny – příprava vzorků.....	210
2.5.4	Výsledky měření.....	212
3	3D geovědní modely PVP Bukov	261
3.1	Globální (regionální) 3D strukturně geologický model	263
3.1.1	Charakteristika vstupních dat	263
3.1.2	Popsatelnost a predikovatelnost geologické stavby.....	270
3.1.3	Věrohodnost globálního 3D strukturně – geologického modelu	274
3.2	Detailní 3D model PVP.....	275
3.3	Vizualizace strukturní dokumentace ve 3D	279
3.4	3D geomechanický model	281
3.4.1	Tvorba 3D geomechanického modelu v prostředí Midas	281
3.4.2	Metodika provedených analýz	289
3.4.3	Výsledky.....	294
4	Závěrečné shrnutí komplexní geologické charakteristiky PVP Bukov.....	306
5	Seznam literatury a použitých podkladů.....	311
6	Přílohy.....	322
	Příloha 14	338

Seznam obrázků:

Obr. 1 Schematický plán PVP Bukov s vyznačením jednotlivých rozrážek a vrtů (zdroj: DIAMO s.p.)	30
Obr. 2 Schematická geologická mapa širšího okolí PVP Bukov: (a) pozice zájmového území v oblasti severovýchodní části Českého masivu; (b) schematická mapa průběhu regionálních metamorfních staveb v oblasti strážeckého moldanubika a vyznačení lokality PVP Bukov (Verner et al. 2009)	32
Obr. 3 Grafické znázornění složení minerálů z hlavních horninových typů: (a-b) klasifikace amfibolu (Leake et al. 1997), (c) klasifikace pyroxenů (Morimoto et al. 1988), (d) klasifikace biotitů, (e) klasifikace živců	34
Obr. 4 Vápenatosilikátová hornina, vyrostlice pyroxenu jsou uloženy v alterovaném plagioklasu, XPL.....	35
Obr. 5 Biotitická pararula až biotitická břidlice (restit) na obrázku dominují lupínky biotitu v malém množství je přítomen křemen, XPL	35
Obr. 6 Původní zrno granátu v migmatitizované pararule zcela zkonsumované biotitem (BSE)	36

Obr. 7 Alterace biotitu v migmatizované pararule (BSE)	36
Obr. 8 Texturní rozdíly mezi dominantními typy migmatitů: a - restitická poloha s převahou biotitu (S2E), b –melanokratiní stromatitický migmatit (S2N), c - leukokratiní stromatitický migmatit (S2O)	37
Obr. 9 Texturní rozdíly mezi dominantními typy amfibolitů: a – migmatizovaný amfibolit (S1A), b –amfibolit (S1B), c – hydrotermálně alterovaný amfibolit (S1C)	37
Obr. 10 Porfýroblast granátu v migmatizovaném amfibolitu zčásti nahrazovaný biotitem a plagioklasem. Následná alterace způsobuje rozklad biotitu na směs K-živce, albitu a chloritu, BSE	38
Obr. 11 Kontakt mafické jemnozrnné restitické enklávy s amfibolitem, BSE	38
Obr. 12 Biotitický amfibolit světlá zrna plagioklasu jsou obklopena biotitem a amfibolem, PPL	39
Obr. 13 Amfibolit tvořený většími poikyloblasty amfibolu a drobnými zrny plagioklasu, XPL	39
Obr. 14 Nahrazování původních izometrických zrn titanitu druhotným ilmenitem, uzavřených v granátu (Grt) v amfibolitu, BSE	40
Obr. 15 Porfýroblast granátu v amfibolitu obsahuje množství inkluzí ilmenitu (titanitu), amfibolu a křemene. Okraj granátu je konzumován biotitem a plagioklasem, BSE	40
Obr. 16 Amfibolický pegmatit, plagioklasy jsou místy postiženy sericitizací a kaolinizací amfibol je částečně zatlačovaný chloritem, XPL	41
Obr. 17 Hydrotermálně alterovaná amfibol-biotitická parrula prorážena žilkou kalcitu, XPL	42
Obr. 18 Hydrotermální žíla v migmatitu. Střední část žíly tvoří kalcit a okraj jsou pak budovány křemenem a albitem, XPL	42
Obr. 19 Biotitický migmatit s žilkami kalcitu, tuto minerální výplň často doprovází rudní mineralizace druhotného pyritu, BSE	43
Obr. 20 Krystalizace druhotného pyritu v intergranulárních prostorech v amfibolitu, BSE	43
Obr. 21 Sekundární přeměny migmatitů: a - typický stromatitický migmatit (S2L), b – kataklazovaný migmatit prorážený hydrotermálními žilami (S2J), c – intenzivně deformovaný a hydrotermálně alterovaný migmatit (S2F)	43
Obr. 22 Vtroušené sulfidy v migmatitu: hlavní minerální komponenty v leukosomu jsou plagioklas (plg), křemen (qtz) a K-živec. Živce jsou postiženy sericitizací. Chloritizovaný biotit (chl bt) je hlavní složkou restitu, jeho alterace jsou doprovázeny produkcí sekundárního titanitu (sek. tnt) a apatitu (ap). Další akcesorie jsou zirkon (zrn), monazit (mnz), pyrit (py), BSE	44
Obr. 23 Detail oscilační zonálnosti v obsahu kobaltu v pyritu (py). Pyrit obsahuje i drobné inkluze pyrhotinu a chalkopyritu, BSE	44
Obr. 24 Typické ukázky (a) biotitického migmatitu (R12/7) a (b) slabě migmatizovaného amfibolitu (R12/1), obě mikrofotografie byly pořízeny v XPL	45
Obr. 25 Chemické složení hlavních horninových typů: (a) P-Q diagram (Debon a Le Fort 1983), (b) B-A diagram (Debon a LeFort 1983) to = tonalit, gd = granodiorit, ad = adamellit, gr = granit, dq = Qtz diorit, mzdq = Qtz monzodiorit, mzq = Qtz monzonit, sq = Qtz syenite, go =	

gabbro, mzgo = monzogabbro, mz = monzonit, s = syenit., (c) diagram A/CNK vs. A/NK (Shand 1943), (d) trojúhelník AFM (Irvine a Baragar 1971)	47
Obr. 26 Variační diagramy SiO ₂ vs. vybrané hlavní a stopové prvky ve studovaných horninách	48
Obr. 27 Vybrané stopové prvky normalizované (a) obsahy prvků pro primitivní plášť (McDonough a Sun 1995), (b) obsahy REE normalizované chondritem (Boynton 1984), šedá plocha reprezentuje celkový rozsah chemického složení studovaného souboru.....	49
Obr. 28 Geotektonické klasifikační diagramy pro amfibolity: (a) diskriminační Th-Hf/3-Ta diagram (Meschede, 1986): AI, AII = vnitrodeskové alkalické bazalty; AII, C = vnitrodeskové tholeitické bazalty; B = P-typ MORB; D = N-typ MORB; C, D = bazalty vulkanických oblouků, (b) diskriminační Zr/4-2Nb-Y diagram (Wood 1980)	50
Obr. 29 Kvantitativní analýza hlavních prvků Ca-Mg-Fe-Mn v karbonátových žilách z PVP Bukov	55
Obr. 30 Obsah prvků vzácných zemin v žilných karbonátech z PVP Bukov normalizovaný obsahem REE v chondritech (Anders a Grevesse 1989).....	56
Obr. 31 Histogramy teplot homogenizace a salinity fluidních inkluzí vodného roztoku z žilných karbonátů z PVP Bukov	57
Obr. 32 Teplota homogenizace vs. salinita fluidních inkluzí vodného roztoku v karbonátových žilách z PVP Bukov. V dolní části grafu jsou vyneseny hodnoty salinity v jednofázových kapalných inkluzích	58
Obr. 33 Izotopové složení uhlíku a kyslíku v karbonátových žilách z prostor PVP Bukov	60
Obr. 34 Izotopové složení Sr v karbonátech z PVP Bukov a z možných zdrojových hornin a fluid	60
Obr. 35 Izotopové složení Sr vs. izotopové složení O v žilných karbonátech z PVP Bukov ..	61
Obr. 36 Izotopové složení síry pyritů z žil a puklin z PVP Bukov.....	61
Obr. 37 Diagram četnosti výskytu minerálů v produktech alteračních procesů z alteračních zón z PVP Bukov.....	62
Obr. 38 Model pozdního časově-teplotního vývoje biotitické pararuly na uranovém ložisku Rožná podle analýzy štěpných stop v apatitech (převzato z Kříbka a Hájka 2005).....	65
Obr. 39 Strukturně geologická dokumentace v PVP – BZ ₁ -XII v roce 2016	66
Obr. 40 Rozsah a členění detailních strukturních map PVP Bukov (viz Příloha 4 - Příloha 12)	67
Obr. 41 Starší strmá stavba v BZ ₁ -XII, v pravé části fotografie vrásněná (spodní hrana fotky cca 1,5 m)	68
Obr. 42 Naložená metamorfní foliace středního sklonu k JZ (BZ ₁ -XII, u čelby v říjnu 2015).69	
Obr. 43 Naložená subhorizontální metamorfní foliace v ZK-1, jižní stěna	69
Obr. 44 Asymetrická vrásové struktura částečně transponované strmé stavby do mírně ukloněných ploch k JJV (ZK-1, jižní stěna).....	70
Obr. 45 Vrásová struktura (ZK-1, severní stěna, spodní hrana fotky cca 20 cm)	70

Obr. 46 3D vizualizace vrásové struktury v ZK-1, jižní stěna (spodní hrana cca 1,5 m)	71
Obr. 47 Strukturní mapa PVP Bukov v rozsahu přístupové chodby BZ-XIIJ a BZ ₁ -XII, zkušební rozrážky ZK-1, experimentálních rozrážek ZK-2 a ZK-3, orientační diagram prvků duktilní tektoniky (plochojevná projekce na spodní polokouli)	72
Obr. 48 Zlomová struktura ~SV–JZ průběhu s minerální výplní (překop BZ1-XII, metráž 74 m, severní stěna)	74
Obr. 49 Extenzní puklina (zapadající do prostoru překopu) s výplní epidotu a chloritu (BZ ₁ -XII, metráž 74,5 m, jižní stěna, spodní hrana foto 1,5 m).....	74
Obr. 50 Striace na zlomové ploše s chloritem a hematitem (BZ ₁ -XII).....	75
Obr. 51 Pohled na hematitizovanou poruchu procházející východní stěnou ZK-2, v délce cca 8 m	75
Obr. 52 Drobné vertikální pukliny vyplněné kalcitem (BZ1-XII, severní stěna, spodní hrana fotky 20 cm).....	76
Obr. 53 Hematitizované poruchy a jejich okolí v BZ-XIIJ (185 m, východní stěna).....	77
Obr. 54 Strukturní mapa významných poruchových zón v oblasti PVP Bukov, orientační diagramy ploch struktur křehkého porušení s indikátory pohybu (zlomy, zlomové zóny a střížné pukliny; vlevo); orientační diagram pólů ploch extenzních puklin a růžicový diagram četnosti extenzních puklin v jednotlivých směrech (vpravo). Číslo u poruchové struktury odpovídá pořadí v tabulce 3.	78
Obr. 55 Střížné zóny v poruše na metráži 69-70 m (BZ ₁ -XII, jižní stěna, spodní hrana fotky 40 cm).....	79
Obr. 56 Střížná porucha B-XIIJ (305 m, východní stěna).....	79
Obr. 57 Odběr jádra na analýzu AMS pomocí elektrické vrtačky v rozrážce ZK-1 (jižní stěna)	82
Obr. 58 Horninový masiv po odběru jádra B8 (B8_1 a B8_2) v rozrážce BZ1-XII	83
Obr. 59 (a) Histogram hodnot magnetické susceptibility (Km) pro lokality R12-1 až R12-6, výsledky termomagnetické analýzy jako funkce teploty pro reprezentativní vzorky (b) R12-2 a (c) R12-4	84
Obr. 60 (a) Diagram stupně anizotropie (P) vs. střední magnetické susceptibilita Km. (b) Diagram hodnot tvarového parametru (T) a stupně anizotropie (P). (c) Orientační diagramy projekce magnetické foliace a lineace. Plochojevná projekce na spodní polokouli.	86
Obr. 61 Příklad místa odběru orientovaného vzorku EB3 pro analýzu EBSD u původního odběru jádra B3.....	88
Obr. 62 Krystalografická přednostní orientace minerálů vzorku EB1	89
Obr. 63 Krystalografická přednostní orientace minerálů vzorku EB4	89
Obr. 64 Krystalografická přednostní orientace minerálů vzorku EB5	90
Obr. 65 Vzorky na měření rezistivity (elektrické konduktivity) s plazmaticky (Cu) upravenými čely jader.....	103

Obr. 66 Pararuly (RUL), vrty S-1,S-2,S-3,S-4 – pórovitost, histogram a statistické parametry	107
Obr. 67 Pararuly (RUL), vrty S-1,S-2,S-3,S-4 – mineralogická hustota, histogram a statistické parametry	107
Obr. 68 Pararuly (RUL), vrty S-1,S-2,S-3,S-4 – magnetická susceptibilita, histogram a statistické parametry	108
Obr. 69 Migmatity (MGM), vrty S-1,S-2,S-3,S-4 – pórovitost, histogram a statistické parametry	108
Obr. 70 Migmatity (MGM), vrty S-1,S-2,S-3,S-4 – mineralogická hustota, histogram a statistické parametry	109
Obr. 71 Migmatity (MGM), vrty S-1,S-2,S-3,S-4 – magnetická susceptibilita, histogram a statistické parametry	109
Obr. 72 Amfibolity (AMF), vrty S-1,S-2,S-3,S-4 – pórovitost, histogram a statistické parametry	110
Obr. 73 Amfibolity (AMF), vrty S-1,S-2,S-3,S-4 – mineralogická hustota, histogram a statistické parametry	110
Obr. 74 Amfibolity (AMF), vrty S-1,S-2,S-3,S-4 – magnetická susceptibilita, histogram a statistické parametry	111
Obr. 75 Ruly (RUL), vzorky B1, B2, B3 a B4 – pórovitost, histogram a statistické parametry	111
Obr. 76 Ruly (RUL), vzorky B1, B2, B3 a B4 – mineralogická hustota, histogram a statistické parametry	111
Obr. 77 Ruly (RUL), vzorky B1, B2, B3 a B4 – magnetická susceptibilita, histogram a statistické parametry	112
Obr. 78 Migmatity (MGM), vzorky B1, B2, B3 a B4 – pórovitost, histogram a statistické parametry	112
Obr. 79 Migmatity (MGM), vzorky B1, B2, B3 a B4 – mineralogická hustota, histogram a statistické parametry	113
Obr. 80 Migmatity (MGM), vzorky B1, B2, B3 a B4 – magnetická susceptibilita, histogram a statistické parametry	113
Obr. 81 Amfibolity (AMF), vzorky B1, B2, B3 a B4 – magnetická susceptibilita, pórovitost a mineralogická hustota, histogram a statistické parametry	114
Obr. 82 Lokalita B5, jádro B5_1 a B5_2 – hustotní parametry, hloubková závislost.....	115
Obr. 83 Lokalita B6, jádro B6_1, B6_2 a B6_3 – hustotní parametry, hloubková závislost	116
Obr. 84 Lokalita B7, jádro B7_1 a B7_2 – hustotní parametry, hloubková závislost.....	118
Obr. 85 Lokalita B8, jádro B8_1 a B8_2 – hustotní parametry, hloubková závislost.....	119
Obr. 86 Lokalita B9, jádro B9_1 a B9_2 – hustotní parametry, hloubková závislost.....	120
Obr. 87 Lokalita B10, jádro B10_1, B10_2 a B10_3 – hustotní parametry, hloubková závislost	121

Obr. 88 Histogram rozdělení naměřených hodnot u magnetické susceptibility – lokality B5 až B10.....	124
Obr. 89 Graf velikosti rychlostí P-vln podle typu hornin – lokalita PVP Bukov – vrty S-3, S-4 a B1, B2, B3 a B4.....	132
Obr. 90 Elektrická konduktivita v závislosti na frekvenci u orientovaných vzorků řady B1 až B4 – PVP Bukov.....	134
Obr. 91 Elektrická konduktivita v závislosti na frekvenci u vzorků řady B1,2 X,Y upravených ve směrech kolmo a paralelně s foliací – PVP Bukov	134
Obr. 92 Graf velikosti konduktivity hornin řady S-3, S-4 a B1, B2, B3 , B4 při frekvenci 1 kHz, seřazeno podle typu hornin	135
Obr. 93 Velikosti pórovitosti pararul, migmatitů a amfibolitů ve vrtech S-1 až S-4 a B1 až B4 a vzorcích z povrchu ($AM \pm 1/2 SD$)	137
Obr. 94 Velikosti mineralogické hustoty pararul, migmatitů a amfibolitů ve vrtech řady S-1 až S-4 a B1 až B4 a vzorcích z povrchu ($AM \pm 1/2 SD$)	137
Obr. 95 Velikosti susceptibility (geometrický průměr) pararul, migmatitů a amfibolitů ve vrtech S-1 až S-4 , B1 až B4 a vzorcích z povrchu.....	137
Obr. 96 Rozsah hodnot mineralogické hustoty($g.cm^{-3}$) na jednotlivých lokalitách B5 – B10, kde (MAX) je maximum hodnot, (MIN) minimum a (AVG) aritmetický průměr.....	138
Obr. 97 Hodnoty jednotlivých měření mineralogických hustot (Dm) na lokalitách B5 až B10 seřazené podle velikosti	140
Obr. 98 Histogram pórovitosti (Por) – lokality B5 až B10	141
Obr. 99 Rozsah hodnot pórovitostí (%) na jednotlivých lokalitách B5 – B10, kde (MAX) je maximum hodnot, (MIN) minimum a (AVG) aritmetický průměr	141
Obr. 100 Vztah mineralogické hustoty (Dm) a pórovitosti (Por) – lokality B5 až B10	142
Obr. 101 Závislost mineralogické hustoty (Dm) a střední magnetické susceptibility u vzorků řady B5 až B10 z lokality PVP Bukov	143
Obr. 102 Schématické znázornění geometrie snímání (převzato z Koerting et al. 2015)	150
Obr. 103 Ukázka obrazových HS dat: (a) vzorek vrtného jádra v pravých barvách, jak ho vidí lidské oči, (b) stejný vzorek s použitím kombinace RGB pásem v oblasti VNIR (R: 858 nm, G: 651 nm, B: 549 nm), (c) stejný vzorek s použitím kombinace RGB pásem v oblasti SWIR (R: 1885 nm, G: 2204 nm, B: 2240 nm).....	151
Obr. 104 Schematické znázornění procesních kroků nově vytvořených nástrojů QUANTools	152
Obr. 105 Obrazová HS obrazová data HySpex byla normalizována, pro zvýraznění minerální variability vzorků vrtných jader byly použity různé kombinace pásem v oblasti infračervené části EMS. Na jejich podkladě byly vymezeny mineralogicky zajímavé oblasti, pro které byl posléze dělán výbrus a mineralogická identifikace	153
Obr. 106 Výsledky klasifikace obrazových dat HySpex: (a) vzorek vrtného jádra (č. vzorku 19, S-2) v pravých barvách, jak ho vidí lidské oči, (b) rastr ukazující variabilitu detekovaných vlnových délek absorpčních maxim (produkt derivovaný s využitím nástrojů	

QUANTools); tento produkt/výstup byl následně automaticky klasifikován s využitím klasifikátoru K-mean (c) a v posledním kroku reklasifikován do mineralogicko-petrografických tříd nadefinovaných na podkladě analýzy výbrusů (d)155

Obr. 107 Výsledky klasifikace obrazových dat HySpex: (a) vzorek vrtného jádra (č. vzorku 7, S-1, amfibolit s biotitem, křemennými žilkami a žilkou vyplněnou prehnitem) v pravých barvách, jak ho vidí lidské oči, (b) rastr ukazující variabilitu detekovaných vlnových délek absorpčních maxim (produkt derivovaný s využitím nástrojů QUANTools); tento produkt/výstup byl následně automaticky klasifikován s využitím klasifikátoru K-mean (c) a v posledním kroku reklasifikován do mineralogicko-petrografických tříd nadefinovaných na podkladě analýzy výbrusů (d).....155

Obr. 108 Výsledky klasifikace obrazových dat HySpex: (a) vzorek vrtného jádra (č. vzorku 16, S-2) v pravých barvách, jak ho vidí lidské oči, (b) rastr ukazující variabilitu detekovaných vlnových délek absorpčních maxim (produkt derivovaný s využitím nástrojů QUANTools); tento produkt/výstup byl následně automaticky klasifikován s využitím klasifikátoru K-mean (c) a v posledním kroku reklasifikován do mineralogicko-petrografických tříd nadefinovaných na podkladě analýzy výbrusů (d)156

Obr. 109 Výsledky klasifikace obrazových dat HySpex: (a) vzorek vrtného jádra (č. vzorku 4, S-1, migmatizovaný amfibolit) v pravých barvách, jak ho vidí lidské oči, (b) rastr ukazující variabilitu detekovaných vlnových délek absorpčních maxim (produkt derivovaný s využitím nástrojů QUANTools); tento produkt/výstup byl následně automaticky klasifikován s využitím klasifikátoru K-mean (c) a v posledním kroku reklasifikován do mineralogicko-petrografických tříd nadefinovaných na podkladě analýzy výbrusů (d)156

Obr. 110 Výsledky klasifikace obrazových dat HySpex: (a) vzorek vrtného jádra (č. vzorku 10, S-2, chloritizovaná amfibolická rula) v pravých barvách, jak ho vidí lidské oči, (b) rastr ukazující variabilitu detekovaných vlnových délek absorpčních maxim (produkt derivovaný s využitím nástrojů QUANTools); tento produkt/výstup byl následně automaticky klasifikován s využitím klasifikátoru K-mean (c) a v posledním kroku reklasifikován do mineralogicko-petrografických tříd nadefinovaných na podkladě analýzy výbrusů (d)157

Obr. 111 Výsledky klasifikace obrazových dat HySpex: (a) vzorek vrtného jádra (č. vzorku 9, S-2, amfibolit s granátem a biotitem, s křemen-kalcitovými žilkami) v pravých barvách, jak ho vidí lidské oči, (b) rastr ukazující variabilitu detekovaných vlnových délek absorpčních maxim (produkt derivovaný s využitím nástrojů QUANTools); tento produkt/výstup byl následně automaticky klasifikován s využitím klasifikátoru K-mean (c) a v posledním kroku reklasifikován do mineralogicko-petrografických tříd nadefinovaných na podkladě analýzy výbrusů (d)158

Obr. 112 Přehledná mapa dokumentovaných pramenů a bodů hydrogeologické monitorovací sítě na povrchu lokality, červená linie - hranice PÚ Kraví hora161

Obr. 113 Piperův diagram složení podzemních vod v povrchové části lokality (prameny a drenáže).....163

Obr. 114 Přehledná mapa dokumentovaných a monitorovaných přítoků podzemních vod do PVP Bukov164

Obr. 115 BK03 průsaky na intersekcii puklinového systému (směr spádnice/sklon 102/60) s křemennou žílou (330/80).....165

Obr. 116 BK06B vydatný výtok na křížení 2 systémů puklin (299/62 a 118/58)	165
Obr. 117 BK27 Přítok z vrtu S-2 před instalací průtokoměru (vydatnost cca 1 l.s ⁻¹)	165
Obr. 118 BK27 Přítok z vrtu S-2 po instalaci průtokoměru. Na stěně napravo dochází k průsaku na nově otevřených puklinách	165
Obr. 119 Růžicový diagram směrů puklin, zlomů a poruchových zón, na které jsou vázány přítoky podzemní vody v PVP Bukov zaznamenaných při iniciální dokumentaci	166
Obr. 120 Růžicový diagram směrů puklin, zlomů a poruchových zón, na které jsou vázány přítoky podzemní vody v PVP Bukov doplněný o revizní měření	166
Obr. 121 Piperův diagram složení podzemních vod v povrchové části lokality a v PVP Bukov	166
Obr. 122 BR36 četné kapky z krápníků na struktuře o mocnosti 1 m křížící chodbu (směr spádnice/sklon 180/80), 3. patro, okolí jámy R1.	170
Obr. 123 BR25 drobné průsaky ve formě kapek z puklinového systému křížícího chodbu (140/75), 14. patro, Z-XIV, jáma R3.....	170
Obr. 124 BR08 výtok podzemní vody z průzkumného vrtu, 24. patro, PŠ1-243, jáma R7...170	
Obr. 125 Růžicový diagram směrů puklin, zlomů a poruchových zón, na které jsou vázány přítoky podzemní vody v dole Rožná v okolí jámy Jasan.....	171
Obr. 126 Růžicový diagram směrů puklin, zlomů a poruchových zón, na které jsou vázány přítoky podzemní vody v dole Rožná kompletní datový soubor	171
Obr. 127 Náhled na 3D model pater dolu Rožná s vyznačením míst odběrů vzorků podzemních vod.....	172
Obr. 128 Monitorovaný vrt PV-5	173
Obr. 129 Meteorologická stanice u jámy Bukov	173
Obr. 130 Osazení monitorovaného přítoku BK06	174
Obr. 131 Osazení monitorovaného přítoku BK23	174
Obr. 132 Osazení přítoku BK31 sběrnou plachtou a žlabem	174
Obr. 133 Osazení přítoku BK32 měrnými válci	174
Obr. 134 Vývoj úrovně hladiny podzemní vody v monitorovaných vrtech v povrchové části lokality	176
Obr. 135 Vývoj vydatnosti u vybraných pramenů v povrchové části lokality.....	177
Obr. 136 Vývoj chemického složení podzemní vody u pramene BP021 – vybrané hlavní anionty a kationty	178
Obr. 137 Vývoj chemického složení podzemní vody u pramene BP005 – vybrané hlavní anionty a kationty	178
Obr. 138 Vývoj chemického složení podzemní vody u pramene BP019 – vybrané hlavní anionty a kationty	178
Obr. 139 BP026 Vývoj chemického složení podzemní vody u pramene BP026 – vybrané hlavní anionty a kationty	178

Obr. 140 Časový vývoj vydatnosti přítoků podzemní vody do PVP, přítoky s vydatností v setinách l.s ⁻¹ a větší	180
Obr. 141 Časový vývoj vydatnosti přítoků podzemní vody do PVP, přítoky s vydatností v ml.s ⁻¹ a desetínách ml.s ⁻¹	181
Obr. 142 Vývoj chemického složení podzemní vody u přítoku BK07 – vybrané hlavní anionty a kationty	182
Obr. 143 Vývoj chemického složení podzemní vody u přítoku BK15 – vybrané hlavní anionty a kationty	182
Obr. 144 Durovův diagram vývoje chemického složení přítoků BK07 a BK15	183
Obr. 145 Vývoj chemického složení podzemní vody u přítoku BK18 (vrt S-1) – vybrané hlavní anionty a kationty	183
Obr. 146 Vývoj chemického složení podzemní vody u přítoku BK23 – vybrané hlavní anionty a kationty	184
Obr. 147 Vývoj chemického složení podzemní vody u přítoku BK06 – vybrané hlavní anionty a kationty	184
Obr. 148 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	186
Obr. 149 Ideové schéma vývoje chemického složení a proudění podzemních vod s hloubkou v horninovém prostředí krystalinika bez antropogenního zásahu	188
Obr. 150 Ideové schéma vývoje chemického složení a proudění podzemních vod s hloubkou v horninovém prostředí krystalinika při ovlivnění důlním dílem	188
Obr. 151 Předpokládaný vývoj podzemních vod v prostoru dolu Rožná a v jeho okolí, barvy odpovídají barvám jednotlivých typů, které byly použity v diagramech na Obr. 121 a Obr. 148	189
Obr. 152. Izotopické složení vodíku a kyslíku podzemních a povrchových vod z PVP Bukov a Rožné; GMWL podle Craiga (1961), izotopické složení průměrných ročních srážek podle Hagera a Foelscheho (2015)	191
Obr. 153. Srovnání izotopického složení síry pyritu a podzemních přítoků do PVP Bukov, povrchových pramenů a podzemních přítoků v dole Rožná	192
Obr. 154. Závislost $\delta^{34}\text{S}$ na obsahu síranů ve vodách na povrchu a podzemních přítoků v dole Rožná a podzemních přítoků do PVP Bukov	192
Obr. 155 Příklad vyhodnocení křivky osychání horninového vzorku B8/1_5_3	197
Obr. 156 Tortuozita a konstiktivita póru (obrázek upraven z Wiedenmann et al. 2013)	200
Obr. 157 Základní uspořádání cely pro laboratorní difúzní experimenty (zleva): vstupní nádrž – vzorek – výstupní nádrž	203
Obr. 158: Difúzní cela pro průnikové difúzní experimenty: vlevo původní design (2006), vpravo upravený design (ÚJV Řež, a. s. 2009)	203

Obr. 159 Difúzní cela pro průnikové difúzní experimenty s malým cílovým rezervoárem; uložení části difúzních cel během experimentu (ÚJV 2016).....	204
Obr. 160 Naměřené hodnoty aktivit ^3H ve zdrojových rezervoárech (souhrn všech experimentů)	205
Obr. 161 Průnikové křivky (vývoj aktivit v cílových rezervoárech) pro experimenty s ^3H (souhrn všech experimentů)	206
Obr. 162 Průnikové křivky (vývoj aktivit v cílových rezervoárech) pro experimenty s ^{36}Cl (souhrn všech experimentů)	206
Obr. 163 Průnikové křivky (vývoj aktivit v cílových rezervoárech) pro experimenty s ^{125}I (souhrn všech experimentů)	207
Obr. 164 Průnikové křivky (vývoj aktivit v cílových rezervoárech) pro všechny použité stopovače na vzorcích z vrtného jádra B5	207
Obr. 165 Aparatura pro měření součinitele filtrace (ÚJV Rež, a. s.).....	209
Obr. 166 Typický průběh experimentu	210
Obr. 167 Měření koeficientu hydraulické vodivosti vzorků po AMS (propustoměr firmy Infratest)	210
Obr. 168 Měřicí komora s udržováním plášťového tlaku (0-0,6 MPa)	210
Obr. 169 Schéma formátování vzorků pro plánované testy a analýzy (DIF = difúzní experimenty, por. Hg = rtuťová porozimetrie, Prop. = propustnost, Miner. = mineralogie)...	211
Obr. 170 Příprava vzorků na rtuťovou porozimetrii	211
Obr. 171 Ukázka formátování vzorků B1-B10 po AMS na difúzní experimenty	212
Obr. 172 Výsledky hustot vzorků (kg m^{-3}) jader S-3 a S-4.....	214
Obr. 173 Výsledky pórovitosti (%) vzorků S-3 a S-4	214
Obr. 174 Výsledky hustot vzorků (kg m^{-3}) jader S-3 a S-4 v závislosti na typu horniny.....	214
Obr. 175 Výsledky pórovitosti (%) vzorků S-3 a S-4 vs. horninový typ.....	214
Obr. 176 Výsledky měření mineralogických hustot B1-B10, hodnoty seřazeny dle jejich velikosti	216
Obr. 177 Výsledky měření hustot vzorků B1–B10 (kg m^{-3}), seřazeny dle velikosti	216
Obr. 178 Výsledky měření pórovitosti vzorků B1–B10, seřazeny dle velikosti hustoty	216
Obr. 179 Závislost mineralogické hustoty na pórovitosti (B1–B10)	217
Obr. 180 Relativní zastoupení velikostí pórů u vzorků z vrtu S-3	218
Obr. 181 Relativní zastoupení velikostí pórů u vzorků z vrtu S-4	218
Obr. 182 Relativní zastoupení velikostí pórů u vzorku S3_1.....	219
Obr. 183 Vzorek S3_1 stromatitický amfibolický migmatit s biotitem.....	219
Obr. 184 Relativní zastoupení velikostí pórů u vzorku S3_3.....	219
Obr. 185 Vzorek S3_3 migmatizovaný granát-biotitický amfibolit.....	219

Obr. 186 Relativní zastoupení velikostí pórů u vzorku S3_4	219
Obr. 187 Vzorek S3_4 stromatitický amfibolický migmatit s biotitem a granátem.....	219
Obr. 188 Relativní zastoupení velikostí pórů u vzorku S4_2	220
Obr. 189 Vzorek S4_2 stromatitický	220
Obr. 190 Relativní zastoupení velikostí pórů u vzorku S4_3	220
Obr. 191 Vzorek S4_3 migmatizovaná biotit-amfibolická pararula	220
Obr. 192 Relativní zastoupení velikostí pórů u vzorku S4_4	220
Obr. 193 Vzorek S4_4 kompaktní jemnozrný amfibolit s biotitem	220
Obr. 194 Relativní zastoupení velikostí pórů u vzorků B1- B4	221
Obr. 195 Provrásněná (stromatitická) struktura amfibolického migmatitu s biotitem. Hlavní minerální složky tvoří plagioklas (plg), amfibol (amf) a křemen (qtz). Vedlejším minerálem je biotit (bt)	223
Obr. 196 Totální sericitizace (ser) plagioklasu (plg)	223
Obr. 197 Usměrněná, protažená struktura migmatitizovaného páskovaného amfibolitu s biotitem. Hlavní minerální komponenty jsou amfibol (amf) a plagioklas (plg). Vedlejším minerálem je biotit (bt), křemen (qtz) a granát (grt,).....	224
Obr. 198 Postupný rozklad a nahrazování porfyroblastů granátu (grt) amfibolem (amf), plagioklasem (plg) a biotitem (bt).....	224
Obr. 199 Stromatitická struktura amfibolického migmatitu s biotitem a granátem. Světlý leukosom je tvořen hlavně plagioklasem (plg), křemenem (qtz) a K-živcem (kfs). Provrásněný restit (melanosom) se skládá především z amfibolu (amf) a biotitu (bt)	224
Obr. 200 Stromatitická struktura biotitického migmatitu s převahou leukosomu. Světlý leukosom je tvořen velkými zrny K-živce (kfs), plagioklasu (plg) a křemene (qtz). Reziduální zdrojová hornina - mezosom se skládá především z biotitu a jemnozrné směsi plagioklasu a křemene	225
Obr. 201 Detail chaotického provrásnění zbytkového mezosomu, tvořeného převážně biotitem (bt), ve stromatitickém migmatitu. Světlá granitoidní složka se skládá z K-živce (kfs), plagioklasu (plg) a křemene (qtz).	225
Obr. 202 Mírně usměrněná struktura migmatitizované biotit-amfibolické pararuly. Hlavní minerální složky matrix jsou plagioklas (plg), křemen (qtz), amfibol (amf) a K-živec (kfs). Minoritně se vyskytuje biotit (bt)	226
Obr. 203 Mírně usměrněná struktura jemnozrného kompaktního amfibolitu. Hlavní minerální složky matrix jsou amfibol (amf), plagioklas (plg) a křemen (qtz). Minoritně se vyskytuje biotit (bt). Hojnými akcesoriemi jsou ilmenit (ilm), pyrit (py), titanit (tnt), apatit (ap) a zirkon (zrn)	227
Obr. 204 Množství idiomorfních inkluzí apatitu (ap), popř. zirkonu (zrn) v plagioklasu. Hojnou akcesorií je též titanit (tnt).....	227
Obr. 205 Hodnoty efektivních difúzních koeficientů (D_e 3H) vzorků B1–B10 dle horninového typu (modře – zobrazeny i vzorky s pozorovatelnou puklinou – vliv pukliny).....	237

Obr. 206 Hodnoty efektivních difúzních koeficientů (D_e ^3H) vs. poměr D_e (^{36}Cl – $^{125}\text{I}/^3\text{H}$) vzorků B1–B10 dle horninového typu.....	237
Obr. 207 Vliv závislosti D_e (^3H) na pórovitosti vzorků PVP Bukov	238
Obr. 208 Vliv závislosti D_e (^3H) na hustotě vzorků PVP Bukov.....	238
Obr. 209 Hodnoty efektivních difúzních koeficientů (D_e ^3H) vs. poměr D_e (^{36}Cl – $^{125}\text{I}/^3\text{H}$) vzorků PB1–B10 v závislosti na orientaci magnetické foliace	239
Obr. 210 Hodnoty efektivních difúzních koeficientů (D_e ^3H) vzorků B3, B4, B7 (biotitický migmatit) v závislosti na orientaci magnetické foliace (2 vzorky se stejnou orientací foliace vůči vzorku).....	239
Obr. 211 Grafické porovnání průměrných hodnot efektivních difúzních koeficientů pro ^3H , ^{36}Cl a ^{125}I na vzorcích z jednotlivých lokalit	241
Obr. 212 Graf zobrazující hodnoty D_e pro aniont v závislosti na hodnotě D_e pro ^3H	241
Obr. 213 Graf zobrazující hodnoty D_e pro aniont v závislosti na hodnotě D_e pro ^3H – logaritmické měřítko os.....	242
Obr. 214 Hodnoty K_d cesia a jejich rozšířené standardní nejistoty na horninových vzorcích z PVP Bukov, vlevo: frakce C, vpravo: frakce D, $c(\text{Cs}) = 2 \cdot 10^{-5} \text{ mol l}^{-1}$	246
Obr. 215 Hodnoty K_d stroncia na horninových vzorcích z PVP Bukov, vlevo: frakce C, vpravo: frakce D, $c(\text{Sr}) = 2 \cdot 10^{-5} \text{ mol l}^{-1}$	248
Obr. 216 Hodnoty K_d seleničitanu na horninových vzorcích z PVP Bukov, vlevo frakce C, vpravo frakce D, $c(\text{Se}) = 2 \cdot 10^{-5} \text{ mol l}^{-1}$	251
Obr. 217 Hodnoty K_d uranu na horninových vzorcích z PVP Bukov, vlevo frakce C, vpravo frakce D, $c(\text{U}) = 2,6 \cdot 10^{-4} \text{ mol l}^{-1}$	253
Obr. 218 Modelování speciace uranu v SGW2. Vlevo pH/ E_h diagram uranu v SGW2 s vyznačenou speciací (■) za experimentálních podmínek (The Geochemist's Workbench). Vpravo výpočet zastoupení specií uranu v SGW2 za experimentálních podmínek (PHREEQC), pH = 8,2; E_h = 380 mV; $c(\text{U}) = 2,4 \cdot 10^{-4} \text{ mol l}^{-1}$; databáze LLNL.DAT	254
Obr. 219 Sorpční izotermy cesia na horninových vzorcích z PVP Bukov, $c(\text{Cs}) = 1 \cdot 10^{-5}$ – $9 \cdot 10^{-3} \text{ mol l}^{-1}$	255
Obr. 220 Sorpce vybraných radionuklidů na horninové vzorky z české provenience	259
Obr. 221 Rozsah území 3D regionálního modelu PVP Bukov na podkladu topografické mapy, legenda: fialový polygon – plošný rozsah regionálního 3D strukturně-geologického modelu ČGS; listoklady – zeleně 1 : 10 000, -červeně 1 : 25 000.....	261
Obr. 222 Lokalizace vrtů vedených v databázi Geofondu s uvedením hloubky jednotlivých vrtů.....	264
Obr. 223 Základní geologická dokumentace 1 : 200 z lokality Bukov, zobrazující výřez situace v jedné z horizontálních chodeb, vč. dvou orientačních nákresů čelby	265
Obr. 224 Geologická dokumentace 1 : 1 000 z lokality Bukov, zobrazující výřez situace na úrovni 12. patra (hloubka c. 500 m pod povrchem).....	265
Obr. 225 Geologický řez k projektu 1958 Bukov.....	266

Obr. 226 Náhled vrtných dat, důlních map a polygonů granulitu z digitalizovaných map od DIAMO s.p., které posloužily pro tvorbu modelu v software MOVE.....	267
Obr. 227 Důl Rožná, 12. patro, chodba PŠ4-125 - výval zóny R4 ze západní stěny chodby	268
Obr. 228 Příklad nesouladu mezi vertikálním rukopisným řezem, vrtnými daty (světle modrá značí zónu kataklázy) a průběhu hlavních zlomů (fialové plochy) rekonstruovaných na základě patrových map 1 : 1 000. Pohled na jih, pravý zlom reprezentuje zónu R4, levý R1 s jejím podložním „odžilkem“	268
Obr. 229 Příklad nesouladu mezi patrovou rukopisnou mapou (12. patro) a digitalizovanými horizontálními řezy Rožná-Olší (světle modré linie) vs. vrtná data (světle modrá značí zónu kataklázy) vs. průběh hlavních zlomů rekonstruovaných na základě patrových map 1 : 1 000 (fialové plochy) a průběh ražeb pro ověření zlomů R1 a R4 (černě). Pohled na sever, pravý zlom reprezentuje zónu R1, levý R4	269
Obr. 230 Zlomy v modelu PVP (červené – významné zlomové zóny, šedé – méně významné zlomy) spolu s tělesy amfibolitů (zelené), granulitů (růžové) a erlanů (modré).....	272
Obr. 231 Globální model PVP Bukov bez zobrazení pararul a zlomů. Hnědá – migmatity, zelená – amfibolity, růžová – granulity, modrá – erlany až krystalické vápence.....	273
Obr. 232 Výsledný globální model PVP Bukov. Běžová – pararuly, hnědá – migmatity, zelená – amfibolity, růžová – granulity, modrá – erlany až krystalické vápence, žlutá – fluviální sedimenty, šedá – splachové sedimenty a antropogenní uložení.....	274
Obr. 233 Celkový pohled na detailní 3D model PVP Bukov (MOVE)	276
Obr. 234 Strom uživatelsky nastavených skupin objektů v detailním modelu PVP Bukov...	277
Obr. 235 Popis jednotlivých prvků v detailním 3D modelu PVP Bukov (MOVE).....	277
Obr. 236 2D vizualizace části detailního modelu PVP Bukov (MOVE).....	278
Obr. 237 Schéma rozmístění jednotlivých modelů se strukturními daty ve formátu 3D PDF a MVE	279
Obr. 238 Náhled strukturní dokumentace v prostředí softwaru MOVE – model čelby BZ1-XII (MOVE)	280
Obr. 239 Náhled atributové tabulky modelu čelby BZ1-XII	280
Obr. 240 Model horninového prostředí (300x500x150 m).....	283
Obr. 241 Profily výrubu a) BZ-XIIJ, b) BZ1-XII, ZK-1, c) ZK-2, ZK-3S, ZK-3J	284
Obr. 242 Schéma členění rozrážek ve výpočetním modelu	287
Obr. 243 Pohled na 3D model výrubu (jednotlivé segmenty odpovídají členění dle modrých a červených čar dle Obr. 242, včetně zohlednění rozhraní hornin a zlomových struktur viz Obr. 244, barvy jsou generovány náhodně).....	288
Obr. 244 Schéma vygenerované sítě konečných prvků s členěním dle typu hornin a zlomových, puklinových systémů (pararula P1-P5, amfibolit A1-A7, migmatit M1-M6)	288
Obr. 245 Pohled na model horninového prostředí s podzemním dílem shora	289
Obr. 246 Schéma variant modelu porušené zóny	290

Obr. 247 Modelovaný akcelrogram v horizontálním směru	292
Obr. 248 Modelovaný akcelrogram ve svislém směru.....	293
Obr. 249 Vodorovné napětí XX – analýza in-situ	295
Obr. 250 Vodorovné napětí YY – analýza in-situ	295
Obr. 251 Svislé napětí ZZ – analýza in-situ	296
Obr. 252 Izolinie svislých deformací po vyrubání segmentu BZ-XIIJ 140-170 před instalací ostění (bez porušené zóny, bez podzemní vody).....	298
Obr. 253 Izolinie svislých deformací po vyrubání celého podzemního díla včetně instalace ostění (bez porušené zóny, bez podzemní vody).....	299
Obr. 254 Izolinie konečných deformací na povrchu podzemního díla – pohled shora (model bez poruchy a vlivu podzemní vody).....	299
Obr. 255 Izolinie konečných deformací na povrchu podzemního díla – pohled zdola (model bez poruchy a vlivu podzemní vody).....	300
Obr. 256 Izolinie vodorovných deformací ve směru x – 1,9 s od počátku	303
Obr. 257 Izolinie svislých deformací – 1,9 s od počátku	304
Obr. 258 Izolinie vodorovných deformací ve směru x – 11,5 s od počátku.....	304
Obr. 259 Izolinie svislých deformací – 11,5 s od počátku	304

Seznam tabulek:

Tab. 1 Petrografická charakteristika vzorků odebraných pro horninovou chemickou analýzu	46
Tab. 2 Výsledky datování illitu z poruchových zón PVP Bukov metodou K-Ar	63
Tab. 3 Přehled významných poruchových zón PVP Bukov. Grafické zobrazení struktur viz Obr. 54 (kin. – kinematika)	80
Tab. 4 Použité petrofyzikální metody a počty změřených vzorků.....	95
Tab. 5 Přehled odebraných vzorků a použitých petrofyzikálních metod – vrty série S-1, S-2, S-3, S-4 a B1, B2, B3 a B4.....	95
Tab. 6 Seznam odebraných vzorků – vrty série B5, B6, B7, B8, B9 a B10, orientace jádra a použité petrofyzikální metody	98
Tab. 7 Citlivost metody stanovení přirozeně radioaktivních prvků.....	102
Tab. 8 Hustotní parametry, pórovitost a magnetická susceptibilita – vrty S-1 až S-4 a B1 až B4	105
Tab. 9 Lokalita B5, jádro B5_1 a B5_2 – hustotní parametry, data	115
Tab. 10 Lokalita B6, jádro B6_1, B6_2 a B6_3 – hustotní parametry, data	117
Tab. 11 Lokalita B7, jádro B7_1 a B7_2 – hustotní parametry, data	118
Tab. 12 Lokalita B8, jádro B8_1 a B8_2 – hustotní parametry, data	119

Tab. 13 Lokalita B9, jádro B9_1 a B9_2 – hustotní parametry	120
Tab. 14 Lokalita B10, jádro B10_1 a B10_2 – hustotní parametry, data	122
Tab. 15 Hodnoty střední magnetické susceptibility u vzorků B5 až B10 z lokality PVP Bukov	123
Tab. 16 Obsahy eTh, U, eU(Ra) a K v horninách lokality PVP Bukov – vrty S-1 až S-4 a B1 až B4	126
Tab. 17 Statistické parametry obsahů eTh, U, eU(Ra) a K v rulách, migmatitech a amfibolitech z vrtů řady S-1 až S-4 a B1 až B4 v porovnání s ekvivalenty hornin z archivních údajů	126
Tab. 18 Tepelná produkce jednotkových koncentrací draslíku, uranu a thoria (podle Matolína in Hazdrová et al. 1981)	127
Tab. 19 Hodnoty obsahů přirozených radioaktivních prvků (K, U, eU(Ra) a eTh) a hodnot tepelné produkce u série vzorků řady B5 až B10 z prostorů lokality PVP Bukov	127
Tab. 20 Ultrazvukové rychlosti P-vln a S-vln u vzorků z lokality PVP Bukov – vrty S-3, S-4 a B1, B2, B3 a B4	128
Tab. 21 Vypočtené hodnoty dynamického modulu pružnosti, střížného modulu a Poissonova čísla z lokality PVP Bukov – vrty S-3, S-4 a B1, B2, B3 a B4	129
Tab. 22 Elektrická konduktivita $\sigma(\mu\text{S m}^{-1})$ u vzorků hornin z lokality PVP Bukov – vrty S-3, S-4 a B1, B2, B3 a B4	133
Tab. 23 Výpočet mineralogické hustoty $D_{m \text{ vyp}}$ z modálního složení migmatitů lokality Drátenická skála a modelový výpočet mineralogické hustoty s měnícím se poměrem horninotvorných minerálů	139
Tab. 24 Tabulka významných koeficientů korelace petrofyzikálních parametrů – elektrická vodivost a měřicí frekvence, rychlost P- a S-vln	144
Tab. 25 Přehled vybraných vzorků vrtných jader S-1 a S-2 pro spektrální analýzu, dále je uvedeno, zda byl dělán k danému vrtnému jádru výbrus a jeho následná mineralogická identifikace	149
Tab. 26 Nadefinované minerální třídy na podkladě výsledků petrologického studia výbrusů. Výsledky automatické klasifikace obrazových dat HySpex byly v posledním kroku reklasifikovány do těchto 14 mineralogicko-petrografických tříd	154
Tab. 27: Modelové hodnoty střední doby zdržení v letech dle různých modelů míšení a stopovačů CFC a SF6.	168
Tab. 28: Výsledky datování vod radiouhlíkovou metodou (prof. Tomasz Goslar, Radiocarbon Laboratory, Poznaň)	169
Tab. 29 Složení plynu odebraného z podzemní vody vytékající z vrtu S-1 (BK18)	169
Tab. 30 Souřadnice monitorovaných vrtů v souřadném systému S-JTSK	172
Tab. 31 Rozsah chemických analýz	173
Tab. 32 Přehled monitorovaných a osazených hydrogeologických bodů s typem měření (A – ano)	175

Tab. 33 Příklady chemických analýz vybraných monitorovaných přítoků – první část.....	185
Tab. 34 Příklady chemických analýz vybraných monitorovaných přítoků – druhá část	185
Tab. 35. Chemické složení podzemních vod v dole Rožná – vybrané typické analýzy pro jednotlivé hydrochemické typy, první část.....	187
Tab. 36 Chemické složení podzemních vod v dole Rožná – vybrané typické analýzy pro jednotlivé hydrochemické typy, druhá část	187
Tab. 37 Přehled hodnot pH a celkového obsahu rozpuštěných látek (TDS) pro jednotlivé hydrochemické typy na lokalitě.....	190
Tab. 38 Složení podzemních vod v PVP Bukov a syntetické granitické vody SGW2	195
Tab. 399 Přehled odebraných vzorků z vrtů S-3 a S-4	211
Tab. 40 Texturní parametry provedených analýz.....	221
Tab. 41 Přehled odebraných a petrologicky analyzovaných vzorků z vrtných jader S-3 a S-4	222
Tab. 42 Mineralogické složení použitých horninových vzorků z PVP Bukov (hm. %), frakce C: 0,63–0,125 mm, frakce D: 0,8–0,63 mm	228
Tab. 43 Vypočítané součinitele filtrace jednotlivých vzorků	229
Tab. 44 Součinitele filtrace vzorků B 3 – B10 (ÚGN)	230
Tab. 45 Vyhodnocení efektivních difúzních koeficientů pro vzorky z jádra B1	230
Tab. 46 Vyhodnocení efektivních difúzních koeficientů pro vzorky z jádra B2	231
Tab. 47 Vyhodnocení efektivních difúzních koeficientů pro vzorky z jádra B6	232
Tab. 48 Vyhodnocení efektivních difúzních koeficientů pro vzorky z jádra B7	233
Tab. 49 Vyhodnocení efektivních difúzních koeficientů pro vzorky z jádra B8	233
Tab. 50 Vyhodnocení efektivních difúzních koeficientů pro vzorky z jádra B9	233
Tab. 51 Vyhodnocení efektivních difúzních koeficientů pro vzorky z jádra B10	234
Tab. 52 Vyhodnocení efektivních difúzních koeficientů pro vzorky z jádra S-3 a S-4.....	234
Tab. 53 Souhrn efektivních difúzních koeficientů na všech testovaných vzorcích.....	235
Tab. 54 Porovnání průměrných hodnot efektivních difúzních koeficientů vzorků z různých lokalit.....	240
Tab. 55 Popis použitých horninových vzorků z PVP Bukov	243
Tab. 56 Chemické složení a pH syntetické granitické vody SGW2	243
Tab. 57 Hodnoty K_d cesia včetně jejich rozšířených standardních nejistot na frakcích C horninových vzorků z PVP Bukov, $c(\text{Cs}) = 2 \cdot 10^{-5} \text{ mol l}^{-1}$	245
Tab. 58 Hodnoty K_d cesia včetně jejich rozšířených standardních nejistot na frakcích D horninových vzorků z PVP Bukov, $c(\text{Cs}) = 2 \cdot 10^{-5} \text{ mol l}^{-1}$	245
Tab. 59 Hodnoty K_d pro Cs na vybraných minerálech (Söderlund et al. 2011).....	247

Tab. 60 Hodnoty K_d stroncia včetně jejich rozšířených standardních nejistot na frakcích C horninových vzorků z PVP Bukov, $c(\text{Sr}) = 2 \cdot 10^{-5} \text{ mol l}^{-1}$	247
Tab. 61 Hodnoty K_d selenu včetně jejich rozšířených standardních nejistot na frakcích D horninových vzorků z PVP Bukov, $c(\text{Se}) = 2 \cdot 10^{-5} \text{ mol l}^{-1}$	250
Tab. 62 Hodnoty K_d uranu včetně jejich rozšířených standardních nejistot na frakcích C horninových vzorků z PVP Bukov, $c(\text{U}) = 2,6 \cdot 10^{-4} \text{ mol l}^{-1}$	252
Tab. 63 Hodnoty K_d uranu včetně jejich rozšířených standardních nejistot na frakcích D horninových vzorků z PVP Bukov, $c(\text{U}) = 2,6 \cdot 10^{-4} \text{ mol l}^{-1}$	252
Tab. 64 Hodnoty Q_{max} (resp. CEC) horninových vzorků z PVP Bukov	256
Tab. 65 Přehled horninových vzorků z české provenience	257
Tab. 66 Mineralogické složení horninových vzorků z Českého masivu (hm. %), frakce C: 0,63–0,125 mm, frakce D: 0,8–0,63 mm;	257
Tab. 67 Výsledné hodnoty K_d cesia a stroncia včetně jejich rozšířených standardních nejistot na horninových vzorcích české provenience	258
Tab. 68 Hodnoty K_d seleničitanu na vybrané minerály přítomné v krystalických horninách (Söderlund et al. 2016)	260
Tab. 69 Parametry hlavních zlomů odečtené z povrchové a patrových map	270
Tab. 70 Vymezení 3D geomechanického modelu v souřadnicích S-JTSK	281
Tab. 71 Fyzikálně-mechanické vlastnosti hornin (výpočetní parametry)	282
Tab. 72 Fyzikálně-mechanické vlastnosti materiálů (výpočetní parametry)	285
Tab. 73 Výpočetní parametry pro porušenou zónu (parametrická studie)	290
Tab. 74 Přehled měřených maximálních deformací při konvergenčních měřeních	291
Tab. 75 Přehled provedených analýz	294
Tab. 76 Srovnání maximálních vypočtených deformací výrubu pro variantní modely porušené zóny bez vlivu podzemní vody	297
Tab. 77 Srovnání maximálních vypočtených deformací výrubu pro variantní modely porušené zóny plně nasycené vodou	301
Tab. 78 Zóny dosahu deformací od výrubu pro model plně nasycené porušené zóny	302
Tab. 79 Stanovení dosahu deformační zóny	305

Seznam příloh:

Příloha 1 Jednotná horninová legenda PVP Bukov

Příloha 2 Geologická mapa okolí PVP Bukov 1 : 10 000

Příloha 3 Mapa dokumentačních bodů geologického mapování

Příloha 4 Strukturní mapa rozrážky ZK-1 a přilehlé části překopu B-XIIJ: foliace

Příloha 5 Strukturní mapa rozrážky ZK-1 a přilehlé části překopu B-XIIJ: pukliny

Příloha 6 Strukturní mapa rozrážky ZK-1 a přilehlé části překopu B-XIIJ: zlomy

Příloha 7 Strukturní mapa rozrážky ZK-2, přilehlé části BZ1-XII a přilehlé části překopu B-XIIJ: foliace

Dlážděná 6 | 110 00 Praha 1 | ČR

tel.: +420 221 421 511 | fax: +420 221 421 544 | e-mail: info@surao.cz | www.surao.cz

IČ: 66000769 | Bankovní spojení: ČNB Praha 1, č. ú. 35-64726011/0710

Tato zpráva je výhradně majetkem SÚRAO a její šíření bez vědomí majitele je zakázáno.

Příloha 8 Strukturní mapa rozrážky ZK-2, přilehlé části BZ1-XII a přilehlé části překopu B-XIIJ: pukliny
Příloha 9 Strukturní mapa rozrážky ZK-2, přilehlé části BZ1-XII a přilehlé části překopu B-XIIJ: zlomy
Příloha 10 Strukturní mapa rozrážek ZK-3J, ZK-3S, přilehlé části BZ1-XII a přilehlé části překopu B-XIIJ: foliace
Příloha 11 Strukturní mapa rozrážek ZK-3J, ZK-3S, přilehlé části BZ1-XII a přilehlé části překopu B-XIIJ: pukliny
Příloha 12 Strukturní mapa rozrážek ZK-3J, ZK-3S, přilehlé části BZ1-XII a přilehlé části překopu B-XIIJ: zlomy
Příloha 13 Fotodokumentace vzorků B1–B10 – formát po AMS na difúzní experimenty
Příloha 14 Petrografický popis vrtných jader B1- B10

Seznam elektronických příloh:

Elektronická příloha 1 Petrografický popis výbrusů
Elektronická příloha 2 Reprezentativní chemické složení minerálů
Elektronická příloha 3 Chemické složení hornin
Elektronická příloha 4 Popis geochemie žil
Elektronická příloha 5 Hlavní prvky v karbonátech
Elektronická příloha 6 Stopové prvky v karbonátech
Elektronická příloha 7 Fluidní inkluze v karbonátech a křemeni
Elektronická příloha 8 Izotopy C a O v karbonátech
Elektronická příloha 9 Izotopy Sr v karbonátech
Elektronická příloha 10 Izotopy S v sulfidech
Elektronická příloha 11 Rtg difrakce v alteračních minerálech
Elektronická příloha 12 Databáze dokumentačních bodů geologického mapování
Elektronická příloha 13 Tabulka dat získaných v rámci dokumentace výstavby PVP Bukov, zahrnující zejména strukturní a petrologické dokumentace, odběry vzorků, lokace přítoků atp.
Elektronická příloha 14 HG01 Výsledky terénních měření povrchová část lokality.
Elektronická příloha 15 HG02 Tabulky chemických analýz podzemních vod.
Elektronická příloha 16 HG03 Dokumentace přítoků do PVP Bukov
Elektronická příloha 17 HG04 Dokumentace přítoků do dolu Rožná
Elektronická příloha 18 Globální model PVP Bukov ve formátu MVE (ZIP)
Elektronická příloha 19 Globální model PVP Bukov ve formátu 3D PDF
Elektronická příloha 20 Detailní 3D model PVP Bukov ve formátu MVE (ZIP)
Elektronická příloha 21 Detailní 3D model PVP Bukov ve formátu 3D PDF a atributová tabulka dat obsažených v modelu (ZIP)
Elektronická příloha 22 Dílčí 3D modely strukturní dokumentace ve formátu MVE (ZIP)
Elektronická příloha 23 Dílčí 3D modely strukturní dokumentace ve formátu 3D PDF a odpovídající atributové tabulky (ZIP)
Elektronická příloha 24 Komplettní 3D strukturní model ve formátu MVE (ZIP)
Elektronická příloha 25 Komplettní 3D strukturní model ve formátu 3D PDF
Elektronická příloha 26 Tabulka výsledků měření AMS
Elektronická příloha 27 3D geomechanický model – výsledky numerických analýz

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

Seznam použitých zkratk:

σ	elektrická konduktivita
vd	Poissonovo číslo.
Ab	albitová okmponenta
Alm	almandinová komponenta
AM	aritmetický průměr
AMF	amfibolit
amf	amfibol
Amp	amfibol
AMS	anizotropie magnetické susceptibility
An	anortitová komponenta
apfu	počet atomů ve strukturní jednotce (atoms per formula unit)
AVG	aritmetický průměr
BSE	zpětně odražené elektrony
bt	biotit
Cal	kalcit
CFC	chlor-fluorované uhlovodíky (chlorofluorocarbon)
ČGS	Česká geologická služba
chl	chlorit
Dm	mineralogická hustota
DM	dolní mez
Dmvyyp	mineralogická hustota vypočtená
Do	objemová hustota
DPZ	dálkový průzkum Země
EBSD	difrakce zpětně odražených elektronů
Ed	Youngův modul pružnosti
EDS	elektronová disperzní mikroskopie
Eh	oxidačně redukční potenciál mV
EMS	elektromagnetické spektrum
ep	epidot
eTh	ekvivalentní obsahy thoria
eU(Ra)	ekvivalentní obsahy uranu
FEG	field emission gun
GD	směrodatná odchylka geometrického průměru
Gd	dynamický střižný modul
GE	geometrický průměr
GFZ	German Research Centre For Geosciences
Grs	grossulárová komponenta
Grt	granát
hem	hematit
HFS	high field strength
HM	horní mez
HREE	heavy rare earth elements
HS	hyperspektrální data
HUP	tepelná produkce (heatproductionunits), nebo též
ICP-MS	inductively coupled plasma mass spectrometry
K	obsah draslíku
k	magnetická susceptibilita,
kat	kataklazit
Kfs	draselný živec
Km	střední magnetická susceptibilita
ksp	draselný živec
L	magnetická lineace
LREE	light rare earth elements
LVR	poměr kapalné plynné fáze
MAX	maximální hodnoty
ME	medián
MGM	migmatit
MIN	minimální hodnoty

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

mnz	monazit
MORB	středoocéánské bazalty (mid-ocean ridge basalt)
N	počet vzorků
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NN	Nearest Neighbour
Or	ortoklasová komponenta
P	rychlosti podélných vln
Pl	plagioklas
plg	plagioklas
Por	otevřená pórovitost
Prp	pyropová komponenta
PT	teplotně-tlakové
PVP	Podzemní výzkumné pracoviště
py	pyrit
q	křemen
Qtz	křemen
qtz	křemen
R	rezistivita – ohmický odpor vzorku
r	koeficient korelace
RGB	Red-green-blue
rtg	rentgenový
RUL	rula
S	rychlosti příčných vln
SD	směrodatná odchylka
SMOW	standardní průměrná oceánská voda (Standard Mean Ocean Water)
Sps	spesartinová komponenta
SURAO	Správa úložišť radioaktivních odpadů
SUSC	objemová magnetická susceptibilita
SW	Software
SWIR	krátkovlnná část infračerveného spektra (Short-wavelength infrared)
TDS	celkový obsah rozpuštěných látek
Th	teplota homogenizace
Tm	teplota tání posledního krystalu ledu
tnt	titanit
TOC	celkový obsah organického uhlíku ve vodách
UGN	Ústav geoniky Akademie věd ČR, v.v.i.
USMH	Ústav struktury a mechaniky hornin Akademie věd ČR, v. v. i.
UJV	ÚJV Řež, a.s.
VNIR	viditelné a blízké infračervené části elektromagnetického spektra (Visible and near-infrared region)
XFe	obsah železa
XMg	obsah hořčíku
zrn	zirkon
γ	objemová tíha
E_e	modul pružnosti
ν	poissonova konstanta
σ_h	horizontální napětí
σ_v	vertikální napětí
G	smykový modul
A	plocha průřezu
λ	objemový modul

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

Abstrakt

V metamorfovaných horninách Českého masivu, v jihovýchodní části moldanubika bylo vybudováno podzemní výzkumné pracoviště Bukov, situované na 12. patře bývalého uranového dolu Rožná. Laboratoř byla postavena pro sérii velkých výzkumných experimentů zaměřených na dlouhodobou bezpečnost a technickou proveditelnost budoucího hlubinného úložiště radioaktivních odpadů. V průběhu výstavby byla prováděna podrobná dokumentace podzemních prostor v hloubce 550 m pod terénem za účelem vytvoření reprezentativního popisného datasetu geologických dat a pro účely 3D vizualizace.

Prvotní geologický výzkum zahrnul práce v oblasti petrologie, geochemie, strukturní geologie, petrofyziky, detailní popis a datování mineralizací fraktur, hydrogeologii, hydrogeochemii a detailní geologické mapování. V rámci PVP byla vybudována a zprovozněna hydrogeologická a geotechnická monitorovací síť. Získaná data byla využita v rámci experimentálních prací zaměřených na transportní charakteristiky a pro 3D geomechanický model.

Podzemní výzkumné pracoviště je situováno v migmatitech, migmatizovaných pararulách a amfibolitech, které byly vícenásobně postihnuty křehkými i duktilními deformačními událostmi – byly studovány produkty alterací, karbonátové a křemenné žíly, křehké poruchy. Zóny alterací jsou až několik metrů široké, tvořené především kalcitem, chloritem, hematitem, slídkami, palygorskitem, kaolinitem, smektitem, illitem a zeolity. K-Ar datování novotvořeného illitu ze dvou střížných zón dosáhlo dvou konzistentních věků: 287-307 Ma a 250-256 Ma.

Na základě studia struktur, stabilních izotopů a fluidních inkluzí byly rozpoznány alespoň dvě generace mineralizací. Ve srovnání s dokumentovanými mineralizacemi z ložiska Rožná jsou tyto mineralizace vázané na uranovou mineralizaci ložiska a post-uranové. Zdroji fluid jsou dle isotopové studie smíšené solanky permských bazénů, meteorické vody a fluida z metamorfovaných hornin.

Na vzorcích z jader byly provedeny série difuzních a sorpčních experimentů. Jejich výsledky byly srovnány s obdobnými experimenty z hornin z dalších potenciálních lokalit hlubinného úložiště. Tato data byla dále korelována s ohledem na stavbu horniny pomocí anizotropie magnetické susceptibility. Kvantifikace magnetické stavby a jejích parametrů umožnila interpretaci geotechnických a fyzikálních parametrů studovaných hornin.

Na půlených jádrech z vrtů byla provedena také spektrální analýza za využití obrazové analýzy vzhledem k radianci a reflektanci daných minerálů.

Hydrogeologická monitorovací síť zahrnuje 3 monitorované vrtý a 6 pramenů na povrchu a 36 monitorovaných bodů v podzemí. Hydrogeochemická studie objasnila složení, původ a věk a vztahy přítomných vod.

Pro lepší posouzení geologických podmínek byl vytvořen 3D model okolí PVP Bukov založený na nově získaných datech z podzemí, archivních datech a nově vytvořené geologické mapě. Celé podzemní pracoviště bylo vizualizováno ve 3D za využití laserscanu a podzemních dokumentací litologie, struktur, umístění vrtů, odběrů vzorků a bodů monitorovacích sítí. Veškerá tato data jsou v rámci 3D vizualizace uložena a přehledně přístupná ve formě atributových tabulek.

Klíčová slova

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

Podzemní výzkumné pracoviště, laboratoř, úložiště, výběr lokality, Bukov, transportní charakteristiky, 3D model, hydrogeologie, monitoring, geotechnika, geologický popis, petrologie, geochemie, petrofyzika, datování

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

Abstract

In the realm of Bohemian Massif in high grade metamorphic rocks of northeastern Moldanubian zone was built unique underground research laboratory Bukov situated on level 12 of former uranium mine Rožná. The laboratory is projected for series of major research experiments focused on long term safety and technical feasibility of a future deep geological repository of radioactive waste. During the construction works the underground environment was well documented in order to understand the geological conditions on the depth of 550 m below the terrain and in order to obtain relevant data to build representative geological visualization and description of the underground environment.

The initial geological research included detailed study of geological mapping, petrology, geochemistry, structural geology, petrophysics, detailed study and dating of mineralization events, hydrogeology and hydrogeochemistry. Hydrogeological and geotechnical monitoring has been set in the underground laboratory and obtained observations are supported by experimental work such as transport characteristics of the rock and geomechanical 3D model.

The underground laboratory is situated in migmatites, migmatized paragneisses and amphibolites that were affected by several ductile and brittle deformation events. The products of alteration processes, carbonate and quartz-carbonate veins along shear zones, fractures and joints were studied. The altered zones are up to several meters wide, formed mostly by calcite, chlorite, micas, hematite, palygorskite, kaolinite, smectite, illite and zeolite. K-Ar dating of new-formed illite from two shear zones yielded consistent ages: 287-307 Ma and 250-256 Ma. These ages are fully comparable with the U-Pb and K-Ar dating of altered zones of the Rožná uranium deposit.

Based on structural, stable isotope and fluid inclusion study, at least two generations of mineralization were distinguished. Comparing with the Rožná deposit uranium mineralizations they are believed to be uranium- and post-uranium related. The fluid sources of these mineralizations are according to the isotopic study mixed saline waters from Permian sedimentary basins with meteoric water and fluids from metamorphosed rocks itself.

On borehole samples were conducted diffusion and sorption experiments. Obtained data were compared to similar experiments conducted on rocks from other potential repository localities. Observed data were evaluated with respect to fabric pattern studied by anisotropy of magnetic susceptibility technique. Quantification of magnetic fabrics and parameters allowed us to elaborate interpretation of geotechnical and physical parameters of the studied rocks.

Using samples of boreholes mineral composition study was carried out with spectral analysis and image interpretation according to the radiance and reflectance.

The hydrogeological monitoring network comprises 3 boreholes and 6 well springs on the surface as well as 36 points of water infiltration into the URF. Study of hydrogeochemistry revealed composition of fluids as well as their origin and age.

For better understanding geological conditions was built 3D geological model in the vicinity of URF Bukov based on newly collected underground data, archival data as well as newly constructed geological map of the surface above URF. The area of URF Bukov was visualized in 3D for the purpose of future experimental programme planning. The visualization comprises of laserscan of all of the tunnels with depicted lithology, all data collected by structural geologist and also shows the location of boreholes, samples and

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

hydrogeological monitoring points. Moreover for ease of the use all of the data are stored in attribute table within the 3D visualization.

Keywords

Underground research facility, laboratory, site selection, Bukov, spectral analysis, petrophysics, 3D model, transport parameters, geological description, hydrogeology, geotechnics, petrology, geochemistry, dating

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

1 Úvod

Tato závěrečná zpráva byla zpracována v rámci projektu SÚRAO „Výzkumná podpora bezpečnostního hodnocení hlubinného úložiště“, který je součástí přípravy hlubinného úložiště radioaktivních odpadů (dále jen HÚ). Cílem projektu byl sběr a interpretace geologických dat, tvorba modelů a získání informací potřebných pro zhodnocení potenciálních lokalit pro umístění HÚ z hlediska dlouhodobé bezpečnosti. Na základě veřejného zadávacího řízení byla v červenci 2014 uzavřena čtyřletá smlouva s ÚJV Řež, a. s. a jeho subdodavateli: Českou geologickou službou; ČVUT v Praze; Technickou univerzitou v Liberci; Ústavem Geoniky AV ČR, v. v. i.; a společnostmi Arcadis CZ a. s.; Progeo, s. r. o.; Chemcomex Praha, a. s. a Centrum výzkumu Řež s. r. o. o poskytování výzkumné podpory hodnocení dlouhodobé bezpečnosti v následujících oblastech:

- i. chování VJP a forem RAO, nepřijatelných do přípovrchových úložišť, v prostředí hlubinného úložiště;
- ii. chování ukládacích obalových souborů (UOS) VJP a RAO v prostředí hlubinného úložiště;
- iii. chování tlumících, výplňových a dalších konstrukčních materiálů v prostředí hlubinného úložiště;
- iv. řešení úložných vrtů a jejich vliv na vlastnosti obklopujícího horninového prostředí;
- v. chování horninového prostředí;
- vi. transport radionuklidů z úložiště;
- vii. další charakteristiky lokalit potenciálně ovlivňující bezpečnost úložiště.

Cílem dílčího projektu Komplexní geologická charakterizace prostorů (PVP Bukov PB-2014-ZL-U2301-004-BUKOV) byla komplexní geologická charakterizace horninového prostředí PVP Bukov, a to v podzemním díle a na povrchu. Řešení projektu bylo zaměřeno na následující problematiku (dle ZL-U2301-004-BUKOV).

1. Stanovení tenzoru napjatosti masivu (ÚGN). V rámci řešení projektu byl stanoven tenzor napětí na základě měření ve dvou stanicích. Dále byla vypracována přesná geometrie vrtných prací, které byly realizovány v režii objednatele.

2. Geomechanické a geotechnické parametry podzemního díla, stanovení geotechnických vlastností hornin v podzemním díle a na povrchové lokalitě (ÚGN). Jedná se o stanovení základních terénních geotechnických parametrů horninového prostředí a to jak vlastního důlního díla, tak vrtů. Dále byly stanoveny mechanické, materiálové a technologické vlastnosti hornin v podzemí a na povrchu, proběhlo ověření chování svorníkové výztuže. Dále byla dodavatelem využita veškerá data a vzorky z ražeb.

3. Opakovaná konvergenční a tenzometrická měření (ÚGN). Tato konvergenční měření a monitorování změn napětí horninového masivu byla prováděna na instalovaných tenzometrických svornících během výstavby díla

4. Seismické projevy trhacích prací (ÚGN). Účelem měření bylo stanovení velikosti vibrací (maximální hodnoty rychlosti kmitání) vyvolaných ražbou důlních děl pro experimentální laboratoř (PVP) na úseku Bukov v důlním poli Rožná.

5. Geologické mapování, mineralogická, petrologická petrofyzikální, a geochronologická charakterizace horninového prostředí (ČGS). Soubor výše uvedených

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

metod syntetickým způsobem charakterizuje horninové prostředí PVP Bukov v podzemí a na povrchu.

6. Spektrální analýza vrtného jádra (ČGS). Na vybraných úsecích vrtů (cca 50 m) vrtů BJ-1 a BJ-3 bylo provedeno skenování a hyperspektrální analýza vrtného jádra. Byly rozlišeny základní minerály, zóny zvýšené alterace, mylonitové zóny a četnost křehkého porušení jádra.

7. 3D strukturně-geologický model (ČGS). Na základě výše uvedených metod byl vyhotoven 3D strukturně geologický model. Model zohledňuje 2 úrovně: a) detailní strukturní model PVP včetně přístupových částí, který využívá data získaná během ražeb (např. strukturní mapování, geologická mapa), a b) globální, který vizualizuje struktury širšího okolí pracoviště včetně zpracované archivní dokumentace DIAMO s.p.

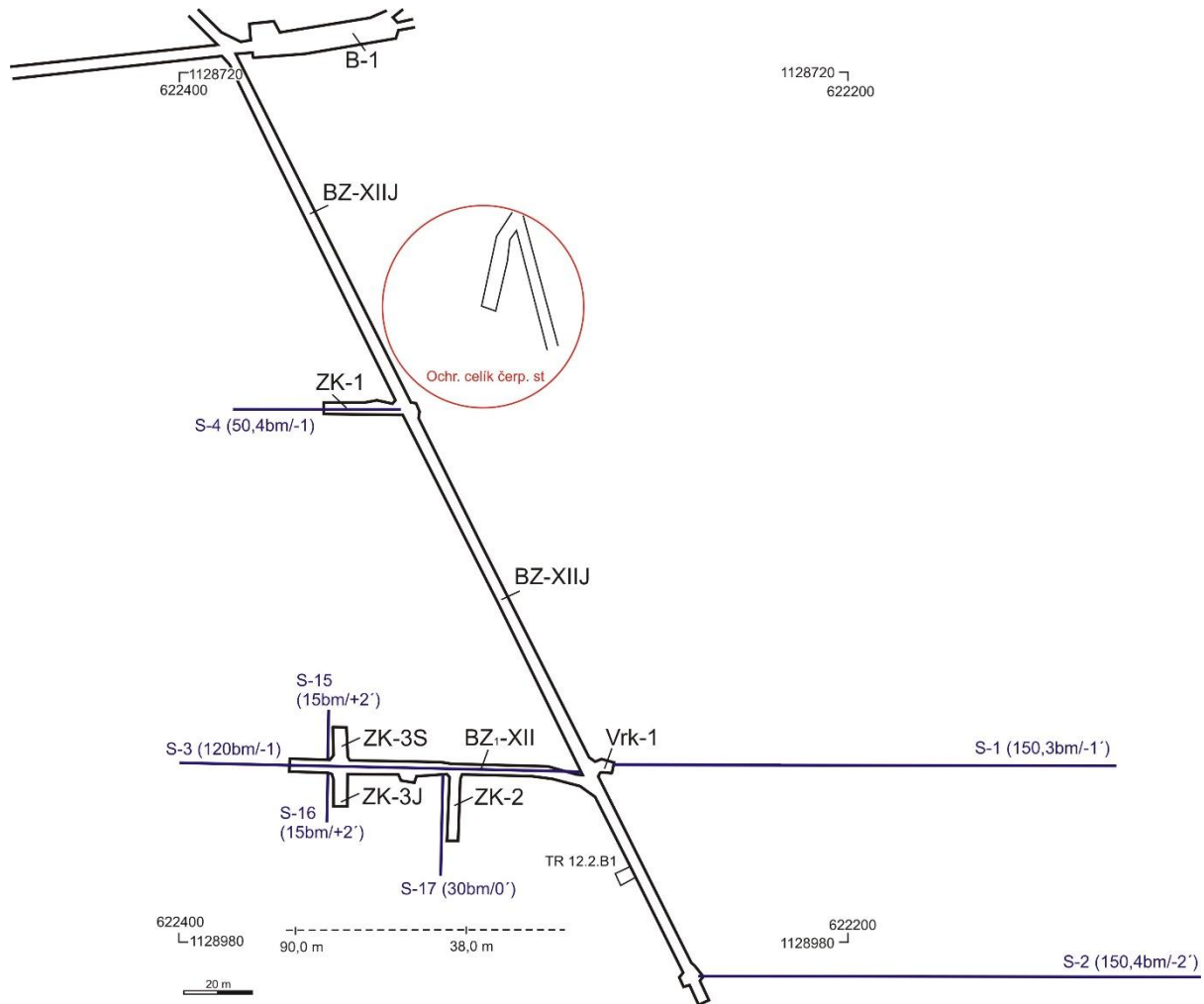
8. Hydrogeologické mapování (ČGS). Hydrogeologické výzkum zahrnuje práce na povrchové lokalitě (Obr. 2a) a práce v podzemním díle. Data z povrchových měření budou použita ke korelacím s hydrogeologickými údaji z podzemních prostor laboratoře Bukov. V rámci podzemní části proběhl standardní hydrogeologický monitoring.

9. 3D geomechanický model (Arcadis). Na základě získaných geotechnických dat byl vytvořen 3D geotechnický model PVP.

10. Stanovení transportních charakteristik horninového prostředí PVP Bukov (ÚJV). Byly charakterizovány transportní vlastnosti PVP Bukov se zaměřením na horniny, které se mohou vyskytnout na lokalitě Kraví hora či v jiných kandidátních lokalitách. Byly stanoveny difúzní koeficienty na základě stanovení difúze tricia a Cl-36 a sorpční koeficienty s radionuklidy umožňující srovnání vybraných hornin PVP Bukov s horninami měřenými v předchozích letech. Získané poznatky poskytují data z hloubek odpovídajících hloubce úložiště potřebná pro předběžné bezpečnostní rozbory kandidátních lokalit a vedou k porozumění transportním procesům probíhajícím v hloubce úložiště.

V rámci závěrečné zprávy jsou shrnuty výsledky terénního i laboratorního výzkumu v souvislosti s řešením zadávacího listu projektu „Výzkumná podpora pro bezpečnostní hodnocení hlubinného úložiště“ v rámci projektu „Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov“. Hlavním cílem byla komplexní zhodnocení horninového prostředí v prostoru budovaného podzemního výzkumného pracoviště Bukov (Obr. 1) a širšího území v povrchové části PVP. Práce byly realizovány čtyřmi institucemi, a to Českou geologickou službou, ÚJV Řež, a. s., Ústavem Geoniky AV ČR, v. v. i. a firmou Arcadis s. r. o. Mezi hlavní parametry prováděného výzkumu patřila komplexní geologická, petrologická a petrofyzikální charakteristika horninového prostředí, stanovení základních hydrogeologických parametrů podzemních vod, spektrální analýza vrtných jader, seismický monitoring, stanovení transportních charakteristik hornin, analýza geomechanických a geotechnických parametrů horninového masivu. Na základě integrace širšího souboru geologických dat byl vytvořen 3D strukturně-geologický a geomechanický model PVP Bukov. Veškeré práce byly realizovány v souladu s věcným a časovým harmonogramem zadávacího listu s výjimkou realizace čtyř měřících geotechnických vrtů S-18 až S-21 ve zkušební komoře ZK-3S. Z tohoto důvodu bylo na KD dne 18. 4. 2017 rozhodnuto, že kapitola „Syntetická geotechnická charakterizace horninového prostředí PVP Bukov“ která je zpracovávána Ústavem Geoniky AV ČR bude odevzdána odděleně, a to v termínu do 1. 9. 2017.

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017



Obr. 1 Schematický plán PVP Bukov s vyznačením jednotlivých rozrážek a vrtů (zdroj: DIAMO s.p.)

V rámci výzkumných prací PVP Bukov proběhl detailní výzkum dle možností a přístupnosti díla v letech 2014-2017. Prováděné práce a probíhaly v souladu s řešením projektu „Strukturní mapování důlních děl a vrtů PVP Bukov - Pilotní charakterizace horninového masivu v podzemním výzkumném pracovišti Bukov (ČGS, 2014-2017).

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

2 Multidisciplinární geologická charakteristika horninového prostředí PVP Bukov

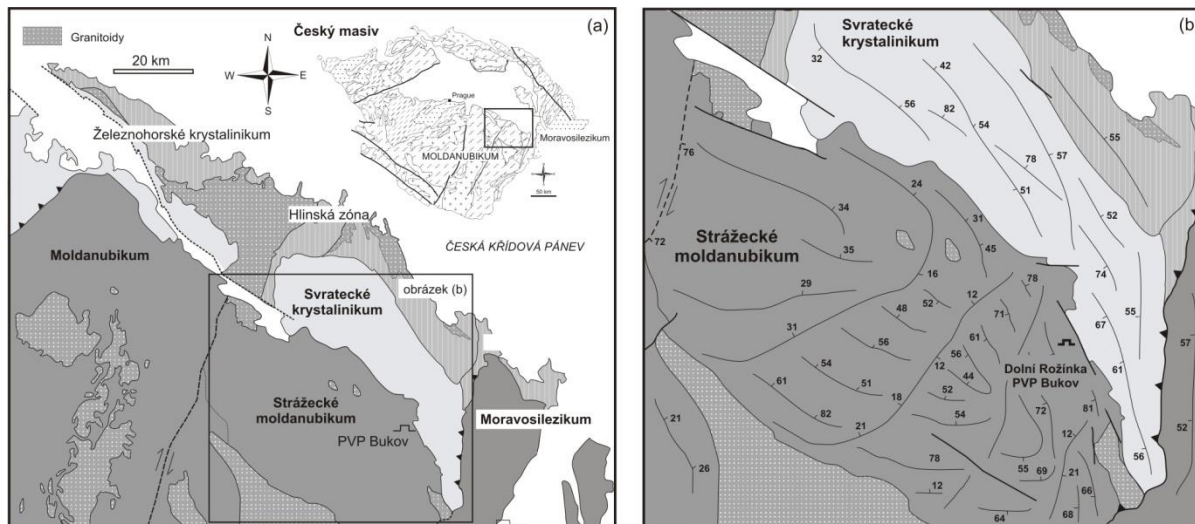
2.1 Geologický popis PVP Bukov

2.1.1 Geologická charakteristika studovaného území

Zájmové území PVP Bukov se nachází na 12. patře podzemních prostor ložiska Rožná, na severním okraji obce Bukov (jihovýchodně od obce Dolní Rožínka). Zájmové území spadá do rudního pole Rožná-Olší, kde v letech 1957 až 2017 probíhala hlubinná těžba uranu. Uranové ložisko Rožná náleží k ložiskům zónového typu, kde se mineralizace nachází zejména v rozptýlené formě podél tektonických zón. Ekonomicky nejvýznamnější typ hydrotermální uranové mineralizace (kalcit-chlorit-uraninit) z pohledu časového zařazení spadá do období 280 až 260 Ma (shrnutí Kříbek a Hájek eds. 2005).

Z pohledu regionálně-geologického členění jednotky Českého masivu (Mísař et al. 1983) zájmová lokalita leží v komplexu vysoce metamorfovaných hornin severovýchodního okraje jednotky strážeckého moldanubika při styku se svrateckým krystalinikem (Obr. 2). Přehled nejstarších geologických výzkumů a mapování širšího okolí zájmového území shrnuje práce Suesse (1926), který dále publikoval představu rozsáhlé příkrovové stavby v oblasti východní části Českého masivu. Práce Svobody (1966) a Mísaře et al. (1983) měly význam pro základní charakteristiku a regionálně-geologické členění oblasti. Podrobné geologické mapy byly sestaveny na základě průzkumu na uranové rudy (např. Černyšev 1958; Černyšev 1959; Zrůstek 1980; Daněk. 1992; Ambrož 1973; Hájek 1987; Plhal. 1972; Pluskal 1974). O litologickém a petrologickém složení hornin ložiska Rožná - Olší pojednávají práce Fediuka et al. (1973), Barjuškina et al. (1981), Hájka a Jurgensona (1982), Hájka (1987) a Hájka a Uhlíka (1987). Výsledkem navazující etapy geologického mapování je list 1 : 50 000 Bystřice nad Pernštejnem (Stárková 1994). Detailním petrologickým a strukturním výzkumem širší oblasti se zabýval Melichar (1995). Nejmodernější syntetickou studii o ložisku Rožná představuje souborná publikace Kříbka a Hájka (2005). Souhrnný přehled o litologickém složení, tektonometamorfním vývoji, stáří horninových komplexů studované oblasti uvádí práce Verner et al. (2009). Model tektonometamorfního vývoje východního okraje Českého masivu publikoval na základě shrnutí doposud publikovaných poznatků a spektra nových geochronologických a petrologických dat Schulmann et al. (2005, 2008, 2009). Uranová mineralizace je na ložisku Rožná - Olší vázána na mladovariské zóny mylonitizace a katalázy v moldanubických metamorfitech (Kříbek a Hájek eds. 2005; Zrůstek 1980; Hájek a Uhlík 1987). Rozsáhlý soubor nových petrologických, strukturních a geochemických dat z širší oblasti zájmového území byl pořízen 2009 až 2011 v rámci projektu „Zhodnocení existujících geologických a dalších informací z území mezi ložisky Rožná a Olší z hlediska vymezení horninového masivu potenciálně vhodného po vybudování hlubinného úložiště“ (Kopačková et al. 2011) a „Geologické mapování v okolí Rožné v měřítku 1 : 5 000 a morfotektonická interpretace družicových a leteckých dat“ (Vondrovic a Verner eds. 2012). Mezi další důležité zprávy shrnující informace o geologické a hydrogeologické stavbě v oblasti ložiskového území Olší a jižní části ložiska Rožná s důrazem na lokalitu Kraví Hora patří zejména práce Ondříka (2010a, 2011), Navrátilové (2011) a Hrkalové (2011). Databáze základních geologických informací je uvedena v práci Ondříka (2010b). Hydraulické vodivosti hornin a výsledky geochemického modelování včetně transportního modelu lokality Kraví hora jsou uvedeny v práci Královcové (2012). Přehled dostupných geologických map

podrobných měřítek z lokality Kraví Hora a blízkého okolí sestavil Ondřík (2010c, 2010d). Výsledky geofyzikálního průzkumu a interpretací tektonické stavby na lokalitě Kraví Hora se zabývá zpráva Sedláka (2010). Přehled fyzikálně-mechanických vlastností hornin shrnuje práce Součka (2010).



Obr. 2 Schematická geologická mapa širšího okolí PVP Bukov: (a) pozice zájmového území v oblasti severovýchodní části Českého masivu; (b) schematická mapa průběhu regionálních metamorfních staveb v oblasti strážeckého moldanubika a vyznačení lokality PVP Bukov (Verner et al. 2009)

V prostředí PVP Bukov se vyskytují horniny severovýchodního okraje strážeckého moldanubika. Z pohledu regionálního členění je toto území řazeno do gföhlské skupiny moldanubika (např. Schulmann et al. 2005). Z pohledu litologického složení se jedná především o cordierit-biotitické a amfibol-biotitické pararuly a amfibolity v různé míře částečného tavení (migmatitizace). Tyto horniny obsahují polohy pestrých horninových vložek - amfibolitů, mramorů, eklogitů a metamorfovaných vápenato-silikátových hornin. Při východním okraji této jednotky v oblasti styku se svrateckým krystalinikem pak vystupuje rozsáhlejší těleso světlých granulitů s drobnými polohami serpentizovaných peridotitů a ortonulových hornin. Do komplexu těchto hornin byly vmístěny amfibol-biotitické melagranity až melasyenity (durbachity) náležící tělesu drahonínského plutonu (stáří 339 Ma; Verner et al. 2009). Vrcholné metamorfní podmínky vývoje vysokotlakých hornin strážeckého moldanubika odpovídají tlakům ~18 kbar a teplotám ~850 °C (Tajčmannová et al. 2006, 2010). Podmínky regionální metamorfózy celého horninového komplexu proběhly v tlacích 3,5–5 kbar a teplotách 680–720 °C (souhrn v Tajčmanová et al. 2006, 2010; Pertoldová et al. 2010). Ze strukturního pohledu je pro oblast strážeckého moldanubika charakteristická superpozice několika regionálních metamorfních staveb. Relativně nejstarší foliace mají ve střední části jednotky převážně strmou orientaci průběhu ~SSV–JJZ. Tyto foliace se směrem k jižnímu i severnímu okraji stáčí do směrů ~SZ–JV. Tyto metamorfní foliace byly různou měrou převrásněny a střížně refoiovány do nových foliačních ploch, které upadají pod mírnými až středními úhly k SV, JZ až JJV (Melichar 1995; Schulmann et al. 2005; Verner et al. 2009). Tyto nové foliace jsou doprovázeny výskytem lineací, které upadají pod mírnými úhly k SZ nebo JV. Dle Tajčmanové et al. (2006) a Schulmanna et al. (2005) v horninách strážeckého moldanubika proběhly dvě variské deformační fáze. Starší fáze (D1) odráží

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

exhumaci z podmínek spodní kůry a je spojena s tvorbou starší strmé stavby (>340 Ma) a mladší fáze (D2) zaznamenává procesy vertikální extruze spojené výzdvihem strážeckého moldanubika (~340–335 Ma). Po vzniku duktilních staveb dochází k tvorbě a polyfázové reaktivaci heterogenního souboru křehkých a křehce-duktilních struktur (zlomových zón, střížných a extenzních puklin) SZ–JV, ZSZ–VJV, SSV–JJZ a S–J orientace (např. Melichar 1995; Kříbek a Hájek eds. 2005; Vondrovic a Verner eds. 2012). Hlavním horninovým typem v blízké jednotce svrateckého krystalinika jsou polymetamorfované leukokratické dvojslídne migmatity s polohami ortorul, pararul a svorů (Verner et al. 2009; Pertoldová et al. 2010). V omezené míře se dále vyskytují tělesa vápenato-silikátových hornin, skarnů a mramorů. Podmínky regionální metamorfózy byly stanoveny na teploty 650–670 °C a tlaky 7–8 kbar s doklady reliktní vysokotlaké metamorfózy nízkotlakého přetisku v podmínkách spodní amfibolitové facie (Pitra a Guiraud 1996; Buriánek et al. 2009). Hlavní deformační stavbou duktilního charakteru je metamorfní foliace charakteru kompozičního páskování upadající pod středními úhly k SV až SSV, v její východní části pak pod středními až strmými úhly k JZ. Folie nesou výrazné lineace protažení, které upadají pod mírnými úhly k SZ nebo JV. Po vzniku duktilních staveb dochází k tvorbě a polyfázové reaktivaci heterogenního souboru křehkých a křehce-duktilních struktur (mylonitových a zlomových zón, střížných a extenzních puklin). Mylonitové a střížné zóny mají v oblasti ložiska převažující strmý sklon k ZJZ. Zlomové a kataklastické zóny mají střední až strmý úklon, v převažující orientaci SZ–JV, ZSZ–VJV, SSV–JJZ a S–J (např. Melichar 1995; Kříbek a Hájek eds. 2005; Vondrovic a Verner 2010). Tyto křehké struktury často nesou znaky polyfázové reaktivity.

2.1.2 Petrografická analýza horninového prostředí a vrtných prací

V průběhu výzkumu byly detailně petrograficky popsány hlavní litologické typy z důlních chodeb a z řady vrtů (S-1, S-2, S-3, S-4, S-15, S-16 a S-17). Celkem bylo odebráno 43 vzorků na petrografický popis (Elektronická příloha 1) a studium chemického složení hlavních minerálních fází (Elektronická příloha 2). Mezi studovanými vzorky převažují biotitické, amfibol-biotitické a amfibolické migmatity. Většinou se jedná o stromatitické migmatity s pásy leukosomu, mesosomu a melanosomu o mocnosti do několika cm. Intenzita migmatitizace je však variabilní a místy nalezneme až 50 cm mocné polohy nebulitů nebo až 30 cm mocné polohy melanosomu. V migmatitech vzácně nalezneme tenké vložky vápenatosilikátových hornin.

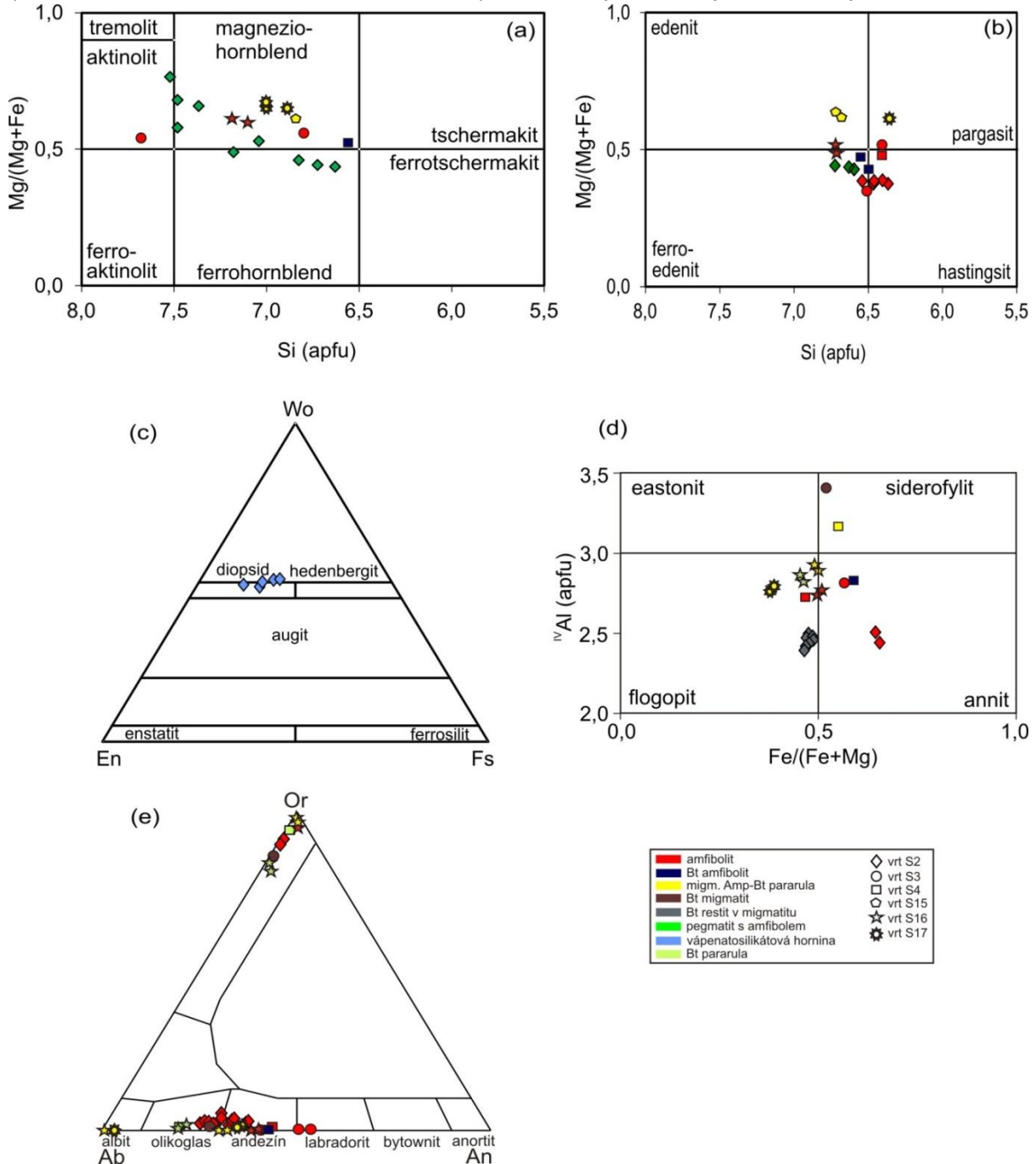
Poměrně časté jsou tenké žíly pegmatitů a granitů. Běžné jsou také drobné hydrotermální žíly většinou jen několik mm mocné. Jedná se o křemenné nebo křemen-karbonátové žíly s akcesorickým množstvím sulfidů. V okolí tektonických poruch je běžná katakláza až mylonitizace. Horniny jsou lokálně postiženy hydrotermální alterací. Následující přehled horninových typů vychází z jednotné horninové legendy PVP Bukov sestavené pro účely tohoto projektu (Příloha 1).

Metamorfované horniny (metamorfní horniny v moldanubiku)

Vápenatosilikátové horniny (erlany, erlanové ruly a reakční skarny) jsou středně zrnité, zelenošedé až tmavě šedé barvy. Vystupují v podobě tenké vrstvy v metrů 20 m ve vrtu S2. Část hornin můžeme charakterizovat jako erlany, avšak některé vzorky mají charakter skapolitových reakčních skarnů. Reakční skarny vznikají na kontaktu mezi vápenato-silikátovou horninou bohatou karbonátem a okolním amfibolitem. Charakteristická je zonalita, kdy v centrální části tělesa je hojný skapolit a/nebo kalcit, a na okrajích dominuje diopsid. Běžně proráží drobné karbonátové žilky lemované amfibolem. Jsou obvykle páskované

a mají granoblastickou stavbu. Skládají se hlavně z idioblastů klinopyroxenu () a skapolitu. Skapolit je často zcela nahrazen sekundárními minerály. Tato minerální asociace je lokálně zatlačována mladším amfibolem. Poměrně hojné jsou idioblasticky omezené titanity a apatity. Vápenatosilikátová hornina obsahuje klinopyroxen, který má poměrně nehomogenní šmouhovitou zonálnost a odpovídá diopsidu ($XMg = 0,58-0,87$; Obr. 3).

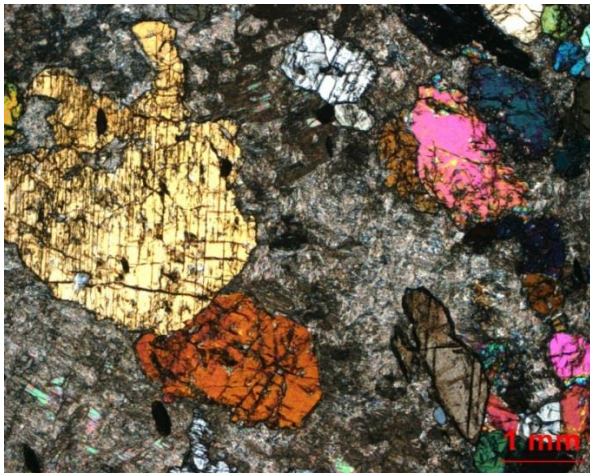
Ve vápenatosilikátové hornině se místo plagioklasů vyskytuje částečně alterovaný skapolit s převahou mejonitové komponenty ($Me = 75-93$ mol. %, $Cl = 0,05-0,09$ apfu, $S < 0,003$ apfu). Erlany jsou středně až drobně zrnité horniny tvořené hlavně diopsidem a bazickým plagioklasem. Zelená barva a masivní granoblastická stavba. S přibýváním křemene (případně společně s biotitem a amfibolem) přechází tyto horniny do erlanových rul.



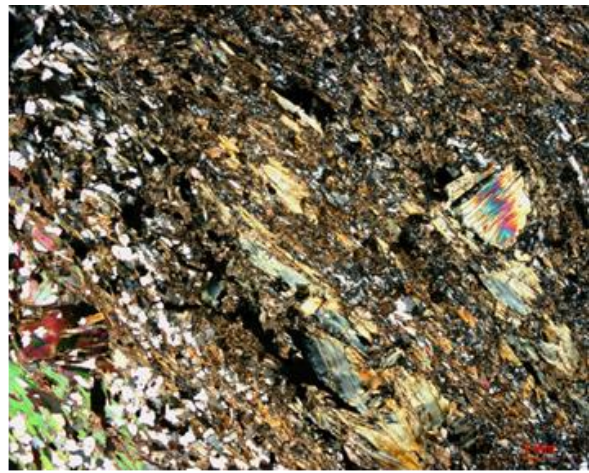
Obr. 3 Grafické znázornění složení minerálů z hlavních horninových typů: (a-b) klasifikace amfibolu (Leake et al. 1997), (c) klasifikace pyroxenů (Morimoto et al. 1988), (d) klasifikace biotitů, (e) klasifikace živců

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

Biotitická rula až biotitický restit je středně zrnitá šedočerná hornina, místy s až několik mm mocnými neprůběžnými pásky leukosomu. Biotitický restit se skládá z drobných lupínků biotitu, které jsou uspořádány souhlasně s foliací (Obr. 5). Plagioklas je hypautomorfní a intenzivně postižený sekundárními přeměnami. Xenomorfní křemen často slabě undulózně zháší. Mezi akcesorickými minerály dominují opakní minerály, které jsou často doprovázeny apatitem a monazitem. Leukosom se skládá z hypautomorfního plagioklasu a křemene. Restitická poloha v migmatitu obsahuje biotit, jehož chemické složení leží v klasifikačním diagramu poblíž hranice flogopitu - annitu ($IVAl = 2,42\text{--}2,50$ apfu, $X_{Fe} = 0,46\text{--}0,49$; Obr. 3).



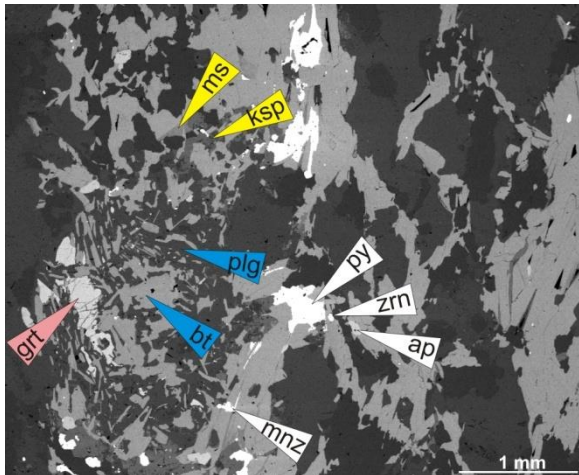
Obr. 4 Vápenatosilikátová hornina, vyrostlice pyroxenu jsou uloženy v alterovaném plagioklasu, XPL



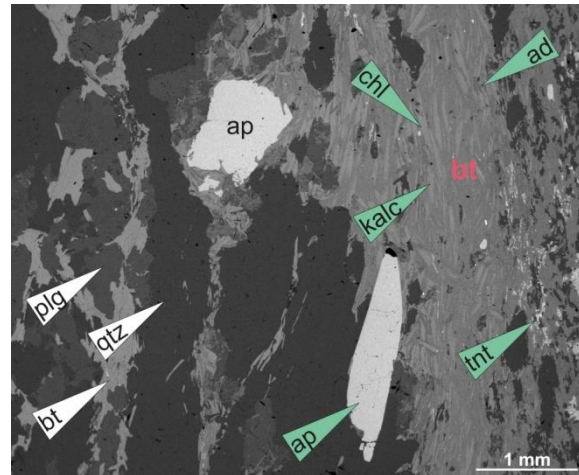
Obr. 5 Biotitická pararula až biotitická břidlice (restit) na obrázku dominují lupínky biotitu v malém množství je přítomen křemen, XPL

Biotitická pararula se vyskytuje jako polohy (do 2,8 m mocnosti) v amfibolických rulách. Vyznačuje se jemným páskováním s převahou biotitových domén. Hlavní minerály tvoří plagioklas, křemen a biotit, minoritně se vyskytuje granát. Draselný živec a muskovit jsou přítomny jako produkty rozpadu biotitu a plagioklasu, které nahrazují granát (Obr. 6). Nepravidelná zrna plagioklasu vykazují složení oligoklasu (An_{19}). Druhotný K-živec odpovídá ortoklasu s 5 % albitové komponenty. Relikty granátu (Obr. 6) mají almandinové složení ($Alm_{0,66} Prp_{0,15} Grs_{0,09} Sps_{0,09}$; $X_{Fe} = 0,81$), které se vyznačuje odlivem vápníku a nízkou grosulárovou komponentou (kolem 9 %). Biotity tvoří mozaiku lupenitých agregátů, které se řadí do nepravidelných pásků. Jejich složení odpovídá annit-flogopitu s hodnotou $X_{Mg} = 0,46$ a s obsahem Ti do 0,19 apfu. Akcesorické minerály tvoří apatit, zirkon, pyrit, chalkopyrit, monazit a xenotim. Pyrit někdy uzavírá inkluze pyrhotinu a nikelinu. Hydrotermální aktivita se projevuje silnou chloritizací biotitových pásků za vzniku podstatného množství apatitu, aduláru, kalcitu a druhotného titanitu (Obr. 7).

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017



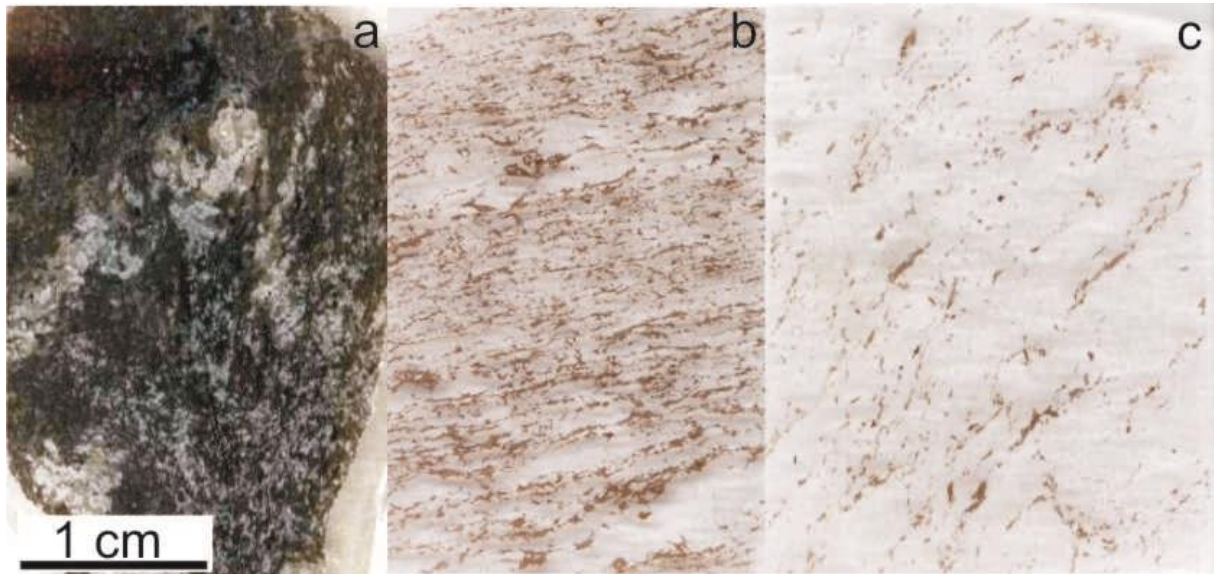
Obr. 6 Původní zrno granátu v migmatizované pararule zcela zkonsumované biotitem (BSE)



Obr. 7 Alterace biotitu v migmatizované pararule (BSE)

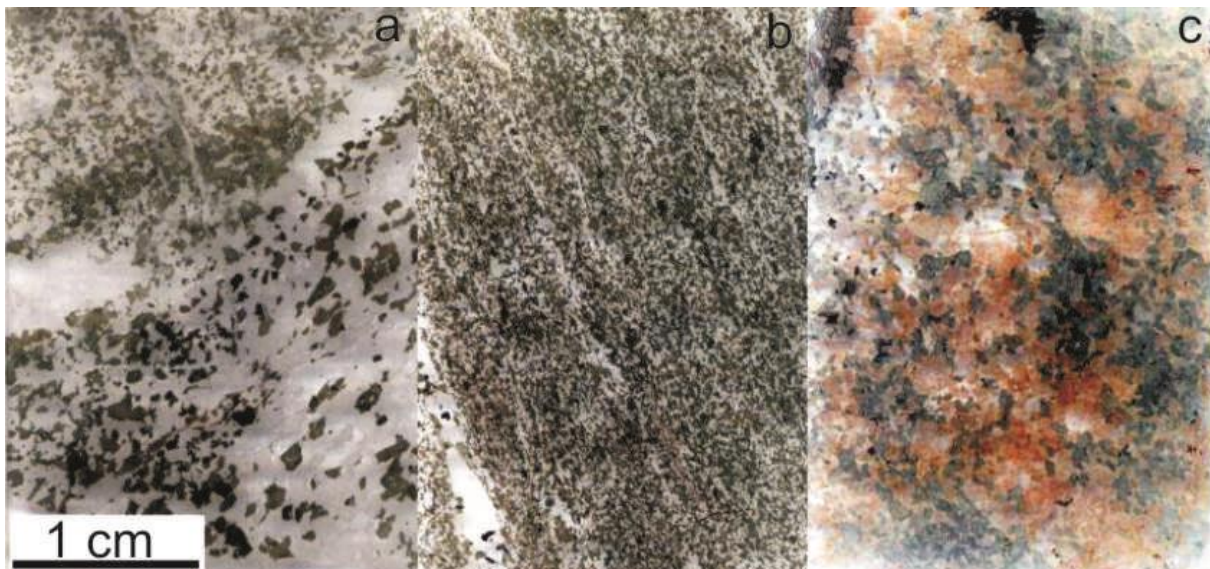
Stromatitický biotitický a sillimanit-biotitický migmatit s přechody do nebulitického migmatitu je dominantním horninovým typem ve vrtech S-1 a S-2 naopak ve vrtech V3 a V4 tvoří vložky od 0,3 do 2 m. Výrazně kolísá zejména modální zastoupení biotitu v hornině (Obr. 8). Pásky leukosomu mají v stromatitických migmatitech mocnost od několika mm do několika cm a střídají se s biotitem bohatými polohami (melanosom) jejichž mocnost obvykle nepřesahuje několik mm. Místa nacházíme až 40 cm mocné polohy biotitických rul, které můžeme také interpretovat jako melanosom (restitické akumulace biotitu). Polohy nebulitů mají mocnost kolem 1 m a melanosom zde tvoří nepravidelné a neostře ohraničené skvrny. Leukosom obsahuje minerální asociaci s draselným živcem, plagioklasem, křemenem a podružným biotitem. V polohách melanosomu dominuje biotit méně je pak zastoupen plagioklas a křemen, místy se vyskytuje také draselný živec. Nepravidelná zrna plagioklasu vykazují složení oligoklasu (An_{19-26}), draselný živec se složením ortoklasu obsahuje 13 % albitové komponenty. Častým projevem interakce obou fází jsou myrmekity albitu a křemene. Biotity tvoří nepravidelné lištovité nebo lupenité agregáty v matrix, jejich složení odpovídá annit-flogopitu s hodnotou $X_{Fe} = 0,51$. Muskovit většinou nahrazuje biotit nebo se vyskytuje jako sericit v plagioklasu. Hodnota Si v muskovitu se pohybuje kolem 3,1. Granát je poměrně vzácný a většinou bývá uzavřen v plagioklasu. Lokálně se objevuje sillimanit. Z akcesorických minerálů je v migmatitech zastoupen hlavně apatit, zirkon, ilmenit a monazit.

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017



Obr. 8 Texturní rozdíly mezi dominantními typy migmatitů: a - restitická poloha s převahou biotitu (S2E), b –melanokratický stromatitický migmatit (S2N), c - leukokratický stromatitický migmatit (S2O)

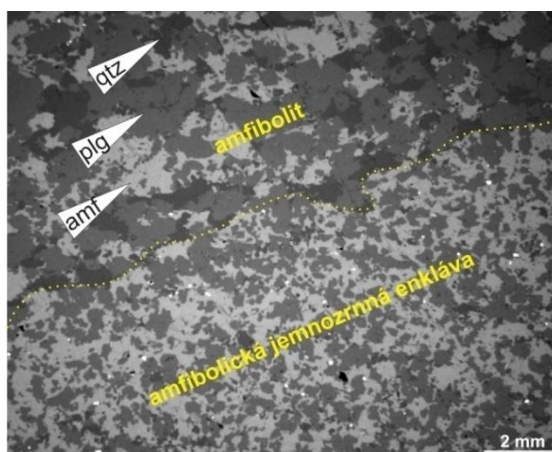
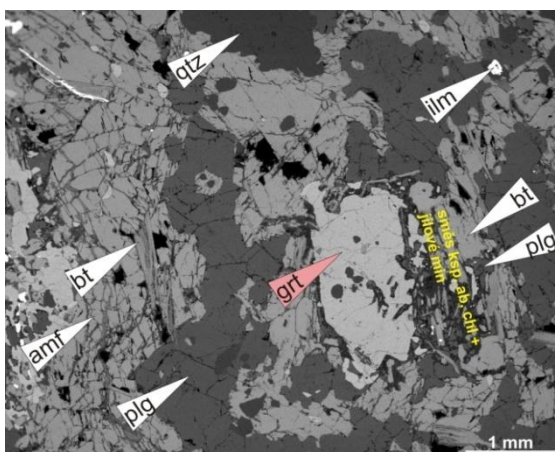
Stromatitický amfibolický a amfibol-biotitický migmatit je páskovaná drobnozrnná hornina, které tvoří neostře přechody z amfibolitu (Obr. 9). Leukosom je zastoupen v podobě maximálně několik mm mocných, zvrásněných poloh. Hlavní minerální asociaci tvoří plagioklas, amfibol a křemen. Vedlejším minerálem je biotit. Lokálně se vyskytuje granát. Akcesorické minerály jsou zastoupeny apatitem, titanitem a opakními minerály, např. ilmenitem a pyritem. Hydrotermální alterace se projevují přítomností kalcitových žilek a alterací plagioklasu.



Obr. 9 Texturní rozdíly mezi dominantními typy amfibolitů: a – migmatizovaný amfibolit (S1A), b – amfibolit (S1B), c – hydrotermálně alterovaný amfibolit (S1C)

Amfibol tvoří pásy hypidiomorfních zrn, často nahrazovaných biotitem nebo chloritem. Jejich složení odpovídá magnesiohornblendu až pargasitu ($X_{Mg} = 0,51–0,59$;) nebo hastingsitu až ferro-edenitu ($X_{Mg} = 0,40–0,60$). Složení plagioklasu odpovídá andezínu ($An_{33–41}$), stejně

jako v amfibolitu. Granáty vykazují reekvilibrované složení bez známek zonality s majoritní almandinovou složkou ($\text{Alm} = 51\text{--}56\%$) a poměrně vysokým obsahem grossulárové komponenty ($\text{Grs} = 26\%$). Některé porfyrblasty granátu (Obr. 10) naznačují mírnou zonalitu od středu ke kraji (střed – okraj: $\text{Alm}_{0,51\text{--}0,56}$ $\text{Prp}_{0,14}$ $\text{Grs}_{0,26\text{--}0,25}$ $\text{Sps}_{0,03}$; $\text{XFe} = 0,79\text{--}0,80$) s převládající almandinovou komponentou. Lupenité agregáty biotitu se řadí do úzkých pásků, často také nahrazují amfibol nebo granát. Jsou bohaté na annit-flogopitovou komponentu s hodnotou $\text{XFe} = 0,57\text{--}0,60$ a s obsahem Ti do $0,16\text{--}0,19$ apfu. Okraje biotitu jsou často nahrazovány jemnozrnnou směsí K-živce a albitu, která dále podléhá přeměně na jílové minerály.



Obr. 10 Porfyrblast granátu v migmatizovaném amfibolitu zčásti nahrazovaný biotitem a plagioklasem. Následná alterace způsobuje rozklad biotitu na směs K-živce, albitu a chloritu, BSE

Obr. 11 Kontakt mafické jemnozrnné restitické enklávy s amfibolitem, BSE

V amfibolických migmatitech se vyskytují až několik dm mocné polohy amfibolického nebo pyroxen-amfibolického restitu který vzácně obsahuje granát. Šedočerná horniny se skládá z hypidioblastů amfibolu a někdy také pyroxenu. Plagioklas a křemen jsou zastoupeny podružně. Xenoblasty granátu až 0,3 cm široké jsou nerovnoměrně rozptýleny v hornině. Plagioklas tvoří drobná hypidiomorfní zrna a bývá postižen sericitizací. Vzácně jsou patrná drobná zrna křemene. Pyroxenický restit se skládá z amfibolu 52 mod. %, klinopyroxenu 28 mod. %, granátu 10 mod. %, křemene 5 mod. % a plagioklasu 10 mod. %. Akcesorické minerály (1 mod. %) jsou zastoupeny apatitem, ilmenitem a titanitem.

Migmatizovaná amfibol-biotitická pararula až migmatizovaná biotitická pararula s amfibolem obsahuje až 2 cm mocné světlé pásy. Skládá se především z hypidioblastů amfibolu a plagioklasu. Plagioklas je polysynteticky zdvojitý a bývá výrazně postižen sekundárními přeměnami jako je sericitizace a případně také saussuritizace. Světlé pásy mají tonalitové složení, skládají se opět hlavně z plagioklasu, amfibolu avšak obsahují také xenoblasty křemene a vzácně draselný živec. Zastoupení biotitu v jednotlivých polohách je variabilní ale nepřesahuje 5 mod. %. Vzácně se objevuje granát, který je částečně konzumován biotitem. Lokálně může být přítomen také sillimanit. Někdy obsahuje drobnozrnné, patrně restitické polohy (Obr. 11). Plagioklas vytváří zrna s nepravidelnými okraji, která jsou místy nahrazována sericitem. Chemické složení plagioklasu odpovídá oligoklasu s $\text{An}_{18\text{--}19}$. Protážené agregáty křemene (do 0,8 mm) mají výrazně laločnaté okraje

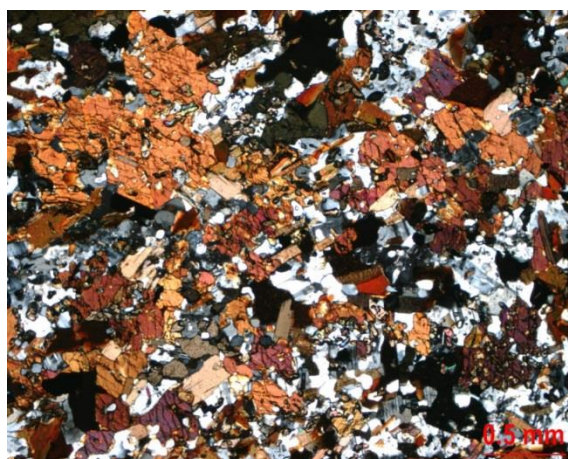
 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

a většina zrn undulózně zháší. Agregáty draselného živce se vyskytují méně, téměř všechny vykazují slabé pertické odmišleniny. Jeho složení odpovídá ortoklasu s poměrně vysokým podílem albitové komponenty (Ab_{17-18}). Hypidiomorfní lupenité a lištovité agregáty (do 0,5 mm) biotitu definují foliaci. Chemické složení biotitu je bohaté na annit-flogopitovou komponentu s hodnotou $X_{Mg} = 0,51-0,53$ a s obsahem Ti do 0,13 apfu. Většina zrn biotitu je chloritizovaná.

Biotitický amfibolit je drobnozrnná, masivní šedozelená hornina. Skládá se hlavně z protáhlých hypidioblastů amfibolu a plagioklasu (Obr. 12). Plagioklasy jsou často intenzivně postižené sekundárními přeměnami. Biotit se vyskytuje v podobně protáhlých lupínků nebo lupenitých agregátů. Biotit obvykle tvoří 15 až 35 mod. %. Lokálně jsou přítomny poměrně hojné xenoblasty křemene (přechod do amfibol-biotitických rul). Amfibol vykazuje mírnou zonálnost, středy odpovídají svým chemickým složením edenitu ($X_{Mg} = 0,49-0,51$), směrem ke kraji se složení mění na magnesiohornblend ($X_{Mg} = 0,57-0,60$). Nepravidelná, hypidiomorfní zrna plagioklasu odpovídají andezínu (An_{35-38}). Některé středy větších zrn jsou sericitizované. Někdy je přítomen křemen ve formě drobných undulózně zhášejících zrn. Biotit vytváří lupenité agregáty (do 0,7 mm) převážně v asociaci s amfibolem. Biotit je často alterovaný chloritem nebo nahrazovaný druhotným K-živcem (Ab_2). Na alterační změny biotitu se váže produkce druhotného titanitu a apatitu. Jeho složení odpovídá středu izomorfní řady annit-flogopit s hodnotou $X_{Mg} = 0,50-0,51$ a s obsahem Ti do 0,23 apfu.



Obr. 12 Biotitický amfibolit světlá zrna plagioklasu jsou obklopena biotitem a amfibolem, PPL



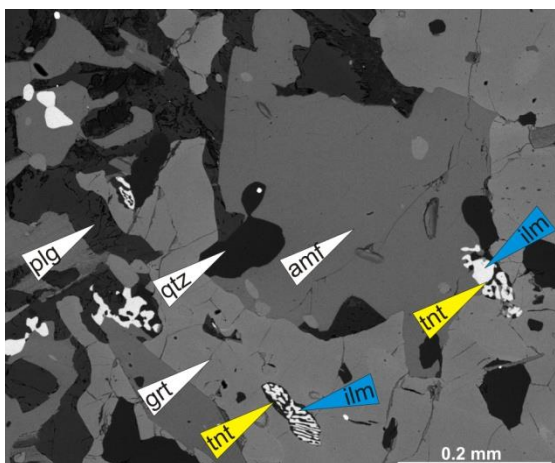
Obr. 13 Amfibolit tvořený většími poikiloblasty amfibolu a drobnými zrny plagioklasu, XPL

Amfibolity se v komplexu migmatitů vyskytují jako polohy mocné až několik m (např. metráž 8–13,2 m vrtu S-2), které jsou proráženy žilami pegmatitů a aplitů. Místy je patrná slabá migmatitizace (Obr. 9), která se projevuje vznikem několik mm mocných pásků leukosomu ($Qtz + Pl \pm Kfs \pm Amp$). Přechody do okolních migmatitů jsou většinou ostré místy dokonce modifikované tektonicky. Amfibolity jsou středně zrnité horniny s nematogranoblastickou strukturou složené hlavně z amfibolu a plagioklasu (Obr. 13). Amfiboly v amfibolitech mají většinou složení, které leží na rozhraní mezi hastingsitem a ferroedenitem ($X_{Mg} = 0,38-0,51$; Obr. 3).

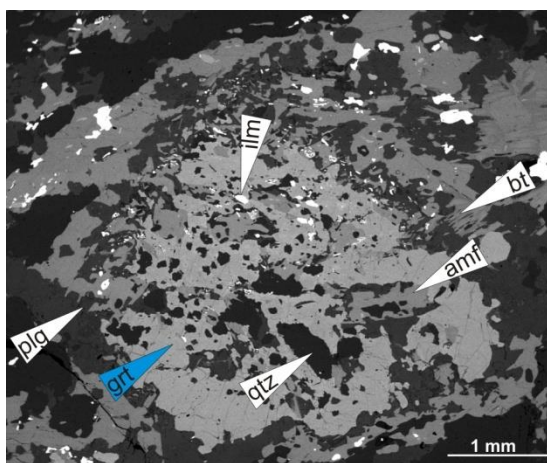
Některá hypidiomorfní zrna amfibolu vykazují mírnou zonálnost, kdy středy mají chemické složení magnesiohornblendu s hodnotou $X_{Mg} = 0,57$ a na okrajích se složení mění na aktinolit s hodnotou $X_{Mg} = 0,53$. Společně s amfibolem v hornině koexistuje biotit

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

(maximálně do 10 mod. %), který svým chemickým složením leží při hranici annitu ($X_{Fe} = 0,48–0,66$). Plagioklas svým složením odpovídá andezínu a vykazuje nevýraznou normální zonálnost ($An_{31–43}$). V některých vzorcích je na okrajích zrn patrný bazičtější okraj, jejichž složení odpovídá labradoritu ($An_{51–53}$). Lokálně jsou přítomny drobné xenoblasty klinopyroxenu. Místy může být přítomen biotit nebo křemen jako vedlejší minerály. S přibýváním biotitu a křemene může hornina kontinuálně přecházet do amfibolicko-biotitických rul, přičemž struktura se mění na lepidoblastickou. Porfyroblasty granátu jsou vzácné. Chemické složení granátu naznačuje mírnou zonalitu od středu ke kraji (střed – kraj: $Alm_{0,52–0,50}$ $Prp_{0,10–0,13}$ $Grs_{0,26–0,29}$ $Sps_{0,10–0,05}$; $X_{Fe} = 0,84–0,79$) s převládající almandinovou komponentou. Akcesorické minerály jsou zastoupeny hlavně titanitem, apatitem a zirkonem. Častým projevem je nahrazování původních izometrických zrn titanitu druhotným ilmenitem (Obr. 14) nebo krystalizace druhotného pyritu, který vyplňuje izostatické prostory mezi zrny. Ilmenity se často vyskytují jako inkluze v granátu (Obr. 15). Amfibolity mohou být lokálně postiženy chloritizací, epidotizací, sericitizací a karbonitizací. Při chloritizaci biotitů někdy vzniká mladší draselný živec.



Obr. 14 Nahrazování původních izometrických zrn titanitu druhotným ilmenitem, uzavřených v granátu (Grt) v amfibolitu, BSE



Obr. 15 Porfyroblast granátu v amfibolitu obsahuje množství inkluzí ilmenitu (titanitu), amfibolu a křemene. Okraj granátu je konzumován biotitem a plagioklasem, BSE

Vyvřelé horniny

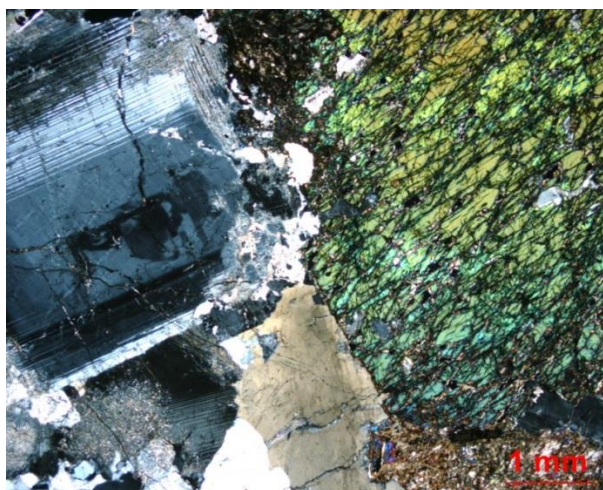
Komplex migmatitů je prorážen žilami biotitických, muskovit-biotitických granitů až pegmatitů. Tyto horniny jsou středně až hrubě zrnité, bělavě šedé až narůžovělé. Skládají se z křemene, draselného živce, plagioklasu, muskovitu a biotitu. Místy zde nachází také drobné žíly leukokratických aplitů někdy s křemenným jádrem obsahujícím muskovit.

Muskovit-biotitické až biotitické granity jsou přítomny ve všech studovaných vrtech. Například 20–40 cm mocné žíly muskovit-biotitických granitů proráží komplex amfibolitů a amfibolických rul ve vrtu S-3. Intruzivní kontakty jsou většinou ostré bez zjevných reakcí s okolní horninou. Jedná se o středně zrnité, masivní, leukokratické horniny, často albitizované s narůžovělým nádechem. Skládají se z křemene, draselného živce, plagioklasu, muskovitu a biotitu.

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

Aplit je světlá, jemnozrná, masivní hornina. Skládá se hlavně z xenomorfního křemene, kyselého plagioklasu a draselného živce. Někdy se v podružném množství vyskytuje drobně zrnitý muskovit. Místy může být přítomen také biotit, bývá však často postižen chloritizací.

Pegmatity se skládají hlavně z křemene, plagioklasu, draselného živce a amfibolu (Obr. 16). Amfibol se vyskytuje v podobě až 1 cm velkých automorfních až hypautomorfních zrn. Mocnost žil se pohybuje od několika cm po zhruba 1 m (např. metráž 9,6–10,9 m vrtu S-2). Pegmatit obsahuje chemicky nehomogenní amfiboly ($Si = 6,60–7,52$ apfu, $X_{Mg} = 0,43–0,76$), které mají uvnitř zrn domény aktinolitického složení (vznikl patrně zatlačováním klinopyroxenu) a dominantní část zrna pak má složení magneziohorblendu, ferrohornblendu, ferroedenitu. Plagioklas má ve srovnání s okolními amfibolity nižší bazicitu a odpovídá svým složením oligoklasu až andezínu ($An_{24–31}$). Draselný živec má poměrně homogenní chemické složení ($Or_{91–92}Ab_{8–10}$).

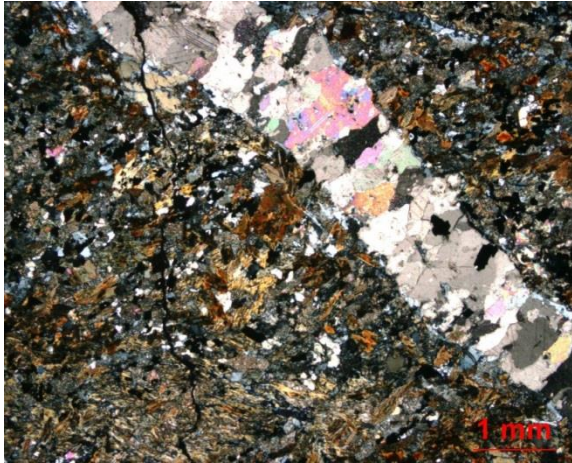


Obr. 16 Amfibolický pegmatit, plagioklasy jsou místy postiženy sericitizací a kaolinizací amfibol je částečně zatlačovaný chloritem, XPL

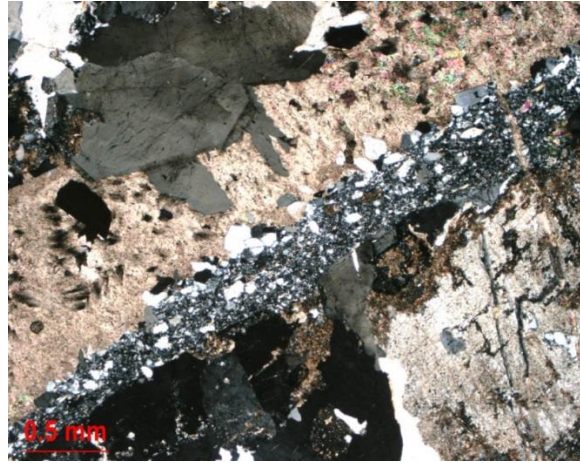
Výplně tektonických poruch

Hydrotermální žila nebo žilník zastupuje typ mineralizace, kterou většinou najdeme na puklinách a zlomech. Aktivitu hydrotermálních roztoků dokumentuje síť drobných kalcitových (Obr. 17), křemenných nebo křemen-albit-adulárových žilek, kterou je protkán celý metamorfovaný komplex. Dominují až několik mm mocné karbonátové žilky. V amfibolitech se může v těchto žilkách vyskytnout prehnit. Poměrně běžné jsou také křemenné a křemen-albitové žilky (Obr. 18), které někdy obsahují pyrit. Pyrit a/nebo chlorit také mohou tvořit povlaky na některých puklinách. V důsledku hydrotermální alterace vznikají na trhlinách vápenatosilikátových hornin (vzorek S2/2; 19,5 m) kalcitové žíly se smektitem a blíže neidentifikovanými slídovými minerály. V podružném množství obsahují také chlorit a křemen. Nejmocnější křemen-kalcitová žilka byla nalezena ve vrtu S-3 na metráži 95 m s mocností 20 cm. Tyto hydrotermální výplně často doprovází rudní mineralizace pyritem.

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017



Obr. 17 Hydrotermálně alterovaná amfibol-biotitická parrula prorážena žilkou kalcitu, XPL



Obr. 18 Hydrotermální žíla v migmatitu. Střední část žíly tvoří kalcit a okraj jsou pak budovány křemenem a albitem, XPL

Mylonit se vyskytuje v maximálně 60 cm mocných zónách. některé vzorky migmatitů jsou postiženy výraznou plastickou deformací a rekrystalizací. Tyto drobnozrnné horniny místy obsahují větší porfyroklasty živců.

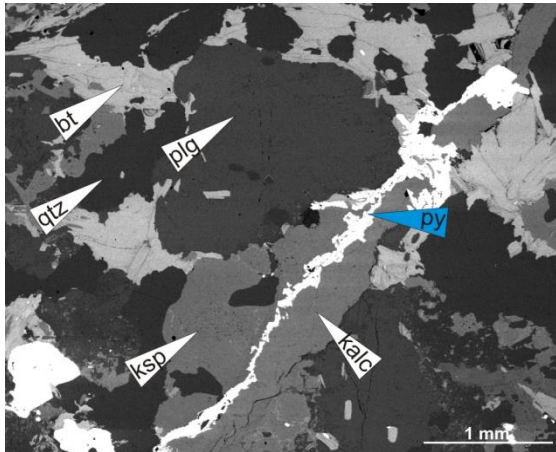
Kataklazit (např. S 2/1; 4,6 m) je tvořen obvykle křemenem a kaolinitem. Někdy jsou také patrné drobné ostrohranné úlomky živců. To dobře odráží minerální složení původního migmatitu (dominantními minerály jsou křemen a živce). Původní biotit se změnil na chlorit, který je společně se smektitem minoritní fází kataklazitu. Z hydrotermálních roztoků pak patrně krystaloval dolomit a ve stopovém množství také kalcit. Horniny podél tektonických poruch jsou často postiženy kataklázou. Vzhledem k tomu, že po poruchových zónách docházelo k migraci fluid, je tento proces provázen sekundárními přeměnami původních horninotvorných minerálů. Kataklazované horniny jsou tak často tvořeny zcela novou minerální asociací, která se výrazně liší od složení původního migmatitu (Obr. 21).

Tektonický jíł vystupuje na zlomech v podobě maximálně několik milimetrů mocných poloh. Červené jíly vyplňující některé tektonické poruchy (např. vzorek S2/3; 37,5 m) obsahují hlavně křemen, méně kalcit, dolomit a kaolinit. Červená barva je způsobena hematitem, který je přítomen pouze ve stopovém množství. Světle zbarvené jíly (vzorek S2/4; 118,6 m) pak obvykle obsahují hlavně slídové minerály (např. muskovit), křemen, méně smektit, kaolinit.

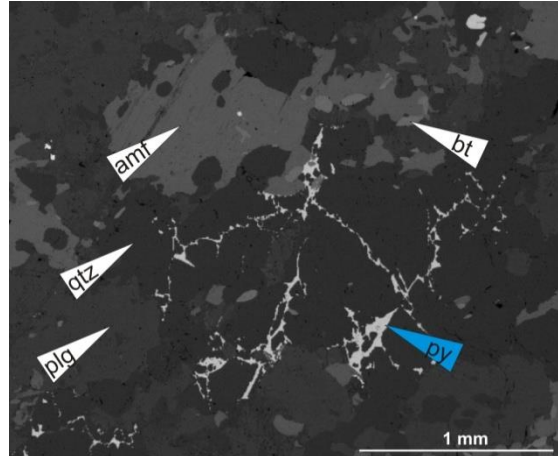
Hydrotermální alterace hornin

Velmi časté jsou také projevy hydrotermálních alterací, které postihují celou horninu nikoli jenom oblasti kolem tektonických poruch. Hojná je sericitizace a kaolinizace živců. Místy je také patrná intenzivní hematitizace živců, chloritizace biotitu a amfibolů. Tyto procesy jsou někdy provázeny projevy draselné metasomatózy (vzniká červeně zbarvený draselný živec), nebo epidotizací.

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

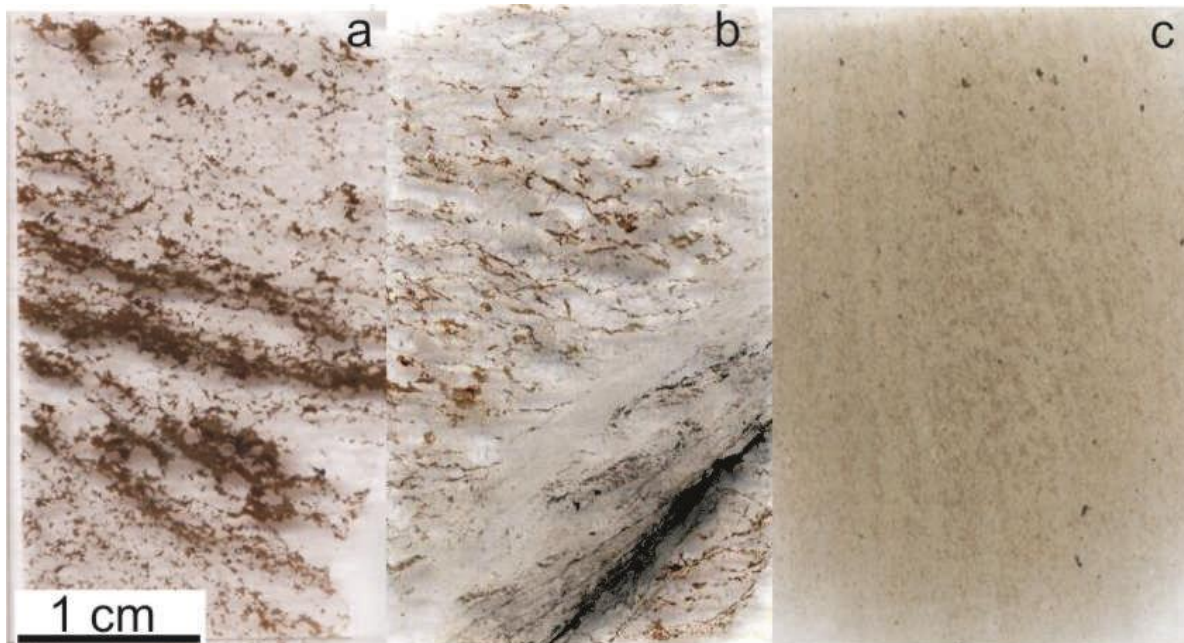


Obr. 19 Biotitický migmatit s žilkami kalcitu, tuto minerální výplň často doprovází rudní v intergranulárních prostorech v amfibolitu, BSE mineralizace druhotného pyritu, BSE



Obr. 20 Krystalizace druhotného pyritu

Hydrotermálně alterovaná rula až migmatit je středně zrnitá šedočerná hornina, která se skládá z drobných lupínků biotitu uspořádaných souhlasně s foliací. Plagioklas je intenzivně postižený sekundárními přeměnami, takže je nahrazen směsí muskovitu a jílových minerálů. Biotit a případně také amfibol jsou nahrazovány sekundárními chlority. Xenomorfní křemen se vyskytuje ve formě drobných zrn relativně rovnoměrně rozptýlených v hornině. Mezi akcesorickými minerály dominují opakní minerály. Místy až 1 mm mocné žíly kalcitu (Obr. 19) nebo povlaky pyritu na intergranulárních trhlinách (Obr. 20).

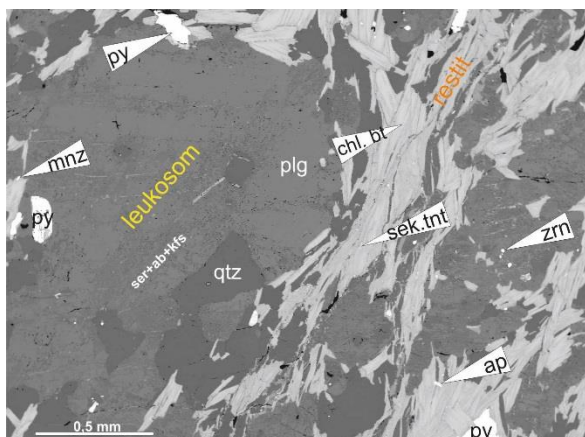


Obr. 21 Sekundární přeměny migmatitů: a - typický stromatitický migmatit (S2L), b – kataklazovaný migmatit prorážený hydrotermálními žilami (S2J), c – intenzivně deformovaný a hydrotermálně alterovaný migmatit (S2F)

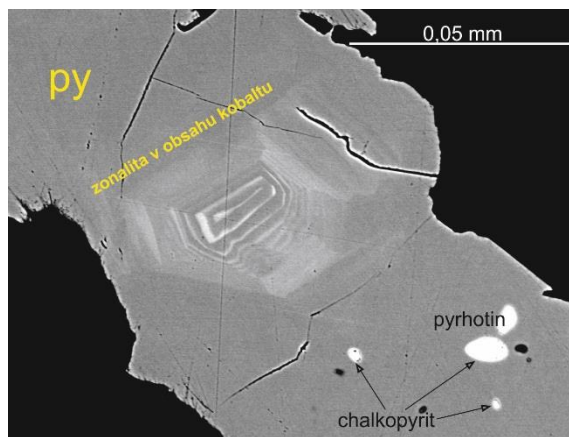
 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

Epidotit (metasomatit) je středně až drobně zrnitá zelená hornina, která se skládá hlavně z křemene a epidotu.

Vtroušené sulfidy v migmatitech jsou poměrně běžné a ne vždy jsou vázány na okolí hydrotermálních žil (Obr. 22). Jedná se většinou o hypautomorfní zrna pyritu. Zajímavý je například výskyt pyritu, který je vázaná na melanosom v stromatitickém biotitickém migmatitu s amfibolem (vzorek S16_02). Pyrit obsahuje drobné inkluze pyrhotinu a chalkopyritu a vykazuje oscilační zonálnost v obsahu kobaltu (Obr. 23).



Obr. 22 Vtroušené sulfidy v migmatitu: hlavní minerální komponenty v leukosomu jsou plagioklas (plg), křemen (qtz) a K-živce. Živce jsou postiženy sericitizací. Chloritizovaný biotit (chl. bt) je hlavní složkou restitu, jeho alterace jsou doprovázeny produkcí sekundárního titanitu (sek. tnt) a apatitu (ap). Další akcesorie jsou zirkon (zrn), monazit (mnz), pyrit (py), BSE



Obr. 23 Detail oscilační zonálnosti v obsahu kobaltu v pyritu (py). Pyrit obsahuje i drobné inkluze pyrhotinu a chalkopyritu, BSE

PT podmínky vzniku

Teploty vzniku amfibolu byly vypočteny pomocí amfibol-plagioklasového (Blundy a Holland 1990) termometru který poskytl teploty 692–727 °C pro tlaky kolem 5 kbar. Amfibol v pegmatitu uvnitř amfibolitů poskytl PT podmínky 669-691 °C (Blundy a Holland 1990) a tlaky kolem 5 kbar (Anderson a Smith 1995).

2.1.3 Geochemická charakteristika horninového prostředí

Studovanou oblast PVP Bukov můžeme z hlediska litologie charakterizovat jako intenzivně metamorfovaný vulkanosedimentární komplex. V tomto komplexu se střídají tělesa vyvřelých a metamorfovaných hornin. Metamorfované horniny jsou postižené různým stupněm parciálního tavení.

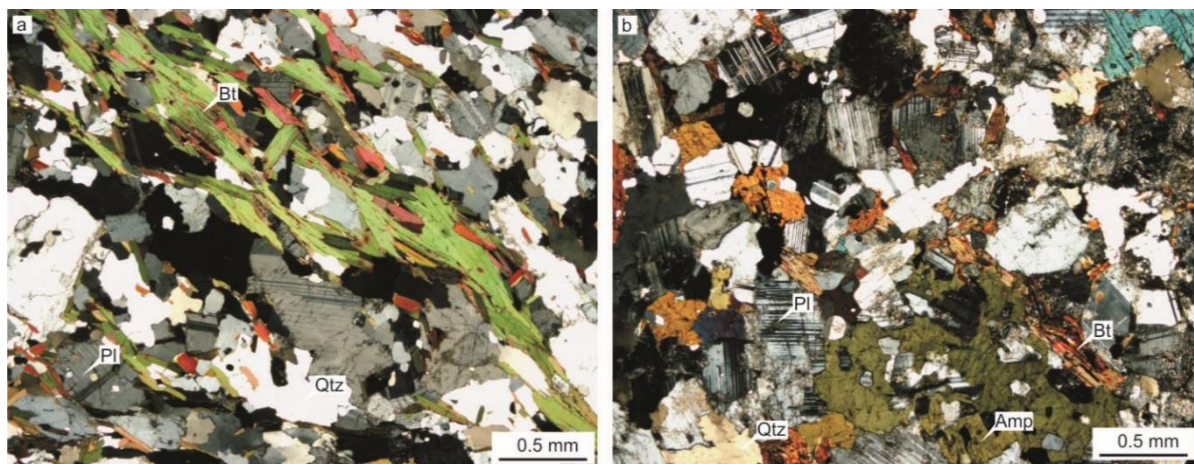
Petrografická charakteristika vzorků vybraných pro chemickou analýzu

Pro účely základní charakteristiky geochemie horninového prostředí byly odebrány hlavní texturní typy migmatizovaných amfibolitů a migmatitů (Tab. 1).

V PVP díla Bukov jsou hojně zastoupeny biotitické stromatitické migmatity. Jedná se o středně zrnité horniny, které obsahují až několik dm mocné polohy melanosomu.

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

V melanosomu převažuje biotit a v menším množství jsou pak přítomny křemen a kyselý plagioklas (vzorek R12/7; Obr. 24). V leukosomu převažují křemen, plagioklas a běžný je také draselný živec. Biotit je většinou přítomen jen v několika modálních procentech. Poměrně vzácné jsou drobné porfyroblasty granátu (vzorek R12/4).



Obr. 24 Typické ukázky (a) biotitického migmatitu (R12/7) a (b) slabě migmatizovaného amfibolitu (R12/1), obě mikrofotografie byly pořízeny v XPL

Další hojně zastoupenou skupinou hornin jsou amfibolity postižené variabilním stupněm migmatitizace. Tento litologický typ je reprezentován vzorkem R12/1 (Obr. 24) jedná se o středně zrnitý migmatizovaný amfibolit. Dominantními minerály jsou amfibol a plagioklas. V malém množství je přítomen biotit (zhruba 15 mod. %). Leukosom je přítomen v drobných žilkách (0,1–2 cm) a skládá se hlavně z plagioklasu, křemene a biotitu. Poměrně vzácný je draselný živec. Lokálně se v komplexu migmatizovaných amfibolitů vyskytují až několik m mocné polohy a čočky bez taveniny. Tyto amfibolem a biotitem bohaté polohy interpretujeme jako mesosom a jsou reprezentovány například vzorkem R12/5. Na druhou stranu mohou amfibolity s vzrůstem obsahu taveniny přecházet do stromatitických amfibol-biotitických migmatitů (tento typ je reprezentován vzorkem R12/3).

Místy se v migmatizovaných amfibolitech nachází drobné čočky a polohy tvořené hlavně amfibolem nebo amfibolem, granátem a pyroxenem. Tyto horniny interpretujeme jako zbytky restitických poloh po parciálním tavení.

Celkově tedy bylo odebráno 20 vzorků (Tab. 1). Na základě petrografie byly vzorky rozděleny na několik horninových typů: biotitický pegmatit (3 vzorky), amfibolický pegmatit (1 vzorek) leukosom v amfibolem bohatém migmatitu (1 vzorek), amfibolický (s proměnlivým obsahem biotitu; 8 vzorků) nebo biotitický migmatit (2 vzorky), amfibol-biotitický mesosom (3 vzorky) a melanosom (2 vzorky) migmatitů (Tab. 1). Řada těchto horninových typů tvoří jen několik cm mocné polohy, a proto jsou v petrografické části zmíněny jako součást některého z hlavních litologických typů. Výsledky chemických analýz jsou k dispozici v Elektronická příloha 3.

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

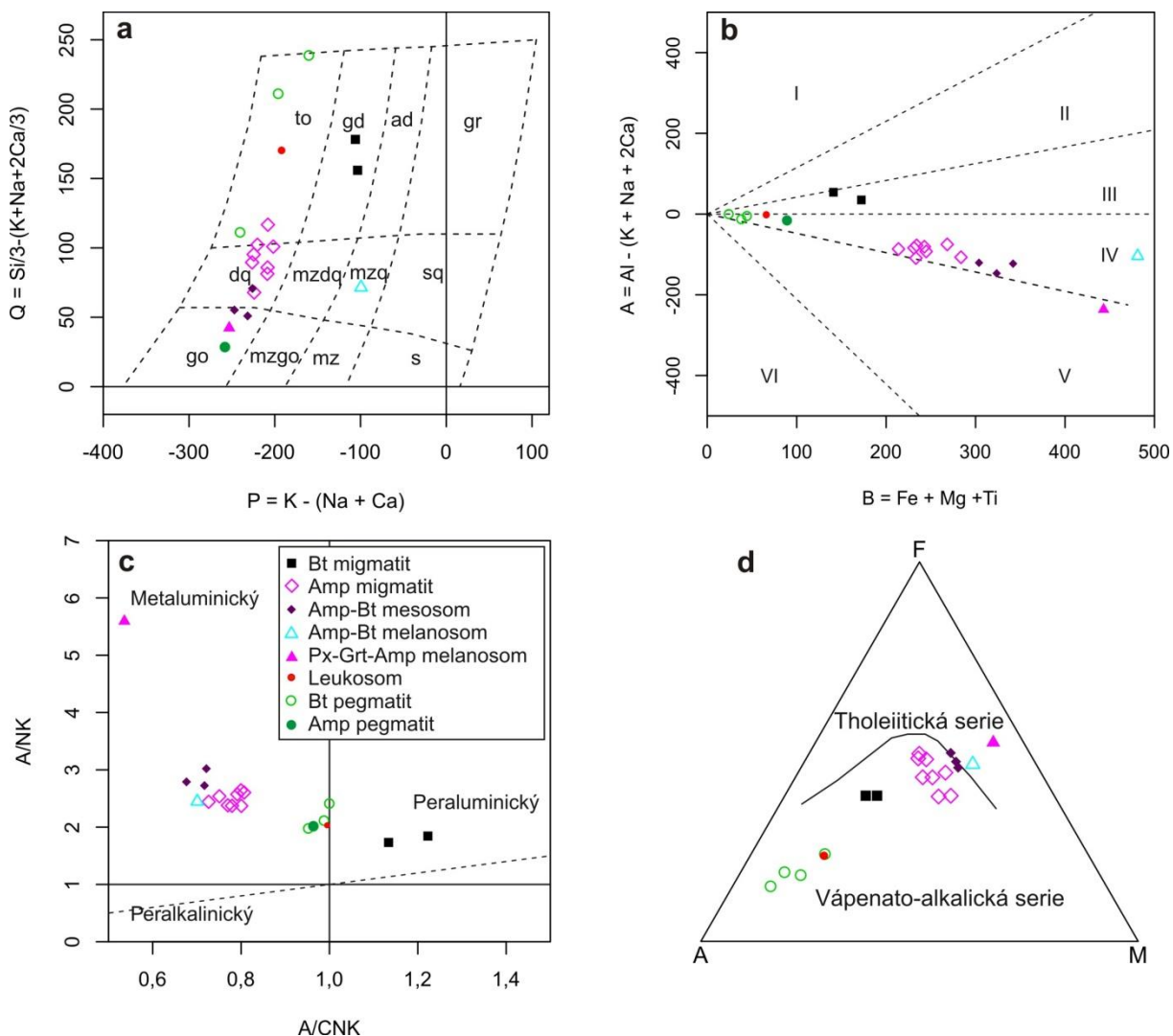
Tab. 1 Petrografická charakteristika vzorků odebraných pro horninovou chemickou analýzu

číslo	hornina	zrnitost	stavba	hlavní minerály	vedlejší minerály	akcesorické min.	sekundární min.
BCH001	melanosom Px-Grt	středně zrnitá	granoblastická	klinopyroxen, amfibol	biotit, křemen	opakní minerály	
BCH002	pegmatit	hrubozrnná	granitická	plagioklas, křemen	biotit, draselný živec	apatit, opakní minerály	
BCH003	Amp migmatit	středně zrnitá	nematogranoblastická	amfibol, plagioklas	biotit, křemen	apatit, opakní minerály, Ttn	sericit, chlorit (biotit)
BCH004	mesosom Amp	drobnozrnná	nematogranoblastická	amfibol, plagioklas	biotit	opakní minerály	kalцит, sericit, chlorit
BCH005	pegmatit	hrubozrnná	písmenková	křemen, plagioklas, draselný živec	biotit	opakní minerály	sericit, chlorit, epidot
BCH006	Amp migmatit	středně zrnitá	nematogranoblastická	amfibol, plagioklas	křemen, biotit	apatit, opakní minerály	sericit
BCH007	leukosom (amfibolit)	středně zrnitá	granitická	draselný živec, plagioklas, křemen	biotit, amfibol		sericit
BCH008	mesosom Amp	středně zrnitá	nematogranoblastická	amfibol, plagioklas	biotit	opakní minerály	chlorit (biotit), sericit
BCH009	melanosom Amp	středně zrnitá	nematoblastická	amfibol, biotit	plagioklas, křemen	opakní minerály, apatit	chlorit (biotit), sericit
BCH010	Amp migmatit	drobnozrnný	nematogranoblastická	amfibol, plagioklas	křemen, biotit	apatit	chlorit (biotit), sericit
BCH011	Amp migmatit	drobnozrnný	nematogranoblastická	amfibol, plagioklas	křemen, biotit	apatit, monazit, opakní minerály	chlorit (biotit)
BK1/260	pegmatit	středně zrnitá	granitická	plagioklas, křemen	biotit	apatit	chlorit, sericit, draselný živec
BK2/260	pegmatit	středně zrnitá	granitická	křemen, plagioklas	amfibol, biotit, draselný živec		sericit, chlorit, draselný živec
R12/1	Amp migmatit	středně zrnitá	nematogranoblastická	amfibol, plagioklas	křemen, biotit, draselný živec	apatit, monazit	chlorit
R12/2	Amp migmatit	středně zrnitá	nematogranoblastická	amfibol, plagioklas	biotit	opakní minerály, apatit, monazit	chlorit, sericit
R12/4	Bt migmatit	středně zrnitá	lepidogranoblastická	křemen, plagioklas	draselný živec, biotit	apatit, opakní minerály	sericit
R12/3	amfibolit	středně zrnitá	lepidogranoblastická	amfibol, plagioklas, biotit	křemen	apatit, opakní minerály, titanit	chlorit
R12/5	mesosom Amp	středně zrnitá	nematogranoblastická	amfibol, plagioklas	biotit	opakní minerály	chlorit
R12/6	amfibolit	středně zrnitá	nematogranoblastická	amfibol, plagioklas	biotit	opakní minerály, apatit	chlorit, sericit
R12/7	Bt migmatit	středně zrnitá	lepidogranoblastická	křemen, plagioklas	draselný živec, biotit	apatit, opakní minerály	sericit

Geochemická klasifikace hornin

Všechny studované horniny byly klasifikovány na základě obsahu hlavních oxidů (Obr. 25).

Chemické složení indikuje rozdílný charakter protolitu pro amfibolické a biotitické migmatity. V P-Q diagramu (Debon a Le Fort 1983) klasifikujeme amfibolické migmatity jako gabra a tonality (a). Biotitické migmatity svým chemickým složením odpovídají granodioritům a amgibol-biotitický mesosom spadá do pole křemenných monzonitů. Pegmatity s biotitem a leukosom (BCH007) spadají do klasifikačního pole tonalitů, zatím co amfibolický pegmatit a oba vzorky melanosomu můžeme klasifikovat jako gabra (Obr. 25a).



Obr. 25 Chemické složení hlavních horninových typů: (a) P-Q diagram (Debon a Le Fort 1983), (b) B-A diagram (Debon a Le Fort 1983) to = tonalit, gd = granodiorit, ad = adamellit, gr = granit, dq = Qtz diorit, mzdq = Qtz monzodiorit, mzq = Qtz monzonit, sq = Qtz syenite, go = gabbro, mzgo = monzogabbro, mz = monzonit, s = syenit., (c) diagram A/CNK vs. A/NK (Shand 1943), (d) trojúhelník AFM (Irvine a Baragar 1971)

V diagramu B-A (Obr. 25 b, Debon a Le Fort 1983) leží většina studovaných hornin v poli metaluminických hornin s minerální asociací biotit ± amfibol ± ortopyroxen ± klinopyroxen, avšak biotitické migmatity spadají do pole peraluminických granitoidů s biotitem (Obr. 25 b). Převážně metaluminický charakter celého horninového komplexu také potvrzuje diagram A/CNK vs. A/NK (Shand 1943, Obr. 25 c). Migmatizované amfibolity (A/CNK = 0,68–0,81)

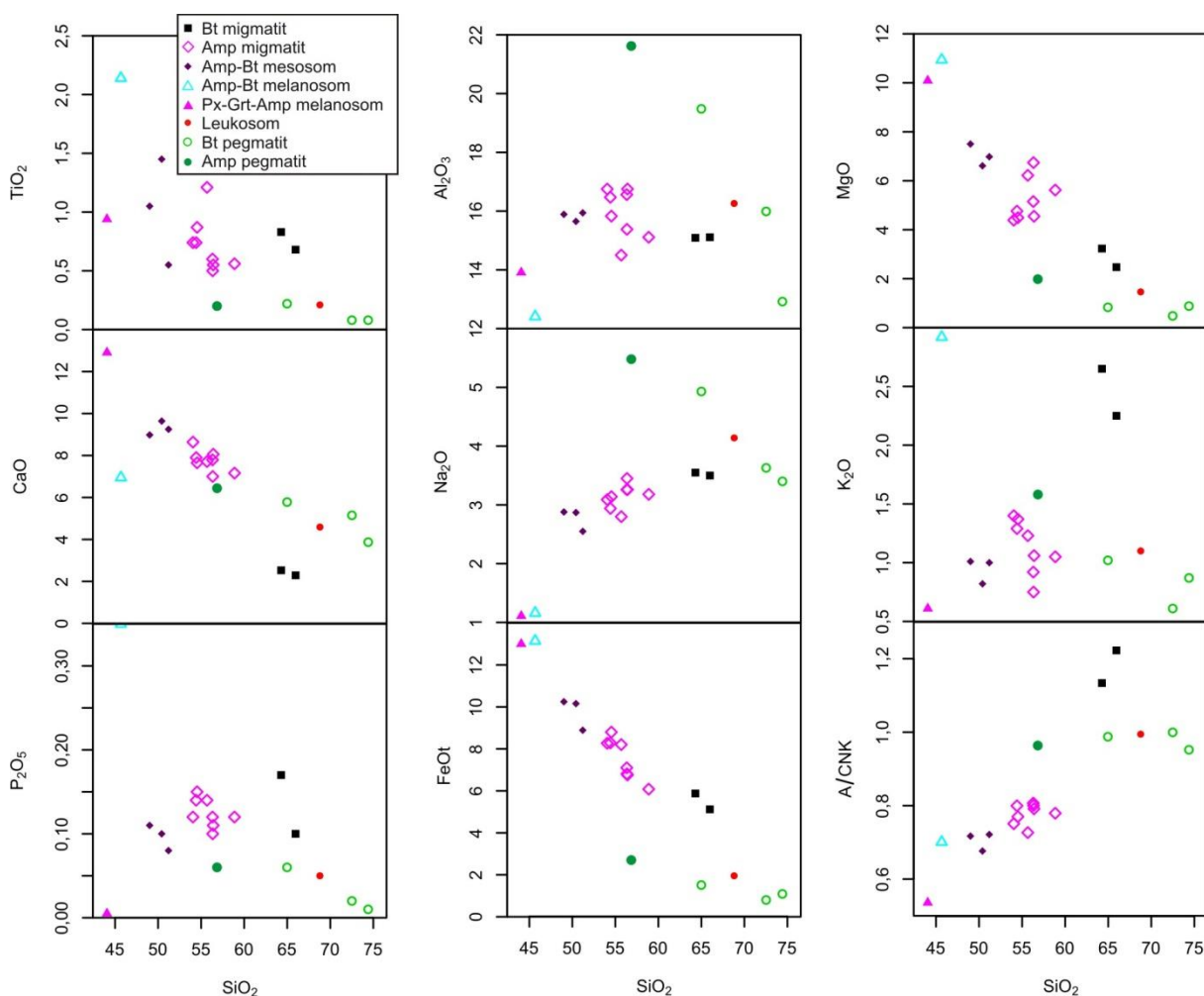
 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

jsou metaluminické. Pegmatity a leukosom leží při hranici mezi metaluminickými a peraluminickými horninami ($A/CNK = 1,0–0,95$). Biotitické migmatity jsou peraluminické ($A/CNK = 1,13–1,22$). Podle AFM diagramu náleží většina hornin k vápenato-alkalické sérii (Obr. 25 d; Irvine a Baragar 1971).

Hlavní prvky

Studované vzorky indikují, že metamorfovaný vulkanosedimentární komplex horniny strážeckého moldanubika je charakterizován převahou bazických až intermediálních hornin ($SiO_2 = 44,1–65,3$ hmot. %). Typický je relativně stabilní obsah Al_2O_3 (12,4–16,8 hmot. %) a variabilní zastoupení K_2O , které je výrazně závislé na obsahu biotitu v hornině. Obsahy SiO_2 (Obr. 26) v biotitických migmatitech (64,31–65,31 hmot. %) jsou výrazně vyšší než v migmatitizovaných amfibolitech včetně vzorků amfibol-biotitického mesosomu (54,44–58,89 hmot. %). Nejnižší obsahy SiO_2 jsou pak v amfibolickém nebo amfibol-pyroxen-granátickém melanosomu (44,08–45,70 hmot. %). Pokud porovnáváme obsahy hlavních oxidů je patrné, že migmatitizované amfibolity jsou ve srovnání s biotitickými migmatity bohatší na MgO , CaO a celkové FeO (Obr. 26). Melanosom pak vykazuje nejvyšší obsahy TiO_2 , MgO , FeO_t , $mg\#$ a nejnižší obsah Na_2O .

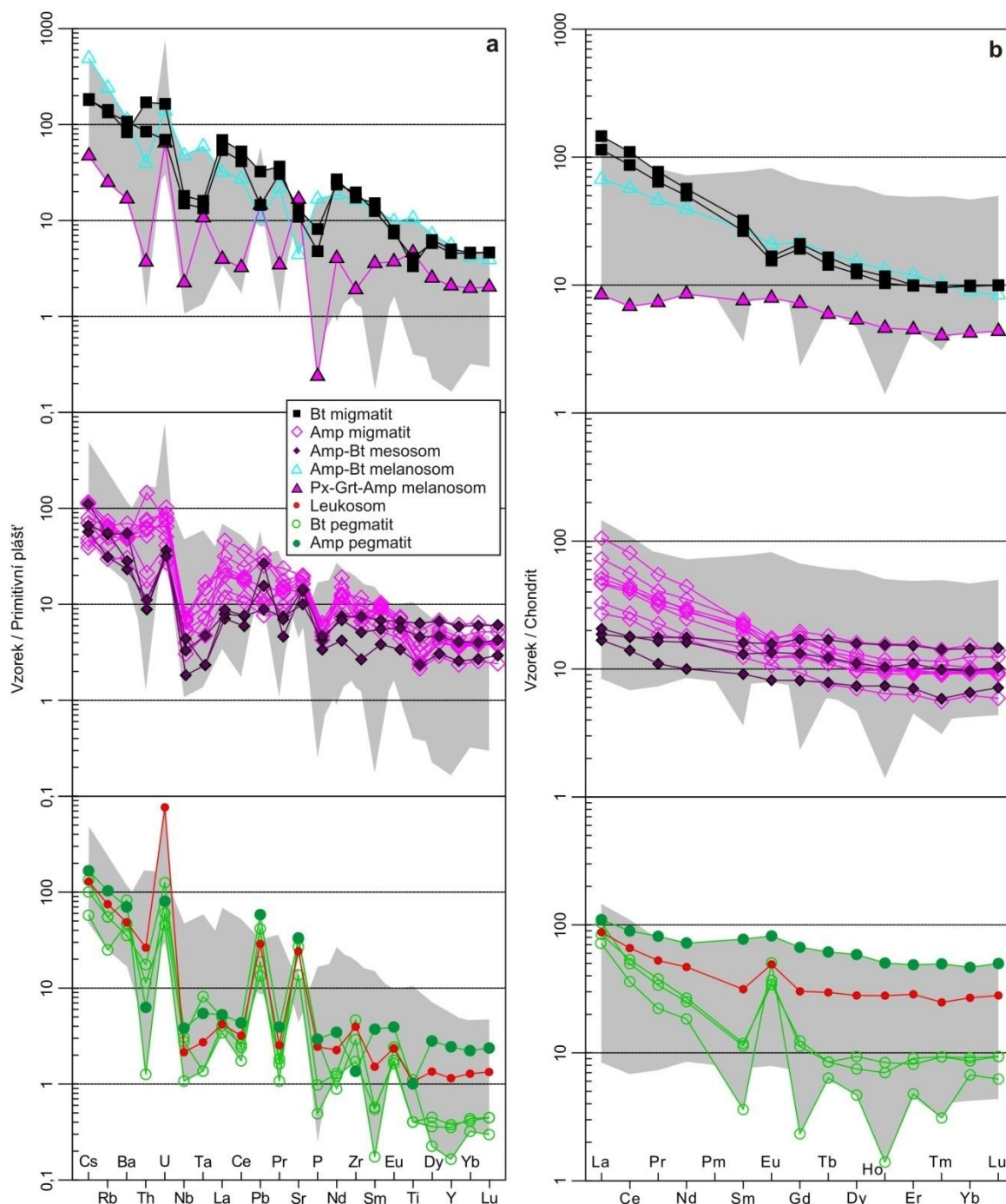
Variabilní jsou obsahy SiO_2 v leukosomu amfibolických migmatitů a v pegmatitech (56,86–74,42 hmot. %). Leukosom a pegmatity mají ve srovnání s metamorfovanými horninami nízké obsahy TiO_2 , MgO , FeO a P_2O_5 .



Obr. 26 Variační diagramy SiO_2 vs. vybrané hlavní a stopové prvky ve studovaných horninách

Stopové prvky

Křivky stopových prvků normalizované hodnotami pro primitivní plášť (McDonough a Sun 1995) pro všechny studované vzorky ukazují výrazné nabohacení LILE, LREE a HFSE (Obr. 27). Migmatity a mesosom jsou charakterizovány negativními anomáliemi v obsazích Nb, Ta, P a často také Ti. Pro melanosom jsou charakteristické zvýšené obsahy Ta společně s Ti a naopak negativní anomálie Th. Všechny normalizované křivky pegmatitů jsou charakterizovány pozitivními anomáliemi U, Pb, Sr a negativními anomáliemi v obsazích Th, Nb, Ta, La, P a LREE.

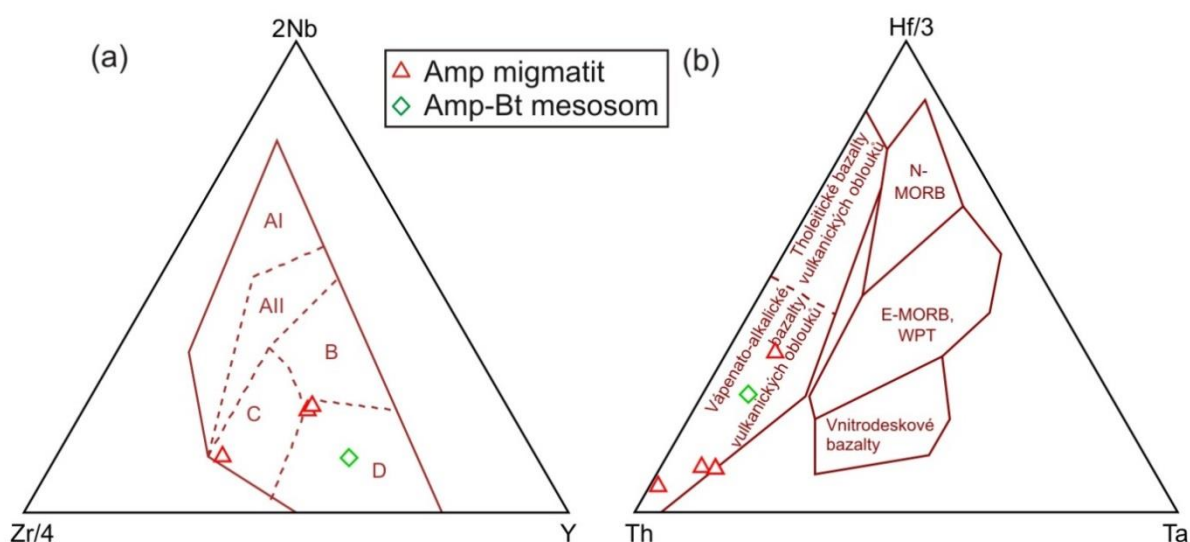


Obr. 27 Vybrané stopové prvky normalizované (a) obsahy prvků pro primitivní plášť (McDonough a Sun 1995), (b) obsahy REE normalizované chondritem (Boynton 1984), šedá plocha reprezentuje celkový rozsah chemického složení studovaného souboru

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

Křivky obsahů REE (Obr. 27) normalizované chodritem (Boynton 1984) jsou u vzorků biotitických migmatitů a biotit-amfibolického melanosomu charakterizovány nízkými obsahy HREE ($La_N/Yb_N = 14,7-8,5$) s mírně negativní Eu anomálií ($Eu/Eu^* = 0,65-0,86$). Amfibolické migmatity, mesosom a granát-pyroxen-amfibolický melanosom jsou charakterizovány variabilním nabohacením LREE/HREE ($La_N/Yb_N = 1,3-11,0$) a negativní nebo slabě pozitivní Eu anomálií ($Eu/Eu^* = 0,7-1,1$). Biotitické pegmatity vykazují variabilní nabohacení LREE/HREE ($La_N/Yb_N = 9,2-12,0$) a výraznou pozitivní Eu anomálii ($Eu/Eu^* = 2,8-17,5$). Amfibolické pegmatity a leukosom amfibolických migmatitů mají relativně plochou REE křivku ($La_N/Yb_N = 2,4-3,3$) a pozitivní Eu anomálii ($Eu/Eu^* = 1,1-1,6$).

Chemické složení migmatitizovaných amfibolitů může sloužit pro identifikaci geotektonického prostředí vzniku jejich protolitu. Poměr Zr/Y je vysoký (3–8), což je podle Pearce a Norryho (1979) typické pro vnitrodeskové bazalty. Poměrně vysoké obsahy Th (1,3–12,4 ppm) a nízké obsahy Hf (1,9–2,3 ppm), Zr (67,3–89,7 ppm) Y (11,7–22,3 ppm) jsou ale charakteristické spíše pro bazalty vulkanických oblouků (Obr. 28; Meschede 1986, Wood 1980). Relativně nízké poměry Nb/La (0,13–0,34) provázené vysokými poměry La/Yb (6–16) a Th/Nb (0,6–3,0) jsou typické pro bazalty vulkanických oblouků (Hollocher et al. 2012).



Obr. 28 Geotektonické klasifikační diagramy pro amfibolity: (a) diskriminační Th-Hf/3-Ta diagram (Meschede, 1986): AI, AII = vnitrodeskové alkalické bazalty; AII, C = vnitrodeskové tholeitické bazalty; B = P-typ MORB; D = N-typ MORB; C, D = bazalty vulkanických oblouků, (b) diskriminační Zr/4-2Nb-Y diagram (Wood 1980)

2.1.4 Mineralogická a geochemická analýza puklinových mineralizací

V horninách PVP Bukov se na střížných a zlomových zónách a puklinách vyskytuje množství hydrotermálních mineralizací, které mohou poskytnout údaje o charakteru fluidního toku během raně až pozdně tektonického a ložiskotvorného procesu v návaznosti na znalostech geologického vývoje v širším okolí testovací lokality, v uranovém rudním revíru Rožná - Olší (Arapov et al. 1984).

Při současném výzkumu byla pozornost věnována především kalcitové mineralizaci. Kalcit je minerál, který vzniká v širokém rozmezí podmínek a je proto vhodný pro

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

paleohydrogeologické studie. Obdobné studie probíhaly v rámci projektů SKB a POSIVA ve Švédsku (Tullborg et al. 2008) a ve Finsku (Gehör et al. 2002). Cílem výzkumu je určit mineralogické složení žil, PT podmínky vzniku minerálů a zdroje fluid a prvků.

Strukturně geologická pozice žilných a puklinových mineralizací

Hydrotermální žíly a puklinové minerály v prostoru PVP Bukov jsou vázány na struktury, které vznikly v režimu střížné křehké deformace hornin. Jde o zlomy, zlomové zóny, střížné fraktury a pukliny (viz kap. 2.1.1 a 2.1.5).

Zlomové struktury jsou reprezentovány převážně horizontálními posuny směru SSV–JJZ a SSZ–JJV. Zlomové zóny byly identifikovány rovněž ve směru SZ–JV, SV–JZ a S–J. Na zlomových plochách lze pozorovat striace, v mnoha případech i projevy několikanásobné střížné reaktivace křehkých struktur – více generací různě orientovaných striací na jedné zóně. Na zlomových strukturách byly rovněž dokumentovány kataklastické zóny intenzivního drcení hornin, které jsou často doprovázeny zvýšenou hydrotermální aktivitou a vznikem výrazných alteračních zón. Pukliny směru SZ–JV i SV–JZ jsou často vyplněné karbonáty, křemenem, sulfidy a dalšími minerály.

Procesy spojené se vznikem uranové mineralizace na ložisku Rožná se podařilo spolehlivě datovat a tyto výsledky je možné aplikovat i u PVP Bukov. K-Ar datování novotvořeného K-živce v albitizovaných horninách předrudního stádia vývoje uranové mineralizace poskytlo hodnoty $296,3 \pm 7,5$ a $281,0 \pm 7,0$ mil. let (Kříbek a Hájek 2005). Znamená to, že časové období mezi vznikem předrudní mineralizace a infiltrací oxidačních vod do hornin krystalinika, tj. počátku tvorby uranové mineralizace, trvalo přibližně 20 mil. let (Kříbek a Hájek eds 2005).

Anderson et al. (1983) uvádějí na základě U/Pb datování uraninitu stáří uranové mineralizace na 280–260 mil. let. Tomuto časovému intervalu odpovídá i K-Ar datování různých granulometrických frakcí předrudních a porudních illitů ($277,2 \pm 5,7$ až $264,1 \pm 5,5$ mil. let). Tyto údaje dovolují zařadit vznik uranové mineralizace do autunu až spodního saxonu.

K-Ar datování illitu z hydrotermálně alterovaných hornin v okolí pouranového křemen-karbonát-sulfidického zrudnění přineslo dva údaje, $233,7 \pm 4,7$ a $227,5 \pm 4,6$ mil. let (Kříbek a Hájek eds 2005).

Materiál k výzkumu

Vzorky žilných a puklinových mineralizací byly odebírány ze čtyř horizontálních vrtů S1 až S4, z chodeb BZ-XIIJ a BZ₁-XII a rozrážek ZK-3J a ZK-3S, vše z PVP Bukov. Vzorky byly rozděleny do několika skupin: karbonátové a křemen-karbonátové žíly, křemenné žíly, sulfidická mineralizace a produkty alteračních procesů. Celkem bylo analyzováno 113 vzorků, tabulka s popisem vzorků je přístupná v elektronické podobě (Elektronická příloha 5).

Vzorky z vrtů S1 až S4 nebyly orientovány. Z chodeb a rozrážek převažují vzorky ze struktur směru SZ–JV (22 vzorků), dále SV–JZ (10 vzorků) a V–Z (9 vzorků). Ze struktur směru S–J byly odebrány pouze 4 vzorky.

Karbonátové žíly, příp. karbonátové žíly s křemenem, jsou tvořeny převážně jemně až hrubě krystalovaným kalcitem, výjimečně karbonátem dolomit-ankeritického složení. Kalcit je bezbarvý, bílý až šedý, žlutý až hnědý nebo narůžovělý. U kontaktu žíly s horninou se místy objevuje jemně zrnitý křemen, přítomny jsou rovněž alterační minerály. Mocnost žil se pohybuje od 0,1 do cca 10 cm. Textura žil je různá, nejčastěji prožilková, méně hojná je textura krustifikační, fluidální, masivní nebo páskovaná.

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

Žíly jsou převážně subvertikální, na plochách kontaktu s horninou je často přítomen lem alteračních minerálů, u mnoha žil byla pozorována přítomnost striací, odtržení nebo drcení, buď přímo na kalcitu, nebo na ploše styku s okolní horninou. Podle přítomnosti kinematických indikátorů byly struktury s žilami označeny jako střížné nebo extenzní. V překopu BZ-XIIJ se nacházejí zlomové zóny, kde karbonáty tmelí brekcie tvořené horninovými úlomky a vyplňují puklinové prostory.

Z vrtů a chodeb byly vzorkovány i samostatné žíly s křemenem. Jedná se především o křemenné žíly o mocnosti 0,1 až 2,5 cm, doprovázené slídkami, většinou bez okolní alterace a striací. Jejich vztah k tektonickému režimu není jednoznačný. Dále byly odebrány vzorky sekrečního křemene se slídkami, o mocnosti 1 až 2 cm, s masivní texturou, vzorek pegmatitu, masivní agregát o mocnosti 4 cm, doprovázený biotitem a živci, a vzorek křemenem bohatého horninového leukosomu o mocnosti 4 cm. Křemenné žíly nebyly vzorkovány systematicky v celém prostoru PVP Bukov, představují nesourodou skupinu vzorků.

Ze sulfidických minerálů byl v žilách a puklinách identifikován pouze pyrit. Vyskytuje se ve čtyřech morfologických typech. V karbonátových žilách tvoří vtroušené drobně zrnité krystalované agregáty, v produktech alteračních procesů a v puklinách se vyskytuje novotvořený pyrit v krychlích o hraně do 1 mm, na stěnách puklin se dále nalézají jemnozrnné pyritové povlaky. V chodbě BZ₁-XII pak byl vzorkován drobně krystalovaný pyrit z výplně puklin.

Produkty alteračních procesů byly odebrány z kataklastických zón, v nichž byly zaoblené úlomky hornin do velikosti 3 cm i zcela rozrušené úlomky hornin tmelené jemnozrnnými minerály. Dále byly alterační minerály odebrány z ploch na kontaktu žil a okolních hornin, kde tvoří až 0,5 cm povlak. Na kontaktní ploše lze často pozorovat striace. Ze dvou zlomových zón chodby BZ-XIIJ byly odebrány vzorky na K-Ar datování krystalizace uplitu. Vzorek BUKOV-2 byl odebrán ze zlomu na metrůžce 201,5 m (orientace zlomové plochy 148/64), vzorek BUKOV-3 byl odebrán ze zlomu na metrůžce 208 m (orientace zlomové plochy 106/59). Z obou zlomových struktur bylo odebráno 10 kg heterogenní směsi úlomků hematizovaných a chloritizovaných hornin a alteračních minerálů a následně proběhla separace různých velikostních frakcí illitu.

Alterační minerály jsou jemnozrnné, až do frakce jílových minerálů, mají různou barvu – bílou až šedou, červenohnědou až hnědou a světle až tmavě zelenou.

Metodika laboratorních prací

Laboratorní práce byly, kromě K-Ar datování illitu, provedeny v laboratořích České geologické služby. Datování stáří illitu provedl dr. Z. Pécskay v institutu ATOMKI v Debrecínu v Maďarsku.

Elektronová mikroskopie – LAREM – metodika kvantitativních analýz hlavních prvků

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

ICP-MS – analýza stopových prvků a prvků vzácných zemin

Analýzy stopových prvků provedl v laboratořích ČGS dr. Tomáš Magna. Vzorky kalcitu byly naváženy do teflonových kelímků a byly přidány koncentrované HNO₃ a HF v poměru 1:6

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

(obj/obj). Uzavřené kelímky byly zahřívány na topné desce při 130 °C cca 72 hodin. Poté byly kyseliny odpařeny do sucha a opakovaně přidáno malé množství koncentrované HNO₃. Následně byla aplikována 6M HCl a uzavřené kelímky byly na 24 hodin odstaveny na topnou desku při 80 °C. Alikvotní část roztoku byla zředěna v 2 % HNO₃ (konc/konc) pro měření koncentrací stopových prvků pomocí ICP-MS Agilent 7900x. Spolehlivost a stabilita přístroje v průběhu analytické sekvence byly monitorovány pomocí mezinárodního referenčního basaltu BHVO-2.

Fluidní inkluze

Fluidní inkluze byly studovány v oboustranně leštěných destičkách o síle 0,3 mm metodami optické mikrotermometrie na aparatuře Chaixmeca (Poty et al. 1976). Aparatura byla kalibrována pro teploty mezi –100 až +400 °C chemickými standardy f. Merck, teplotou tání ledu a fázovými přechody v inkluzích s čistým CO₂. Homogenizační a kryometrická data vykazují reprodukovatelnost ±0,2 °C při teplotách pod 0 °C a ±3 °C při teplotách do 400 °C. Salinita vodných roztoků byla přepočtena podle Bodnara a Vityka (1994), složení solných systémů bylo určeno podle Davise et al. (1990). Hustota a složení inkluzí s CO₂ a CH₄ byly přepočteny podle Bakker a Diamonds (2000) a Van den Kerkhofa a Thieryho (2001).

Stabilní izotopy uhlíku a kyslíku v karbonátech

Vzorky žilných karbonátů byly jemně rozetřeny v achátové misce a rozloženy ve 100 % kyselině fosforečné ve vakuu při 25 °C (podle McCrea 1950). Složení izotopů $\delta^{13}\text{C}$ (‰) a $\delta^{18}\text{O}$ (‰) v uvolněném CO₂ bylo změřeno na hmotnostním spektrometru Delta V v laboratořích ČGS. Celková chyba stanovení izotopového složení je ±0,1 ‰. Izotopové složení uhlíku je vztaženo k mezinárodnímu standardu PDB. Hodnoty izotopového složení kyslíku vztažené ke standardu SMOW jsou určeny z měřených hodnot proti standardu PDB přepočtem. U dolomit-ankeritického karbonátu je hodnota $\delta^{18}\text{O}$ korigována o hodnotu –0,84 (Becker a Clayton 1976).

Izotopy Sr v karbonátech

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

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

Stabilní izotopy síry v sulfidech

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

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

Rtg difrakční analýza produktů alteračních procesů

Ze vzorků byly mechanicky vyseparovány minerály na puklinách. Z některých vzorků bylo vyseparováno více minerálů, které byly rozděleny na základě různé morfologie a barvy. Vyseparované fragmenty byly následně rozetřeny v achátové misce v suspenzi acetonu na požadovanou jemnost. Rtg difrakční záznamy byly pořízeny na práškovém difraktometru Philips X'Pert se sekundárním grafitovým monochromátorem za následujících podmínek: CuK α záření, nastavení generátoru 40 kV/40 mA, v úhlovém rozsahu 2-75° 2 Θ , s krokem 0,05 ° a načítacím časem 5 s/krok. Získané difrakční záznamy byly vyhodnoceny pomocí programu Diffrac.Eva (Bruker AXS 2015) a databáze PDF-2 (ICDD 2002). Přítomnost minerálu ze skupiny smektitu byla orientačně testována porovnáním rtg difrakčních záznamů vzorku po standardní přípravě a vzorku syceného v parách ethylenglykolu.

K-Ar datování illitu z poruchových zón

Stanovení draslíku: přibližně 0,05 g pulverizovaného vzorku bylo zpracováno v kyselinách (HF, HNO₃ a H₂SO₄) v teflonových kelímcích a nakonec rozpuštěno v 0,2 M HCl. Draslík byl analyzován pomocí plamenové fotometrie s Li vnitřním standardem na Industrial M420 type flame photometer. Přesnost analýzy byla kontrolována laboratorními standardy (Asia1/95, LP-6, HD-B1, GL-0), reprodukovatelnost měření je v rozsahu 2 %.

Stanovení argonu: přibližně 0,5 g vzorku bylo vloženo do hliníkové fólie a zahřáto na 150 až 180 °C ve vakuu po dobu 24 hodin. Argon byl extrahován v podmínkách vysokého vakua vysokofrekvenčním zahřátím a roztavením vzorků v Mo kelímcích. Plyn byl vyčištěn od chemicky aktivních kontaminací pomocí Ti sponge a SAES St 707 getters, pomocí kapalného dusíku byly odstraněny kondenzující plyny. Kolona byla připojena přímo k hmotnostnímu spektrometru (90° magnetický sektor, 155 mm poloměr). Izotopové složení argonu bylo měřeno metodou izotopového ředění ³⁸Ar. Stáří vzorku bylo vypočteno pomocí rozpadové konstanty navržené Steigerem a Jagerem (1977).

Výsledky laboratorních analýz

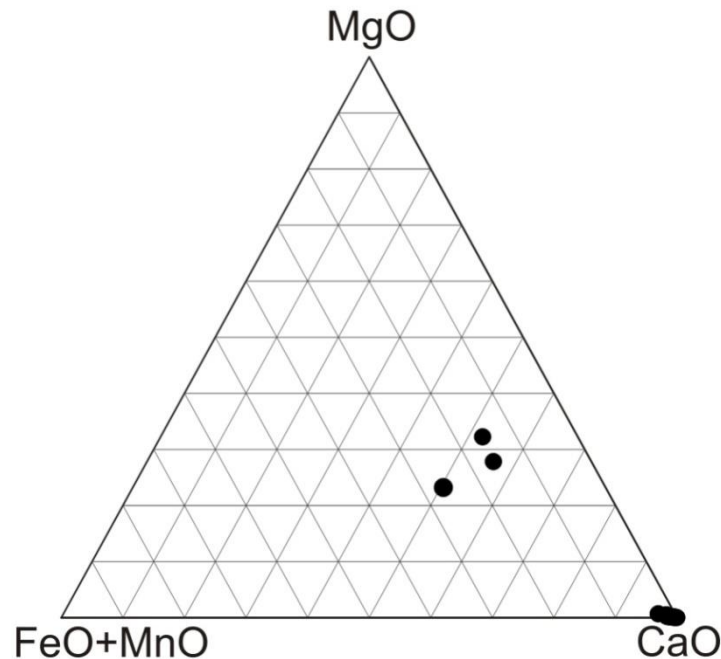
Ve zprávě jsou shrnuty a graficky prezentovány výsledky jednotlivých analytických metod. Tabulky s výsledky laboratorních analýz jsou přístupné v elektronických přílohách:

Kvantitativní analýzy hlavních prvků – LAREM

V sadě 28 vzorků karbonátových žil byly analyzovány obsahy hlavních kationtů, Ca, Mg, Fe a Mn, dále pak Sr a Ba. Z analýz vyplývá, že 25 vzorků je tvořeno kalcitem, jediný vzorek (S3-36,63 m) vykazuje výraznou oscilační zonalitu, která pravděpodobně ukazuje na rychlé střídání podmínek vzniku minerálu. Obsah CaO se pohybuje v rozmezí 53,71 až 56,37 %, obsah MgO v kalcitech je 0,0 až 0,47 %, obsah FeO 0,0 až 0,94 % a obsah MnO 0,0 až 0,72 % (Obr. 29).

Tři vzorky jsou tvořeny dolomit-ankeritickým karbonátem (S1-39,35 m, S2-6,55 m, BZ-XIIJ-317-2 m). Obsah CaO v dolomit-ankeritickém karbonátu se pohybuje v rozmezí 28,45 až 32,13 %, obsah MgO nabývá hodnot 13,09 až 17,74 %, obsah FeO 8,93 až 14,52 a obsah MnO 0,14 až 0,34 %.

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017



Obr. 29 Kvantitativní analýza hlavních prvků Ca-Mg-Fe-Mn v karbonátových žilách z PVP Bukov

Obsah Sr v karbonátech byl většinou pod mezí detekce, případně se pohyboval v setinách procenta. Výjimkou je vzorek BZ-XIIJ-124,0 m, který obsahuje 0,39 % SrO. Obsah Ba byl u všech vzorků pod mezí detekce.

Analýza stopových prvků a prvků vzácných zemin – ICP-MS

Pomocí ICP-MS byl stanoven obsah 25 stopových prvků (včetně K, P a Ti) a 14 prvků vzácných zemin.

Obsah Sr v analyzovaných vzorcích se pohybuje v rozmezí od 66 do 569 ppm, jen málo hodnot je pod 100 ppm., Svědčí to o hydrotermálním původu karbonátových žil (Tullborg et al. 2008). Obsahy Rb ve vzorcích jsou naopak nízké, 0,7–18,0 ppm, vzrůstají s rostoucím obsahem K (210–3315 ppm).

Obsah U je ve většině vzorků nižší než 1 ppm, jen tři vzorky mají obsah vyšší (2,3–8,0 ppm), rovněž obsah Th je ve většině vzorků pod 1 ppm, jen v jednom vzorku 4,8 ppm. Obsahy U i Th v žilách jsou celkově nižší než v okolních horninách (René 2002).

Obsahy prvků skupiny HFS jsou oproti okolním horninám rovněž nízké: 4,9–46,8 ppm Zr, 1,2–4,3 ppm Nb, 0,9–1,4 ppm Ta, 351–2190 ppm Ti, 4,1–76 (výjimečně až 446) ppm Y.

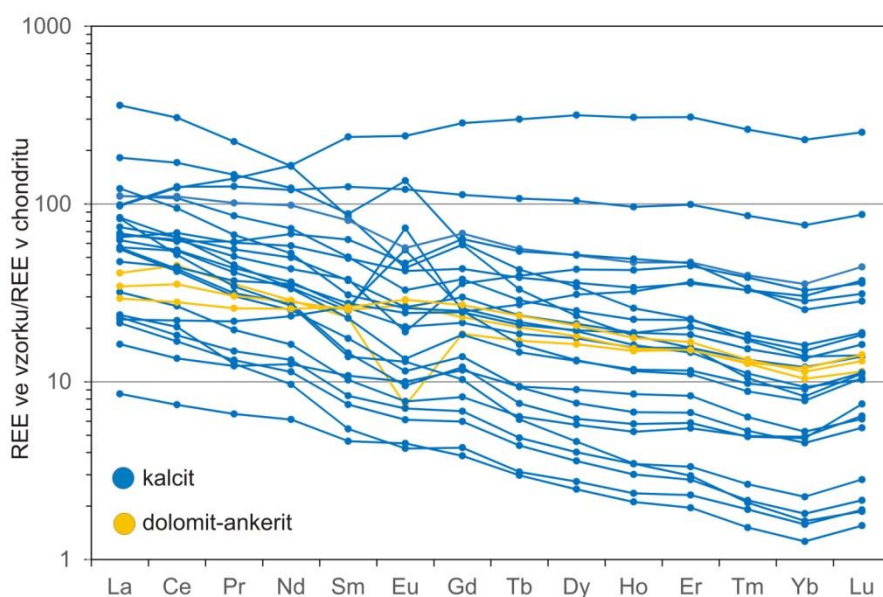
Křivky normalizovaných obsahů prvků vzácných zemin jednotlivých vzorků mají, kromě dvou vzorků, obdobný trend, vykazují mírný pokles od LREE k HREE., Výraznější negativní Eu anomálii lze pozorovat u vzorků S2-117,7m, S3-19,85m a S3-36,63m. Naopak pozitivní Eu anomálii je možné pozorovat u vzorků S1-14,10 m, S2-30,4 m a BZ-XIIJ-161,4 m (Obr. 30). Rozdílným hodnotám Eu anomálií odpovídá i poměr Eu/Eu^* 0,36–2,93. Negativní, resp. pozitivní Eu anomálie může být pravděpodobně indikátorem lokálních změn redox podmínek, na což ukazují i přítomnost pyritu, resp. kaolinitu v alteračních zónách.

Celkový obsah prvků vzácných zemin (ΣREE) se pohybuje od 13,0 do 206,7 ppm, je většinou nižší než suma REE v okolních horninách (René 2002). Ve vzorcích BZ-XIIJ-124m a BZ-XIIJ-219,4m byl oproti ostatním vzorkům zjištěn vyšší obsah především HREE ($\Sigma REE =$

278, resp. 491 ppm), vysokému obsahu REE odpovídá i vysoký obsah Y (150 a 446 ppm). U vzorku BZ-XIJ-219,4m je patrný i jiný průběh křivky. Tento vzorek je atypický i z hlediska fluidních inkluzí, kalcit obsahuje sekundární inkluze vodného roztoku a vyšších uhlovodíků, je možné, že tato žilka byla vystavena teplotnímu přetisku. U dvou vzorků (S3-19,85m a S1-14,10m) byl zjištěn výrazně vyšší obsah LREE oproti HREE, suma prvků vzácných zemin je rovněž anomálně vysoká (400,9, resp. 264 ppm).

Obsahy REE ve třech vzorcích dolomit-ankeritického karbonátu jsou si blízké, jen u vzorku S1-39,35m je patrná výrazná negativní Eu anomálie.

Celkově jsou obsahy REE ve vzorcích karbonátových žil velmi proměnlivé, o čemž svědčí i poměr La_N/Yb_N 1,30–50,19 nebo poměr La_N/Sm_N 0,41–5,98.

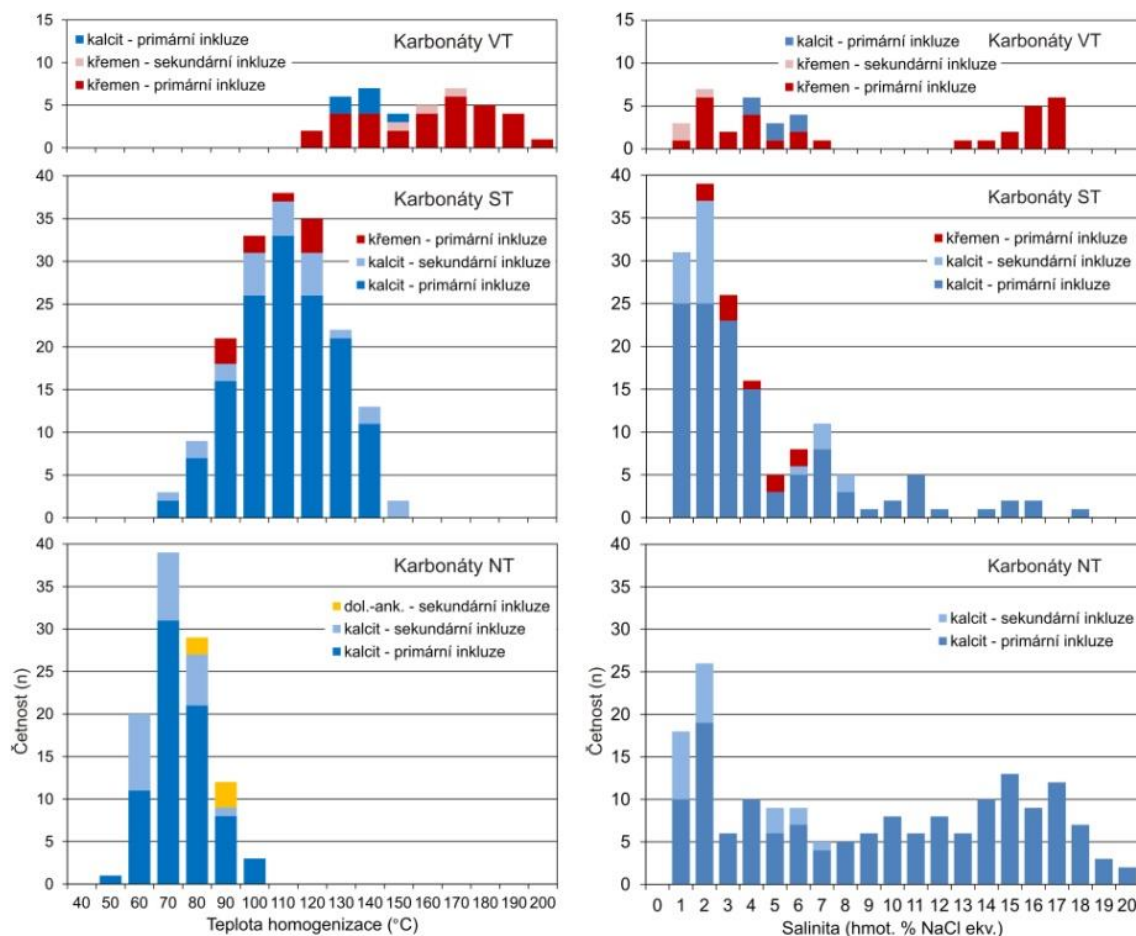


Obr. 30 Obsah prvků vzácných zemin v žilných karbonátech z PVP Bukov normalizovaný obsahem REE v chondritech (Anders a Grevesse 1989)

Fluidní inkluze

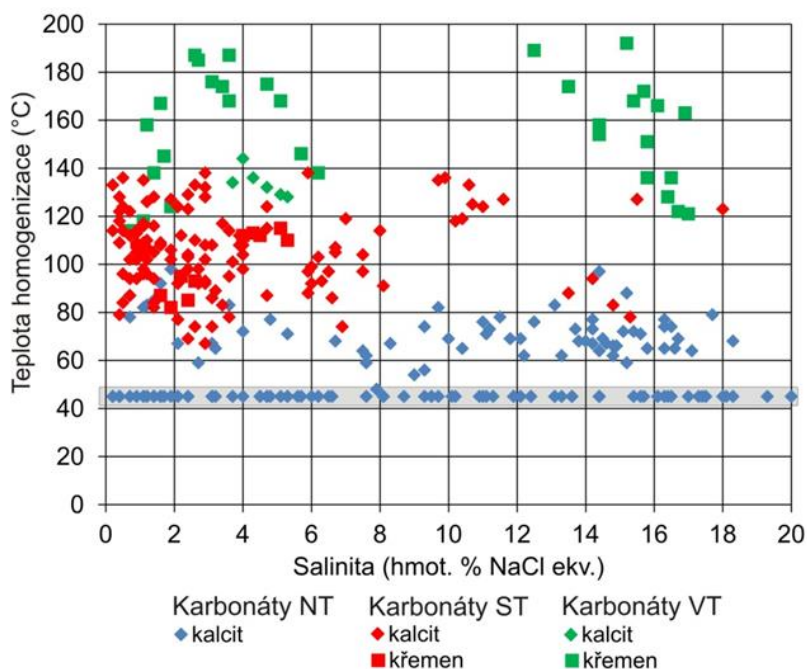
Fluidní inkluze byly studovány v křemen-karbonátových a křemenných výplních žil a puklin. Byl posuzován jejich vztah k hostitelskému minerálu (primární vs. sekundární inkluze), poměr kapalné a plynné fáze ($LVR=L/L+V$), tvar a velikost inkluzí.

V karbonátech se, až na výjimky, nacházejí inkluze vodného roztoku. Na základě poměru kapalné a plynné fáze a teplot homogenizace (T_h) byly vzorky žil rozděleny do tří skupin – nízkoteplotní, označené jako „karbonáty NT“, středně teplotní, označené jako „karbonáty ST“ a výše teplotní, označené jako „karbonáty VT“. Výsledky měření teplot homogenizace a salinity v inkluzích ilustruje Obr. 31.



Obr. 31 Histogramy teplot homogenizace a salinity fluidních inkluzí vodného roztoku z žilných karbonátů z PVP Bukov

V nízkoteplotních kalcitech a dolomit-ankeritickém karbonátu se vyskytují především jednofázové kapalně inkluzí, jen asi 5 % tvoří inkluzí dvoufázové s LVR 0,9–0,95. Hodnoty teplot homogenizace dvoufázových primárních inkluzí se pohybují v intervalu 48 až 98 °C, salinita vodného roztoku je velmi proměnlivá, od 0,2 do 20,0 hmot. % NaCl ekv. (Obr. 32). U inkluzí s vyšší salinitou byla měřena eutektická teplota v rozmezí –48 až –55 °C, což indukuje vysoký podíl CaCl_2 v roztoku. U inkluzí s nižší salinitou byla měřena eutektická teplota v intervalu –36,7 až –39 °C, lze říci, že na složení vodného roztoku se podílejí především chloridy Na, Mg a Fe. Teploty homogenizace sekundárních inkluzí v kalcitu se pohybují v rozmezí 51 až 84 °C, v dolomit-ankeritickém karbonátu 76 až 87 °C. Salinita sekundárních inkluzí v kalcitu je 0,2 až 6,2 hmot. % NaCl ekv.



Obr. 32 Teplota homogenizace vs. salinita fluidních inkluzí vodného roztoku v karbonátových žilách z PVP Bukov. V dolní části grafu jsou vyneseny hodnoty salinity v jednofázových kapalných inkluzích

V kalcitech ST a syngenetickém křemeni se nacházejí inkluze s nepravidelným LVR, Th byly měřeny ve skupinách inkluzí s LVR 0,9. Primární inkluze v kalcitech homogenizovaly při teplotách 67 až 138 °C, salinita vodného roztoku je proměnlivá, lze rozlišit tři intervaly, 0,2–4, 4,7–8,1 a 9,7–18,0 hmot. % NaCl ekv. Eutektická teplota byla měřena v rozmezí –35 až –39 °C, což ukazuje na přítomnost chloridů Na, Mg a Fe v roztoku. Sekundární inkluze v kalcitu mají Th v rozsahu 78–146 °C a salinitu 0,2 až 7,7 hmot. % NaCl ekv. Primární inkluze v křemeni pak mají Th v rozmezí 82 až 115 °C a salinitu 1,6 až 5,3 hmot. % NaCl ekv.

V kalcitech HT a syngenetickém křemeni byly pozorovány inkluze s relativně pravidelným LVR 0,9. Primární inkluze v kalcitech HT mají Th 128 až 144 °C a salinitu 3,7 až 5,3 hmot. % NaCl ekv. Hodnoty eutektické teploty –37 °C ukazují na přítomnost chloridů Na, Mg a Fe v roztoku. V kalcitu se dále vyskytují sekundární inkluze s nepravidelným LVR. Během kryometrie byly v těchto inkluzích při teplotách mezi –20 až –30 °C pozorovány fázové změny v plynné fázi. Pravděpodobně se jedná o přítomnost plynných vyšších uhlovodíků. Primární inkluze v křemeni mají Th 114 až 192 °C a dvojí salinitu 0,7 až 6,2 a 12,5 až 17,0 hmot. % NaCl ekv. Ve vzorku BZ-XIIJ-178,50 m byly v křemeni pozorovány rovněž primární inkluze CH₄. Inkluze CH₄ homogenizovaly jak na kapalinu (ThCH₄^L = –133,6 až –142,8 °C, DCH₄ = 0,380 až 0,396 g/cm³), tak na plyn (ThCH₄^V = –128,6 až –138,6 °C, DCH₄ = 0,008 až 0,013 g/cm³). Sekundární inkluze v křemeni mají Th 144 až 167 °C a velmi nízkou salinitu do 1,1 hmot. % NaCl ekv.

V křemenných žilách rovnoběžných s foliací (S4-47,25 m a S4-37,16 m) se nacházejí primární a pseudosekundární inkluze vodného roztoku s Th 142 až 216 °C a salinitou 6,9 až 9,5 a 17,0 až 23 hmot. % NaCl ekv. Je pravděpodobné, že zde docházelo k míšení dvou typů vodných roztoků. Na složení roztoků se podílí především CaCl₂ (Te = –55,5 °C).

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

V křemenné žilce ze vzorku S2-18,30 m byly nalezeny primární inkluze $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ s nepravidelným LVR. Hodnota T_{mCO_2} $-60,9\text{ }^\circ\text{C}$ naznačuje, že plynná fáze je zhruba z $\frac{1}{4}$ tvořena metanem. Hustota plynné fáze se pohybuje mezi $0,830$ až $0,882\text{ g/cm}^3$ ($T_{\text{hCO}_2^{\text{L}}} = 7,2\text{--}13,7\text{ }^\circ\text{C}$).

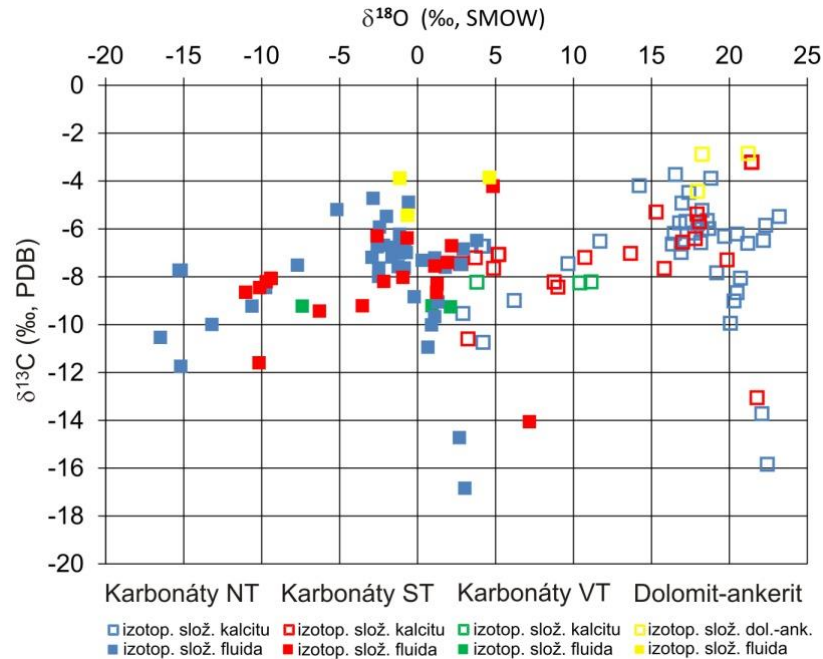
V několika dalších vzorcích křemenných žil nebo sekrečního křemene (u vzorků z vrtů to není zcela zřejmé) byly pozorovány stopy sekundárních inkluzí $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ s nepravidelným LVR. Hodnoty T_{mCO_2} mezi $-57,2$ až $-58,3\text{ }^\circ\text{C}$ indikují malou příměs CH_4 v plynné fázi. Inkluze homogenizovaly na kapalinu ($T_{\text{hCO}_2^{\text{L}}} = 8,6\text{--}30,1\text{ }^\circ\text{C}$) nebo na plyn ($T_{\text{mCO}_2^{\text{V}}} = 24,2\text{--}25,6\text{ }^\circ\text{C}$). Hustota plynné fáze činí $0,580\text{--}0,874$, resp. $0,233\text{--}0,250\text{ g/cm}^3$. Salinita vodného roztoku je $4,1$ hmot. % NaCl ekv. Inkluze před dosažením Th dekrepitovaly.

Stabilní izotopy uhlíku a kyslíku v karbonátech

Izotopové složení uhlíku a kyslíku v kalcitech a dolomit-ankeritických karbonátech je velmi proměnlivé a ukazuje na variabilní podmínky vzniku žil (Obr. 33). Hodnoty $\delta^{13}\text{C}$ minerálů se pohybují v rozmezí od $-10,8$ (výjimečně až $-15,8$) do $-2,9\text{ }‰$ (PDB). Většina hodnot $\delta^{13}\text{C}$ pak spadá do intervalu -8 až $-2\text{ }‰$, což pravděpodobně odpovídá uhlíku z hlubinného zdroje. Nižší záporné hodnoty $\delta^{13}\text{C}$ zřejmě odpovídají uhlíku organického původu, případně směsi uhlíků z více zdrojů.

Hodnoty $\delta^{18}\text{O}$ se pohybují v rozmezí $+2,8$ až $+23,20\text{ }‰$ (SMOW). Na základě dat izotopového složení kyslíku karbonátů a teplot homogenizace fluidních inkluzí bylo vypočteno izotopové složení kyslíku roztoků (Kim a O'Neil 1997). Kalcity výše a středně teplotních žil mají hodnoty $\delta^{18}\text{O}$ fluida od -11 do $+7,2\text{ }‰$. Hodnoty 0 až $+7\text{ }‰$ pravděpodobně odpovídají solankám sedimentárních bazénů, hodnoty 0 až $-11\text{ }‰$ zřejmě odpovídají zvyšujícímu se podílu meteorických vod. Hodnoty $\delta^{18}\text{O}$ fluida níže teplotních kalcitových žil se pohybují od $-16,5$ do $+3,8\text{ }‰$, zdrojovými vodami těchto žil byly pravděpodobně převážně cirkulující vody meteorického původu. Hodnoty $\delta^{18}\text{O}$ fluida kolem $-15\text{ }‰$ nejsou věrohodné, tyto hodnoty by odpovídaly studeným vodám glaciálního období, klima v permu až triasu ale bylo v této oblasti mnohem teplejší. Chyba je zřejmě ve špatném odhadu teplot krystalizace žilných minerálů.

Kalcit i dolomit-ankeritický karbonát z žíly z chodby BZ-XIIJ z metráže 317 mají hodnoty $\delta^{13}\text{C}$ fluida $-4\text{ }‰$ (PDB) a $\delta^{18}\text{O}$ fluida $+5\text{ }‰$ (SMOW), což jsou hodnoty, které jsou typické pro rudní karbonáty z ložiska Rožná (Kříbek et al 2009).

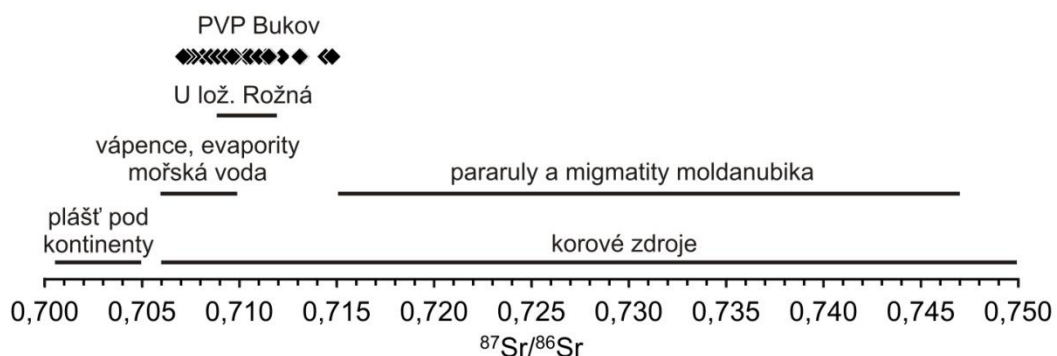


Obr. 33 Izotopové složení uhlíku a kyslíku v karbonátových žilách z prostor PVP Bukov

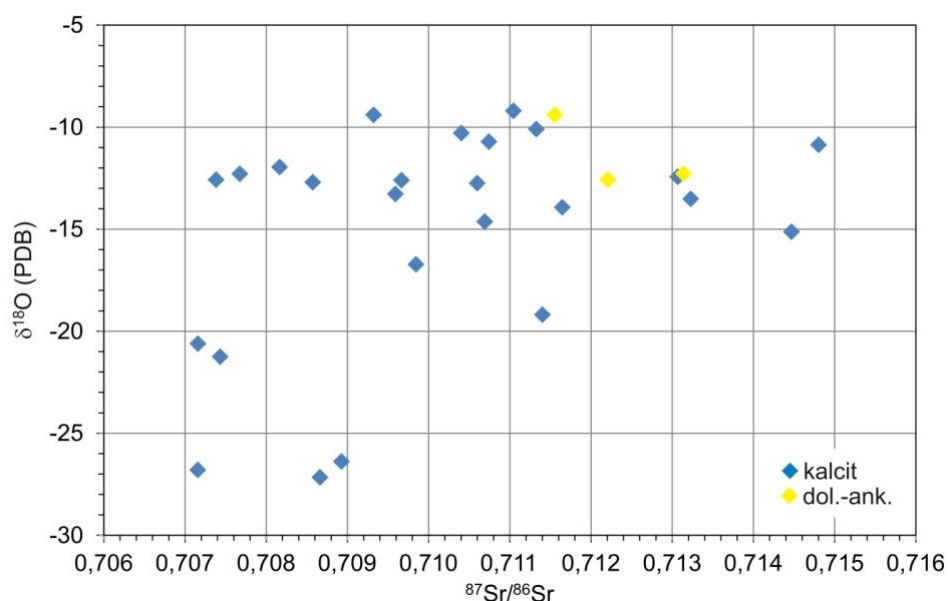
Izotopy Sr v karbonátech

V sadě 28 vzorků karbonátových žil bylo analyzováno izotopové složení stroncia. Poměr $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ se pohybuje v rozpětí 0,707158 až 0,714803 (Obr. 34). Z ložiska Rožná bylo analyzováno šest vzorků kalcitů předuranové, rudní i pouranové generace. Poměr $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ je v poměrně úzkém rozmezí 0,709414 až 0,711561. Je vidět, že data z Rožné i PVP Bukov leží mimo pole pararul a migmatitů moldanubika (Janoušek et al. 1995) a částečně mimo pole dat z vápenců, příp. evaporitů. Je pravděpodobné, že v případě izotopického složení Sr v kalcitech z Bukova se jedná o směsný zdroj z různých horninových typů vyluhovaný solankami hlubokého oběhu. Na Obr. 35, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs. $\delta^{18}\text{O}$ v karbonátech, je patrná skupina vzorků s nízkými hodnotami $\delta^{18}\text{O}$ i poměru $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, zdrojovými roztoky zde pravděpodobně byly meteorické vody.

Obsah Sr v karbonátových žilách se pohybuje od 66 do 569 ppm, což svědčí pro hydrotermální původ karbonátů. Mezi obsahem Sr v karbonátech a izotopickým složením Sr nebyla zjištěna korelace.



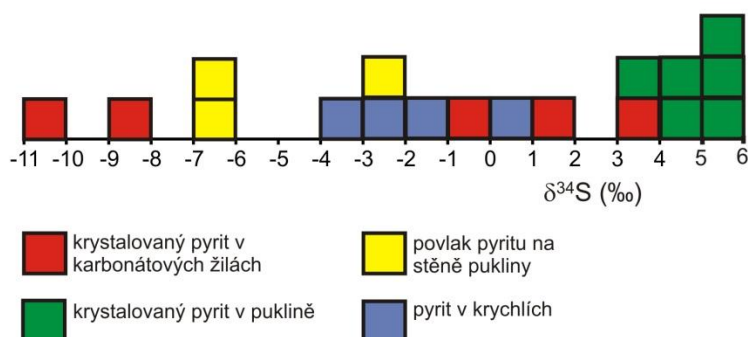
Obr. 34 Izotopové složení Sr v karbonátech z PVP Bukov a z možných zdrojových hornin a fluid



Obr. 35 Izotopové složení Sr vs. izotopové složení O v žilných karbonátech z PVP Bukov

Stabilní izotopy síry v sulfidech

Izotopové složení síry bylo analyzováno ve čtyřech morfologických typech pyritu (Obr. 36). Vtroušený pyrit v karbonátových žilách vykazuje hodnoty $\delta^{34}\text{S}$ v rozmezí od $-10,4$ do $+3,1$ ‰ (CDT), pyrit v krychlích, který se nachází především na alterovaných zónách, má hodnoty $\delta^{34}\text{S}$ $-3,1$ až $+0,7$ ‰. Izotopové složení síry jemnozrnných pyritových povlaků puklin se pohybuje v rozmezí $\delta^{34}\text{S}$ $-6,5$ až $-2,2$ ‰, drobozrnný krystalovaný pyrit na puklinách pak má hodnoty $\delta^{34}\text{S}$ v úzkém rozmezí od $+3,9$ do $+5,9$ ‰. Nejširší rozmezí hodnot $\delta^{34}\text{S}$ bylo zaznamenáno u pyritů v karbonátových žilách, které se v prostoru PVP Bukov vyskytují ve více generacích. Všechny naměřené hodnoty velmi dobře odpovídají hodnotám $\delta^{34}\text{S}$ sulfidů z pouranové křemen-karbonát-sulfidické mineralizace z ložiska Rožná (Kříbek et al. 2009).



Obr. 36 Izotopové složení síry pyritů z žil a puklin z PVP Bukov

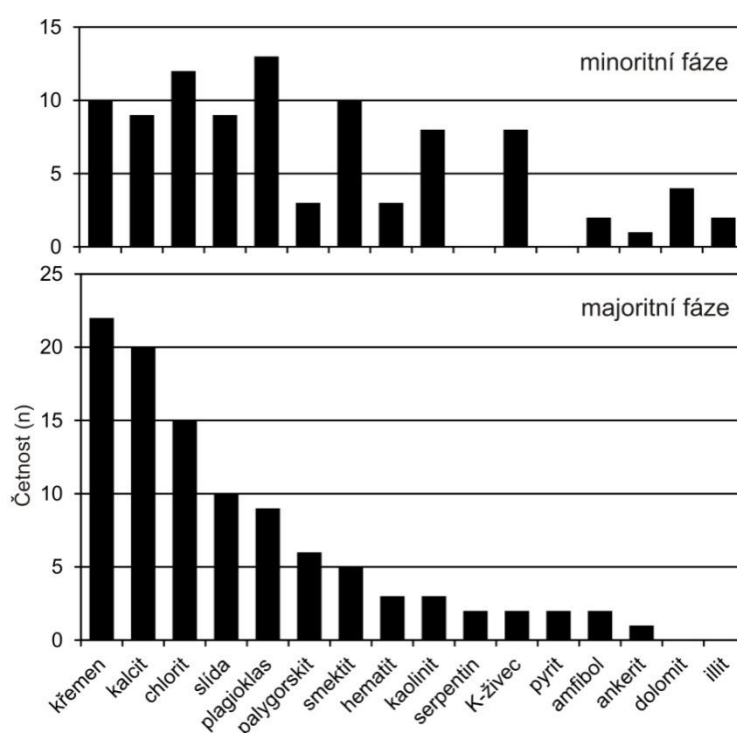
Během rudního uranonosného stádia došlo v revíru Rožná - Olší k migraci oxidačních fluid a rozkladu minerálů s dvojmocným Fe, včetně pyritu. Pyrit ve výplni žil a puklin na PVP Bukov

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

je tedy pravděpodobně mladší než uranová mineralizace a svědčí o redukčním prostředí pouranového stádia.

Rtg difrakční analýza produktů alteračních procesů

Vzorky na rtg difrakční analýzu byly odebírány především z poruchových zón, často silně kataklazovaných (viz Elektronická příloha 8). Zaoblené úlomky hornin, příp. zcela rozrušené úlomky hornin, jsou tmeleny velmi jemnozrnnou směsí minerálů. Dále byly vzorky odebírány z kontaktních ploch žil a horniny, kde alterační minerály tvoří tenký povlak až 0,5 cm mocný. Celkem bylo provedeno 45 analýz. Četnost výskytu jednotlivých alteračních minerálů ilustruje Obr. 37.



Obr. 37 Diagram četnosti výskytu minerálů v produktech alteračních procesů z alteračních zón z PVP Bukov

Jako majoritní minerály se nejčastěji vyskytují křemen a kalcit, zčásti pravděpodobně novotvořené minerály, zčásti fragmenty drcených hornin a remobilizovaných žil. Dále je hojně přítomen chlorit, slída, palygorskit, minerály skupiny smektitu, hematit, kaolinit, a pyrit. To jsou minerály typické pro jednotlivé typy rudních až porudních alterací přítomných na lokalitě – chloritizace biotitu, hematitizace Fe minerálů (rozklad minerálů dvojmocného Fe za vzniku hydroxidů Fe a illitu), argilitizace (illitizace a kaolinitizace), pyritizace, prokřemenění hornin a karbonatizace (Kříbek a Hájek eds 2005). Mezi majoritní minerály patří i plagioklas, K-živec, serpentin a amfibol. Všechny vyjmenované minerály se vyskytují i v minoritní a podružné fázi. V několika vzorcích byly nalezeny dolomit a ankerit, pravděpodobně fragmenty karbonátových žil dolomit-ankeritického chemismu.

Kaolinit v zónách alterovaných po uranovém stádiu dokládá alespoň lokálně mírně kyselý charakter hydrotermálních roztoků.

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

K-Ar datování illitu z poruchových zón

V prostoru PVP Bukov bylo identifikováno několik poruchových zón, více metrů širokých, které jsou vyplněny heterogenní směsí kataklazované rozrušené horniny a alteračních minerálů. Ze dvou zlomových zón chodby BZ-XIIJ byly odebrány vzorky na K-Ar datování krystalizace uplitu. Vzorek BUKOV-2 byl odebrán ze zlomu na metrži 201,5 m (orientace zlomové plochy 148/64), vzorek BUKOV-3 byl odebrán ze zlomu na metrži 208 m (orientace zlomové plochy 106/59). Po separaci jemnozrnné frakce bylo metodou rtg difrakční analýzy zjištěno složení vzorků. Vzorek z metrže 190 m z poruchové zóny s.-j. směru obsahoval chlorit, smektit a hematit, ale žádný illit, a nebyl dále analyzován. Vzorky ze zlomu na metrži 201,5 m (vzorek BUKOV-2) a zlomu z metrže 208 m (vzorek BUKOV-3) obsahovaly smektit, chlorit a v minoritním množství též illit. Tři velikostní frakce illitu byly datovány pomocí metody K-Ar. Stáří illitu ze vzorku BUKOV-2 bylo stanoveno na 287 až 307 Ma, stáří illitu ze vzorku BUKOV-3 bylo stanoveno v rozmezí 250 až 256 Ma (Tab. 2). Tyto údaje spadají na počátek, resp. na konec vývoje rudního stádia uranové mineralizace na ložisku Rožná, které bylo datováno na 280 až 260 Ma (Kříbek a Hájek eds. 2005).

Tab. 2 Výsledky datování illitu z poruchových zón PVP Bukov metodou K-Ar

Lokalizace	Metráž (m)	Orientace struktury	Analyzovaný minerál	Hmotnost vzorku (g)	Separované frakce (μm)	Stáří (Ma)
BZ-XIIJ	201,5	148/64	illit	41,482	< 5	287
BZ-XIIJ	201,5	148/64	illit	5,317	< 3	307
BZ-XIIJ	201,5	148/64	illit	4,064	< 1	288
BZ-XIIJ	208	106/59	illit	32,671	< 5	252
BZ-XIIJ	208	106/59	illit	4,753	< 3	256
BZ-XIIJ	208	106/59	illit	2,647	< 1	250

Interpretace výsledků a závěr

V rámci současného geologického výzkumu na PVP Bukov byly studovány geochemické parametry karbonátových a křemen-karbonátových žil se sulfidickou mineralizací ve vzorcích z vrtů S1 až S4, ze štol BZ-XIIJ a BZ₁-XII a rozrážek ZK-2J, ZK-3J a ZK-3S. Cílem práce bylo určit mineralogické složení studovaných žil, PT podmínky vzniku minerálů a zdroje fluid a prvků.

Hydrotermální žíly v prostoru PVP Bukov se vyskytují na zlomových zónách, střížných frakturách i puklinách, a to především ve směru SZ–JV a SV–JZ a S–J. Žíly jsou tvořeny především kalcitem, obsahy MgO, FeO a MnO v kalcitech jsou nižší než 1 %, ve třech případech jsou žíly tvořeny dolomit-ankeritickým karbonátem. Karbonáty jsou místy doprovázeny křemenem a pyritem, u většiny žil lze na ploše kontaktu s horninou nalézt produkty alteračních procesů (chloritizace, hematizace, argilitizace, pyritizace, prokřemenění a karbonatizace), jejichž tvorba byla spojena s tektonickými pohyby a mohutnou hydrotermální aktivitou. Přítomnost kalcitu v mnoha vzorcích z alterovaných zón pravděpodobně svědčí o rozpouštění starších generací karbonátů a rekrystalizaci kalcitových žil.

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

Na základě teplot homogenizace fluidních inkluzí byly rozlišeny tři generace hydrotermálních žil. Nejstarší jsou pravděpodobně málo hojné křemen-karbonátové žíly s T_h 120 až 190 °C, hojnější jsou karbonátové žíly s teplotami homogenizace 70 až 140 °C, převážně s nižší salinitou, a karbonátové žíly s teplotami homogenizace 50 až 100 °C a velmi variabilní salinitou od 0 do 20,0 hmot. % NaCl ekv. Žíly svými T-X parametry odpovídají porudním až pouranovým žilám z ložiska Rožná. Toto srovnání vychází z porovnání teplot homogenizace fluidních inkluzí, jiné termometry, např. izotopový pár sfalerit-galenit nebo chloritové termometry indikovaly teplotní rozmezí pouranové mineralizace na 100 až 200 °C.

Karbonáty studovaných žil se vyznačují velkou variabilitou izotopového složení uhlíku i kyslíku. Obdobně je tomu u pouranových karbonátových a křemen-karbonát-sulfidických žil z ložiska Rožná. Podle Žáka, v práci Kříbek a Hájek eds (2005), se na jejich vzniku podílely různé lokální zdroje, včetně mobilizace karbonátů z krystalických vápenců a Ca–Si hornin v případě vzorků s vysokými hodnotami $\delta^{13}C$. Z hodnot $\delta^{18}O$ roztoku je zřejmé, že karbonátové žíly blízké vzniku uranové mineralizace vznikaly z pánevních solanek, zatímco pozdní pouranové žíly vznikaly z cirkulujících vod meteorického původu.

Data izotopového složení Sr z ložiska Rožná (0,709414 až 0,711561) i z PVP Bukov (0,707158 až 0,714803) leží mimo pole pararul a migmatitů moldanubika (Janoušek et al. 1995) a částečně mimo pole dat z vápenců, příp. evaporitů. Je pravděpodobné, že v případě izotopického složení Sr v kalcitech z Bukova se jedná o směsný zdroj z různých horninových typů vyluhovaný solankami hlubokého oběhu. Blyth et al. (2009) uvádí, že hluboké salinní vody z prostředí štítů mají poměr $^{87}Sr/^{86}Sr$ odvozený z reakce fluid s plagioklasem.

Izotopické složení síry pyritů ze studovaných vzorků se pohybuje především v nízkých až negativních hodnotách (–10,4 do +3,1 ‰ (CDT)) a je obdobné izotopickému složení pyritů pouranového stádia z ložiska Rožná. Žák (Kříbek a Hájek eds 2005) uvádí, že nízké až negativní hodnoty izotopického složení síry jsou pravděpodobně důsledkem frakcionace mezi redukovanými a oxidovanými složkami síry v roztocích. Vzhledem k nízkým teplotám mineralizace nelze vyloučit ani vliv sulfát-redukujících bakterií v hydrotermálním systému, nebo redukci sulfátů organickými látkami.

Geologické prostředí PVP Bukov prodělalo stejný geodynamický vývoj jako geologické prostředí v rudním revíru Rožná-Olší. Lze se tedy pokusit interpretovat data získaná z PVP Bukov v návaznosti na ložiskově geologické a geochronologické data geodynamický model publikovaný v práci Kříbka a Hájka (2005):

300–280 Ma – předrudní stádium – etapa rychlé exhumace moldanubické kůry, otevření hlubokých struktur, založení stephanských a spodnopermských pánví (blanická brázda, boskovická brázda, jihlavská brázda).

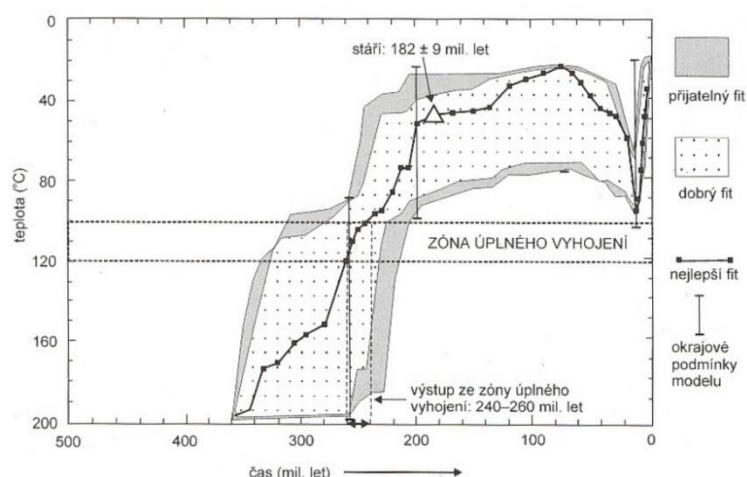
280–260 Ma – rudní stádium U mineralizace – pohyby bloků, propagace zlomových struktur (výskyt několika generací zrudnělých brekcií), mobilizace hydrotermálních fluid, multipumping – usměrnění toku rudonosných fluid tektonickým pumpováním do zón s vyšší propustností ve směru teplotního a tlakového gradientu.

V prostoru PVP Bukov vznik širokých poruchových zón (v metráži 190 až 210 m) za přítomnosti masivní hydrotermální aktivity, teplota pravděpodobně 150 až 200 °C.

260–240 Ma – porudní stádium? – výstup horninových bloků do úrovně pod teplotu 120 °C. Ve vzorku apatitů z biotické ruly z ložiska Rožná bylo provedeno datování štěpných stop v apatitech. Střední délka štěpných stop vzhledem k původní délce štěpných ploch (16,3 μm) zkrácena na $11,1 \pm 1,6 \mu m$ (Kříbek a Hájek 2005). Podle J. Filipa průměrné „apatitové stáří“,

zjištěné na základě studia hustoty a zkrácení délek uzavřených štěpných ploch, odpovídá spodní juře (182 ± 9 mil. let). Výsledky modelování časově-teplotního vývoje ukazují, že apatit v biotitické rure byl exhumován ze zóny úplného vyhojení, tj. pod 120°C , v časovém intervalu 260–240 mil. let (svrchní perm až střední trias, Obr. 38).

V prostoru PVP Bukov vznik žilných hydrotermálních mineralizací při teplotě pod 140°C . Zdrojovými vodami byly především pánevní solanky.



Obr. 38 Model pozdního časově-teplotního vývoje biotitické pararuly na uranovém ložisku Rožná podle analýzy štěpných stop v apatitech (převzato z Kříbka a Hájka 2005)

235–225 Ma – pouranové stádium – povariská transkurentní tektonika, variabilní teplotní a tlakové podmínky, malý rozsah mineralizačních procesů, rychlé ochlazování fluid.

V prostoru PVP Bukov vznik pozdní generace hydrotermálních minerálů při teplotě nižší než 100°C . Značně variabilní salinita vodných roztoků ukazuje na remobilizaci starší mineralizace, v podstatné míře se při tvorbě žil uplatňují meteorické vody.

200 Ma – strmý průběh modelové časově-teplotní křivky naznačuje, že i při nižších teplotách pokračovala poměrně rychlá exhumace moldanubických hornin až do teplotní hladiny 50°C před cca 200 mil. let (spodní jura).

V této etapě pravděpodobně došlo k pozdním projevům horizontální tektoniky v prostoru PVP Bukov a vyplňování struktur nejmladšími karbonáty. Zdrojovými vodami byly vody meteorické.

V období cca 200 až 100 mil. let (střední jura až spodní křída) pak pokračoval pomalejší výzdvih horninových bloků a postupné ochlazování hornin.

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

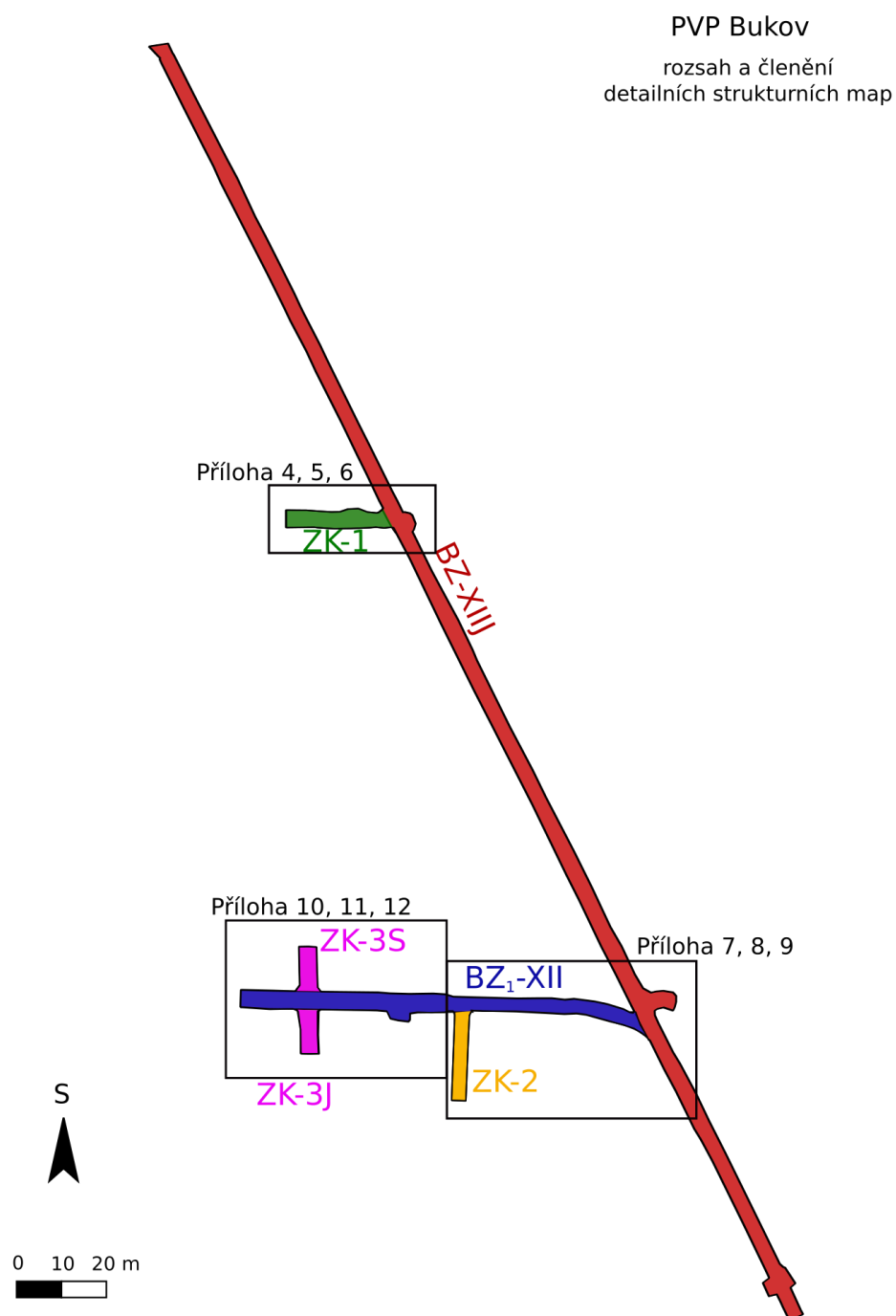
2.1.5 Strukturní charakteristika horninového prostředí

V rámci dokumentace prostředí PVP Bukov a vrtů byla veškerá data sjednocena do databáze, která je ve formě tabulky *.xls Elektronická příloha 13 této zprávy. Tato příloha shrnuje data získaná při primární dokumentaci a jejich přehled je uveden na prvním listu dokumentu. Dokumentace byla prováděna jednotnou metodikou, pokud to bylo jen trochu možné, vzhledem k aktuálním podmínkám v podzemí (Obr. 39). Měření jednotlivých struktur probíhala obvykle zhruba v úrovni jednoho metru od počvy, v kroku zhruba 2–3 měření foliací na metr a měření reprezentativních puklin s udáním četnosti jejich výskytu, pokud se jednalo o sety opakujících se puklin. Během strukturní analýzy PVP bylo dokumentováno 14 čeleb. Pokud to bylo možné pozorovat prostým okem, byly dokumentovány také typy výplní a jejich mocnost. Vzhledem k podmínkám v podzemí a nemožnosti podrobných analýz u každé z puklin (obtížné rozpoznání minerálů), mohou být některá data týkající se minerálních výplní puklin lehce nadhodnocena (např. výskyt chloritu a epidotu).



Obr. 39 Strukturně geologická dokumentace v PVP – BZ₁-XII v roce 2016

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017



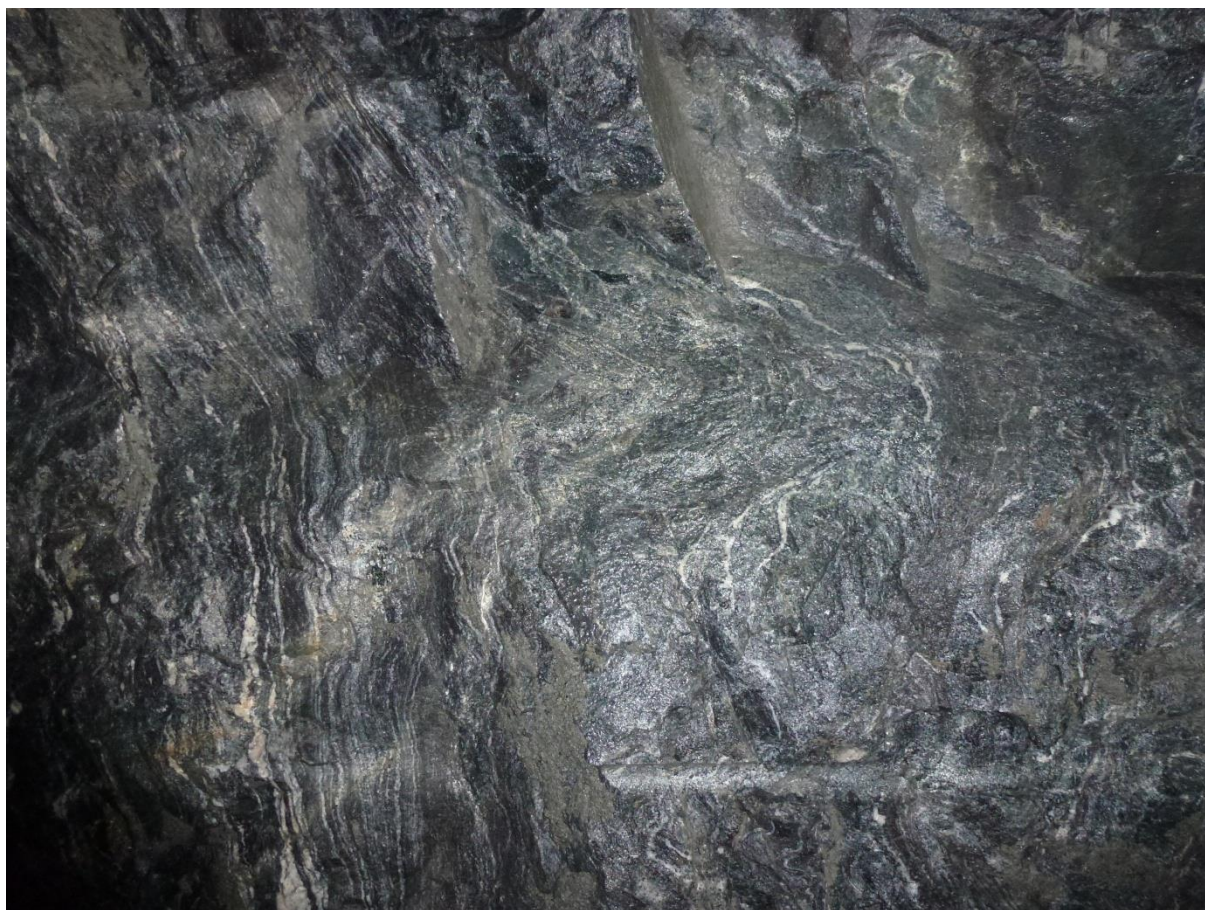
Obr. 40 Rozsah a členění detailních strukturních map PVP Bukov (viz Příloha 4 - Příloha 12)

Struktury duktilní deformace

V prostorách PVP Bukov (Obr. 1) byly v horninovém komplexu migmatizovaných biotit-amfibolických rul, biotitických migmatitů a amfibolitů pozorovány vztahy regionálních metamorfních staveb. Relativně starší pozorovanou stavbou jsou metamorfní foliace, které mají nejčastěji charakter nepravidelného střídání křemen-živcových pásků (leukosomu) a restitických poloh bohatých biotitem a amfibolem. Místy byla pozorována separace

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

leukosomu do formy nepravidelných žilek. Primární orientace relativně starších foliací je strmá v průběhu SSZ(SZ)–JJV(JV) až SSV–JJZ. V celém PVP Bukov je patrná jejich částečná či úplná transpozice (převrácení) do relativně mladších foliačních ploch mírného až středního úklonu k JZ, J až JV (Obr. 42, Obr. 43). Superpozice metamorfních staveb se dále projevuje přítomností asymetrických vrás s amplitudami v rozsahu od 0,1 m do prvních desítek metrů (Obr. 44, Obr. 45, Obr. 41, Obr. 46). V případě vysokého stupně převrácení lze v doménách homogenně vyvinuté mladší foliace pozorovat reliktu izoklinálních vrás. Jejich vrásové osy upadají pod mírnými až středními úhly k JZ až JV. Obě metamorfní foliace nesou mezoskopicky patrné lineace protažení nebo minerální lineace s převažujícím mírným sklonem k jihu. Celkový přehled distribuce struktur duktilní deformace (foliací, lineací a vrásových os) a jejich orientaci v rámci PVP Bukov uvádí schematická strukturní mapa (Obr. 47). Podrobné mapy orientace a distribuce staveb duktilní povahy ve zkušební rozrážce ZK-1, přístupové chodbě BZ₁-XII a experimentálních rozrážkách ZK-2 a ZK-3 na podkladu schematické geologické mapy uvádí Příloha 4, Příloha 7 a Příloha 10.



Obr. 41 Starší strmá stavba v BZ₁-XII, v pravé části fotografie vrásněná (spodní hrana fotky cca 1,5 m)



Obr. 42 Naložená metamorfní foliace středního sklonu k JZ (BZ1-XII, u čelby v říjnu 2015)



Obr. 43 Naložená subhorizontální metamorfní foliace v ZK-1, jižní stěna



Obr. 44 Asymetrická vrásavé struktura částečně transponované strmé stavby do mírně ukloněných ploch k JJV (ZK-1, jižní stěna)



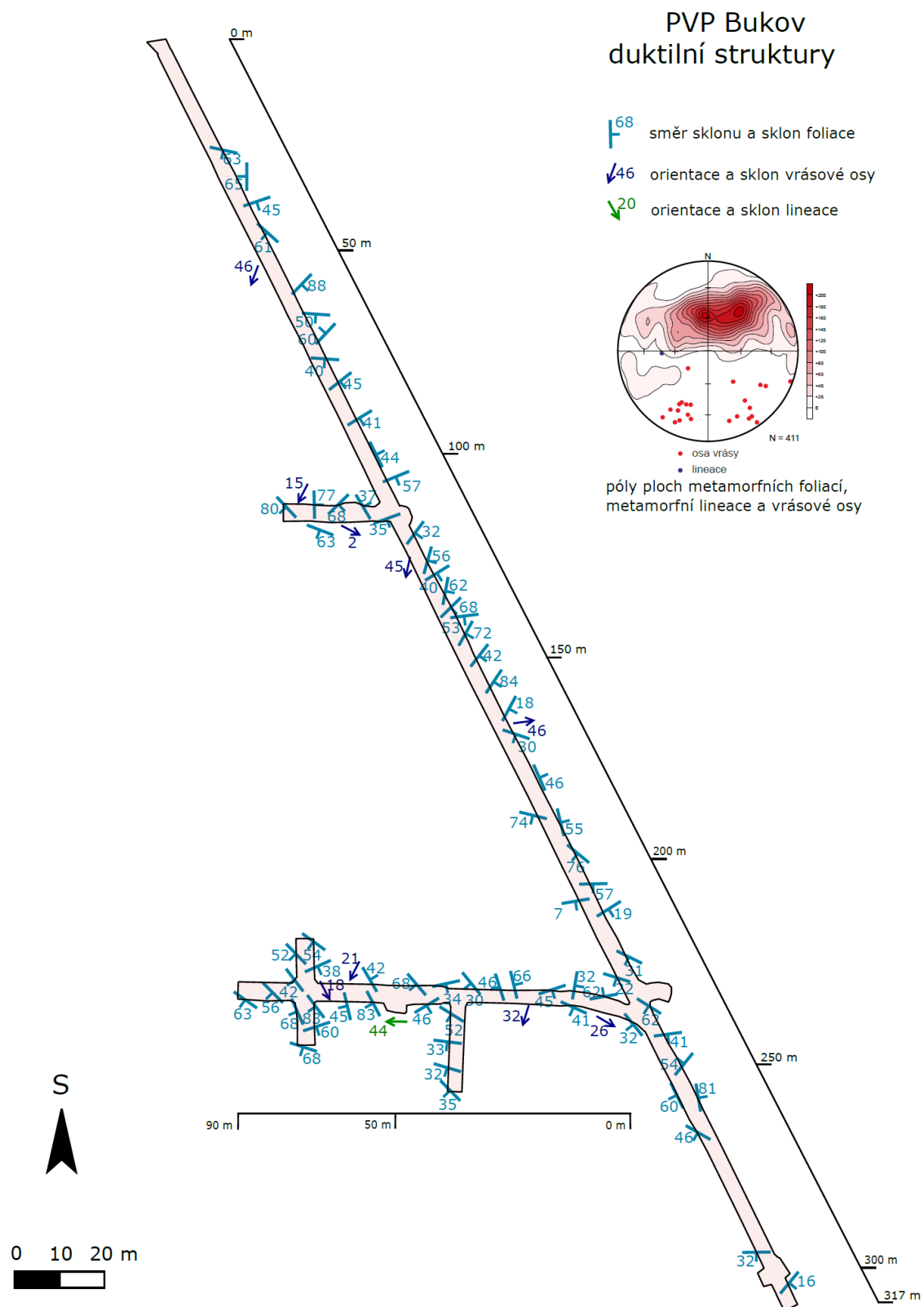
Obr. 45 Vrásavá struktura (ZK-1, severní stěna, spodní hrana fotky cca 20 cm)

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017



Obr. 46 3D vizualizace vrásové struktury v ZK-1, jižní stěna (spodní hrana cca 1,5 m)

Prostorová analýza orientací metamorfních foliací (Obr. 47) ukazuje, že po celé délce přístupové chodby BZ-XIIJ, BZ₁-XII a rozrážek ZK-1 až ZK-3 je možné pozorovat dvě dílčí maxima v orientaci metamorfních foliací. Méně výrazné orientační maximum tvoří foliace upadající strmě k JZ. Tyto foliace byly poměrně výrazně transponovány do ploch upadajících pod mírnými až středními sklony k J až JV, které tvoří druhé výrazné orientační maximum (Obr. 47). V intervalu metráže 20-145 m přístupového překopu BZ-XIIJ foliační plochy zapadají poměrně homogenně pod středními úhly k J až JV. Pouze lokálně byly identifikovány orientace foliací sz.-jv. průběhu se středním až strmým sklonem k JZ (metráž 27-50 m), místy s výskytem drobných izoklinálních vrás. V intervalu metráže 145-185 metrů byl pozorován poměrně velký rozptyl sklonu foliačních ploch. Původní foliace strmé orientace průběhu SSV–JJZ zde byly heterogenně převrásněny nebo střížně refoiovány do ploch, které upadají pod mírnými až středními úhly k ZJZ, J až JV. Doména s převládající reliktní strmou orientací foliačních ploch se nachází na metrži 150 m. Zjištěné vrásové osy dominantně upadají pod mírnými úhly k ~JJV až JV nebo ~SZ. Vrásové roviny výrazně asymetrických, místy až sevřených vrás jsou orientovány převážně pod mírnými úhly k J až JZ. V úseku metráže 185 až 254 m byly zejména měřeny relativně starší foliace strmé orientace v průběhu SZ(ZSZ)–JV(VJV) s převažujícím sklonem k JZ až JJZ. Tyto primární metamorfní foliace byly částečně převrásněny nebo střížně refoiovány do ploch upadajících pod mírnými až středními úhly k J až JJV. Vrásové osy upadají pod mírnými úhly převážně k SZ nebo JV až JJV. Osní plochy naložených vrás mají mírný sklon k jihu. V rozsahu metráže 254 až 310 m metamorfní foliace upadají pod středními úhly k ~JZ až JJZ.



Obr. 47 Strukturní mapa PVP Bukov v rozsahu přístupové chodby BZ-XIIJ a BZ₁-XII, zkušební rozrážky ZK-1, experimentálních rozrážek ZK-2 a ZK-3, orientační diagram prvků duktilní tektoniky (plochojevná projekce na spodní polokouli)

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

Metamorfni foliace strmé orientace v průběhu SSZ–JJV až SSV–JJZ byly asymetricky převrásněny nebo střížně refoiovány do nových ploch, které upadají pod mírnými úhly k ZJZ, J až JV. Odpovídající vrásové osy dominantně upadají pod mírnými úhly k ~JJV až JV nebo ~SZ. Vrásové roviny výrazně asymetrických, místy až sevřených vrás jsou orientovány převážně pod mírnými úhly k J až JZ. V oblasti zkušební rozrážky ZK-1 je orientace metamorfních foliací variabilní. V prvním úseku foliační plochy zapadají převážně pod mírnými úhly k JV. Ve střední části rozrážky je možné pozorovat reliktní foliace strmé orientace v průběhu ~SSZ–JJV s doklady heterogenní transpozice (převrásnění) do ploch upadajících pod mírnými úhly k J až JV. V menší míře foliace mají také SZ–JV průběh a zapadají pod středními úhly k JZ. V prostoru chodby BZ₁-XII a rozrážek ZK-2 a ZK-3 je orientace metamorfních staveb poměrně homogenní. Metamorfni foliace zde zapadají převážně pod středními úhly k ~JZ až J. Pouze v první části chodby BZ₁-XII byl mapován výskyt reliktních metamorfních foliací strmé orientace s dominantním sklonem k ~ZJZ až JZ. Tyto foliace pak nesou záznam částečné transpozice (převrásnění) do ploch upadajících pod středními úhly k ~JZ až J. Vrásové osy upadají převážně pod mírnými úhly k JV. Osní plochy naložených vrás mají mírný sklon k J, JZ nebo SV. Na soubor vrásněných metamorfních foliací byly naloženy lokalizované střížné zóny (Obr. 55).

Struktury křehkého porušení

V oblasti PVP Bukov byly mapovány křehké deformační struktury s indikátory pohybu (střížné pukliny, zlomy a zlomové zóny; Obr. 48) a extenzní pukliny (Obr. 49). Struktury křehkého porušení místy obsahují jílovou nebo minerální výplň (kalcit, chlorit a křemen) a alteraci oxidy Fe. Převažující zlomové struktury mají strmý až střední sklon k JV až JJV. Druhé výrazné orientační maximum tvoří zlomy upadající pod strmými až středními úhly k ~JZ až ZJZ. Indikátory kinematiky nebývají zřetelné a zlomové struktury místy nesou znaky polyfázové reaktivace. Na základě terénního pozorování v širším okolí PVP Bukov je však možné předpokládat, že zlomy upadající pod strmými až středními úhly k JJV až VJV v převaze nesou indikátory poklesové kinematiky (Obr. 50). Zlomové struktury upadající pod strmými úhly k ~JZ (druhé orientační maximum) pak často nesou indikátory poklesové nebo pravostranné kinematiky. Přehled hlavních zlomových struktur mapovaných v rámci PVP Bukov uvádí schematická mapa zlomových struktur na Obr. 54. Podrobné mapy orientace a distribuce zlomových struktur ve zkušební rozrážce ZK-1, přístupové chodbě BZ₁-XII a experimentálních rozrážkách ZK-2 a ZK-3 uvádí Příloha 6, Příloha 9 a Příloha 12. Přehled orientačních parametrů hlavních zlomů a zlomových zón a jejich přesnou pozici podává Tab. 3.

Hlavní zlomové zóny vyššího řádu byly mapovány v oblasti přístupového překopu BZ-XIIJ na staničení 65 m (Z 120/42), 152 m (ZZ 105/73), 161 m (Z 142/88) 170 m (ZZ 227/45), 200 m (ZZ 139/82), 201,5 m (ZZ 148/64), 227 m (ZZ 125/77) a 313,5 m (ZZ 283/80). V prostorech zkušební rozrážky ZK-1 byla zjištěna výraznější tektonická porucha na staničení 20,5 (ZZ 225/45). Další výrazné zlomové struktury byly mapovány v experimentální rozrážce ZK-2 na staničení 19,5 m (Z 91/65) a v experimentální rozrážce ZK-3S (ZZ 228/50) a ZK-3J (ZZ 222/54 a ZZ 151/52). Některé zlomové struktury a puklinové systémy jsou zvodnělé. Většina zjištěných přítoků je vázána na průnik tělesa PVP a křehkých struktur nebo průzkumné vrty S-1, S-2, S-3, S-8, S-14 a S-17. V oblasti PVP Bukov byly identifikovány zvodnělé poruchy s indikátory pohybu (střížné pukliny a zlomy). V přístupovém překopu BZ-XIIJ se tyto zvodnělé struktury nacházejí na staničení 152 až 153 m, 183 až 185 m, 189 až 192 m a 310 až 316 m. V oblasti překopu BZ₁-XII se jedná o zvodnělé poruchy na staniční 13 až 18 m, 30 až 35 m a 66 až 69 m. Významné zlomové pásmo na metráži 310 až 316 nabývající

mocnosti až 2 metry upadá pod strmým úhlem k Z až ZSZ. Jedná se o jednu z nejvýraznějších struktur křehkého porušení v širší oblasti PVP.



Obr. 48 Zlomová struktura ~SV–JZ průběhu s minerální výplní (překop BZ1-XII, metráž 74 m, severní stěna)



Obr. 49 Extenzní puklina (zapadající do prostoru překopu) s výplní epidotu a chloritu (BZ₁-XII, metráž 74,5 m, jižní stěna, spodní hrana foto 1,5 m)



Obr. 50 Striace na zlomové ploše s chloritem a hematitem (BZ₁-XII)



Obr. 51 Pohled na hematitizovanou poruchu procházející východní stěnou ZK-2, v délce cca 8 m

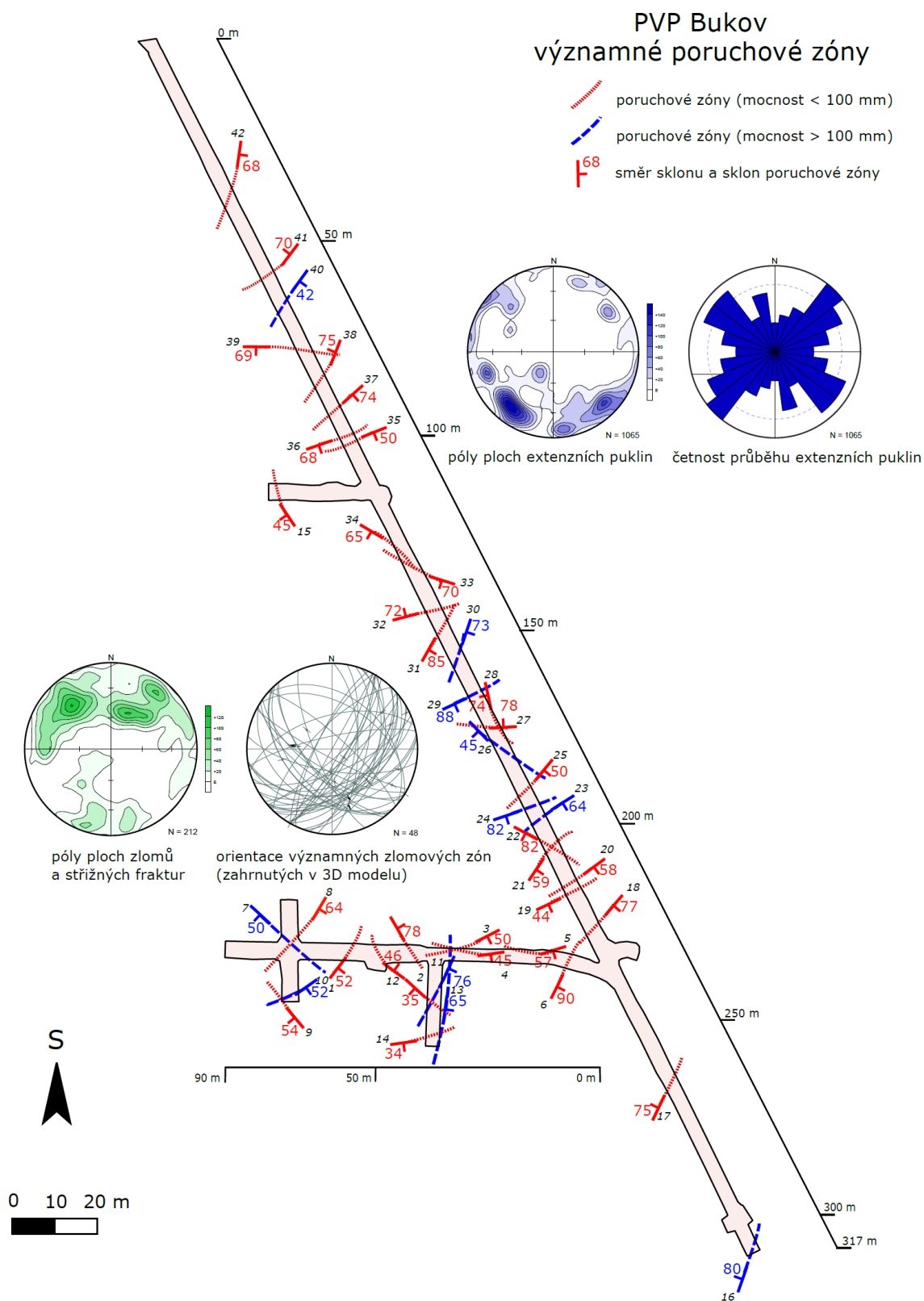
 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017



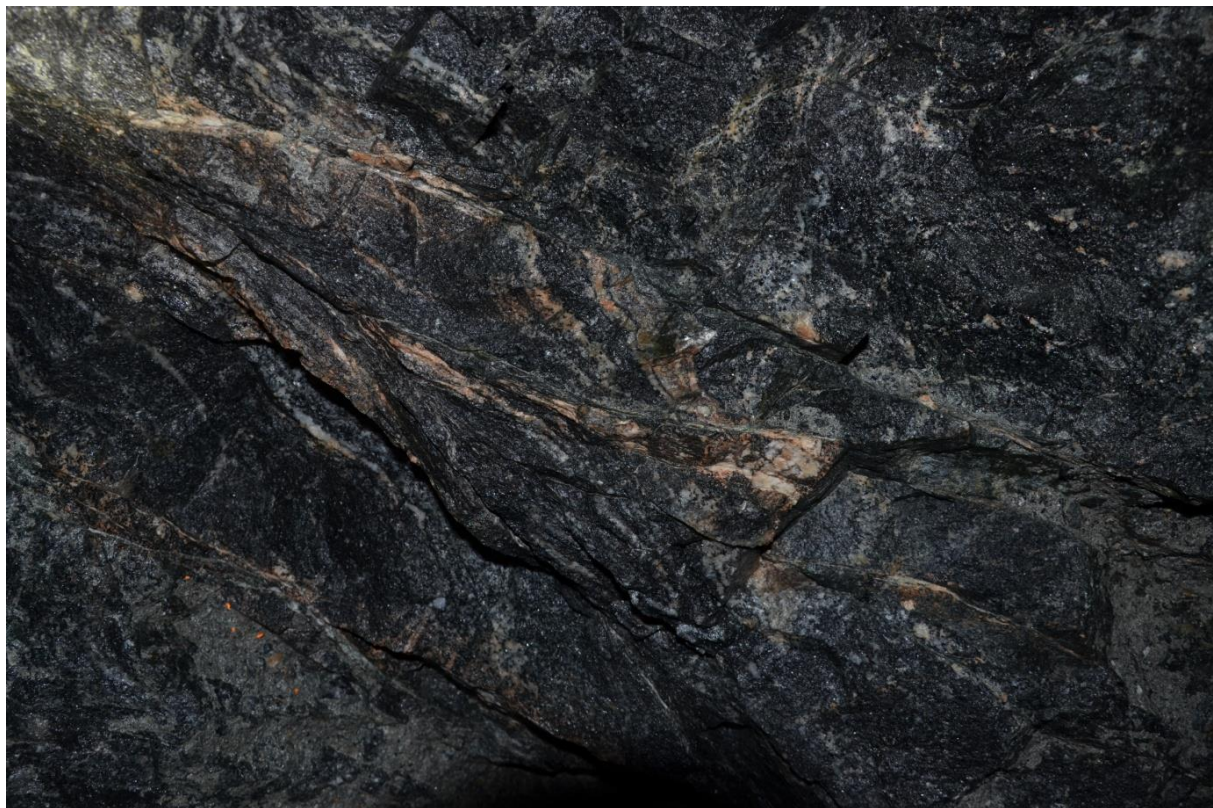
Obr. 52 Drobné vertikální pukliny vyplněné kalcitem (BZ1-XII, severní stěna, spodní hrana fotky 20 cm)



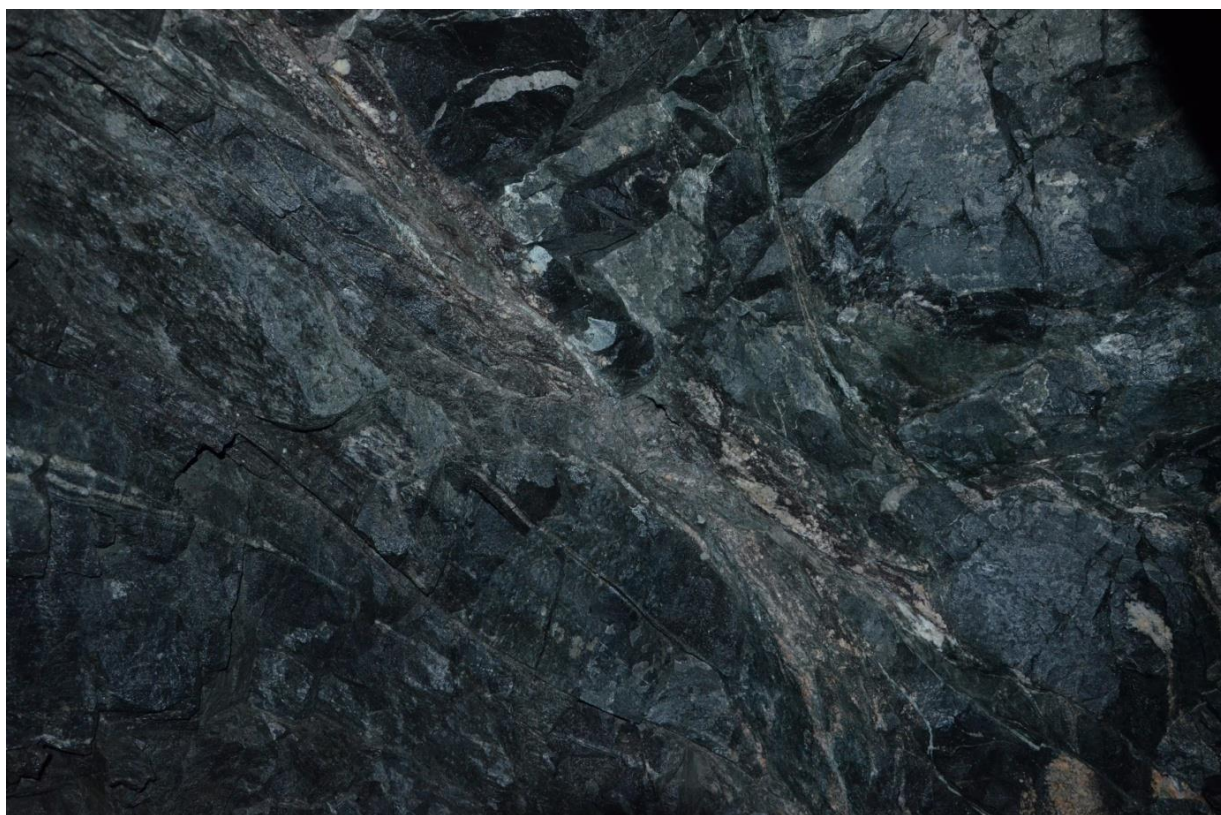
Obr. 53 Hematitizované poruchy a jejich okolí v BZ-XIIJ (185 m, východní stěna)



Obr. 54 Strukturní mapa významných poruchových zón v oblasti PVP Bukov, orientační diagramy ploch struktur křehkého porušení s indikátory pohybu (zlomy, zlomové zóny a střížné pukliny; vlevo); orientační diagram pólů ploch extenzních puklin a růžicový diagram četnosti extenzních puklin v jednotlivých směrech (vpravo). Číslo u poruchové struktury odpovídá pořadí v tabulce 3.



Obr. 55 Střížné zóny v poruše na metrži 69-70 m (BZ₁-XII, jižní stěna, spodní hrana fotky 40 cm)



Obr. 56 Střížná porucha B-XIIJ (305 m, východní stěna)

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

Tab. 3 Přehled významných poruchových zón PVP Bukov. Grafické zobrazení struktur viz Obr. 54 (kin. – kinematika)

	lokalizace		orientace poruchy			striace		informace		
číslo	rozrážka	staničení	struktura	směr	sklon	směr	sklon	kinem.	výplň	(mm)
1	BZ ₁ -XII	62,8	SP-Z	134	52	62	27		Cal, chl	až 80
2	BZ ₁ -XII	56	Z	73	78				Cal	1
3	BZ ₁ -XII	35	Z	139	50				jíl, chl	30
4	BZ ₁ -XII	35	Z	165	45					
5	BZ ₁ -XII	14,8	Z	128	57	88	24		chl, Cal	4-40
6	BZ ₁ -XII	9,1	Z	119	90				Cal, chl	6-15
7	ZK-3S	2,2	ZZ	228	50				Cal, chl	až 150
8	ZK-3S	1,8	SP-Z	122	64				Cal, chl	2-5
9	ZK-3J	9,7	Z	222	54					
10	ZK-3J	6,9	ZZ	151	52	28	5			až 100
11	ZK-2	11,2	Z	120	76	125	66	dex	jíl, Cal, kat	100
11	ZK-2	11,2	Z	120	76	38	4			100
12	ZK-2	12,8	Z	205	35	261	26	násun	Cal, chl	5
13	ZK-2	19,5	Z	91	65	157	35	sin	Cal, chl, hem	400
14	ZK-2	19,4	Z	172	34				Cal, chl, jíl	2
15	ZK-1	20,5	Z	225	45					
16	BZ-XIIJ	313,5	ZZ	283	80					2000
17	BZ-XIIJ	257	Z	299	75	205	1		Cal, chl, py	2
18	BZ-XIIJ	227	Z	125	77				Cal, dutiny	10
19	BZ-XIIJ	216	Z	149	44				kat, Cal, jíl	7
20	BZ-XIIJ	216	Z	147	58				kat, Cal, jíl	7
21	BZ-XIIJ	208	Z	106	59	146	52		q, Cal	10
22	BZ-XIIJ	210	Z	208	82	105	20	dex		
23	BZ-XIIJ	201,5	ZZ	148	64					150
24	BZ-XIIJ	200	ZZ	139	82				jíl, chl, Cal	150
25	BZ-XIIJ	196	Z	120	50					
26	BZ-XIIJ	170	ZZ	227	45	258	42		q, chl, Cal	1000
27	BZ-XIIJ	170	Z	348	78					
28	BZ-XIIJ	166,5	Z	247	74	302	60			
29	BZ-XIIJ	161	Z	142	88				Cal, jíl, chl	300

 SÚRAO		Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov						Evidenční označení:		
								ZZ 191/2017		
30	BZ-XIIJ	152	ZZ	105	73				chl	100
31	BZ-XIIJ	145	Z	111	85	131	41			10-30
32	BZ-XIIJ	142,5	Z	345	72	72	22	dex	chl, Cal	do 20
33	BZ-XIIJ	132	Z	210	70	182	62	pokles	chl, Cal	
34	BZ-XIIJ	129	Z	216	65	175	62		Cal, chl	
35	BZ-XIIJ	100	Z	155	50				jíl, Cal, chl	60
36	BZ-XIIJ	98	Z	157	68					
37	BZ-XIIJ	92	Z	142	74				Cal, chl	20
38	BZ-XIIJ	85	Z	280	75					
39	BZ-XIIJ	76	Z	169	69	96	20		Cal, ep	
40	BZ-XIIJ	65	Z	120	42				Cal, chl	30-100
41	BZ-XIIJ	57	Z	294	70				Cal, chl	4
42	BZ-XIIJ	35	Z	90	68				chl, jíl	20-50

Měřené extenzní pukliny v oblasti PVP vykazují dvě hlavní orientační maxima a mají ortogonální charakter. Nejčetnějším souborem těchto struktur jsou extenzní pukliny subvertikální orientace v průběhu ~SV–JZ. Druhým výrazným puklinovým souborem jsou fraktury upadající pod strmými úhly k ~SSV až VSV. Podřízenou sadu extenzních puklin pak tvoří fraktury ~V(VSV)–Z(ZJZ) průběhu (Obr. 54). Podrobné mapy orientace a distribuce extenzních puklin ve zkušební rozrážce ZK-1, přístupové chodbě BZ₁-XII a experimentálních rozrážkách ZK-2 a ZK-3 uvádí Příloha 5, Příloha 8 a Příloha 11. V oblasti hlavní přístupové chodby BZ-XIIJ mezi nejvýraznější sadu subvertikálních extenzních puklin patří struktury upadající pod strmými úhly k ~VSV a ~ZSZ až ~SSZ (průměrný rozestup fraktur činí 70 cm). V rámci zkušební rozrážky ZK-1 je orientace i četnost extenzních puklin obdobná. Nejpočetnější skupinou jsou zde strmé extenzní pukliny ~SZ–JV průběhu. Četnostně podřízené pukliny pak zapadají pod středními úhly k ~SZ. V prostoru rozrážky BZ₁-XII jsou vyvinuté čtyři výrazné puklinové sady. Nejpočetnější jsou soubory strmých fraktur odpovídají průběhu ~SSV–JJZ a SZ–JV (průměrný rozestup fraktur činí 50 až 80 cm). Méně četné jsou dva na sebe kolmé puklinové sety fraktur v průběhu ~SV–JZ. V oblasti experimentální rozrážky ZK-2 extenzní pukliny nabývají převážně strmé orientace tvoří tři rovnocenná maxima (průměrný rozestup fraktur činí 80 cm), a to v průběhu ~S–J (drobné vertikální pukliny vyplněné kalcitem, Obr. 52), ~SV–JZ a ~SZ–JV. Oblast experimentální rozrážky ZK-3 vykazuje dvě dílčí maxima v orientaci extenzních puklin, a to strmého až středního úklonu k ~JJV a středního sklonu k ~SV. Pukliny místy nesou minerální výplně vlasové mocnosti ve složení kalcit, chlorit, křemen, hematit, limonit a pyrit. Hlavní puklinové systémy jsou prostorově vázány na zlomové struktury (Obr. 55, Obr. 56).

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

2.1.6 Analýza anizotropie magnetické susceptibility

Analýza anizotropie magnetické susceptibility (AMS) byla použita za účelem identifikace orientace a kvantifikace staveb hornin v prostředí PVP Bukov. Na základě analýzy magnetické anizotropie feromagnetických a paramagnetických minerálů v orientovaných vzorcích hornin byly získány informace o přednostní prostorové orientaci minerálů v hornině (magnetická foliace a lineace). Dále byl pomocí metody AMS určen charakter a intenzita magnetických staveb. Podrobný popis metody včetně možných aplikací uvádí publikace Tarling a Hrouda (1993). Výsledky analýzy AMS byly vyhodnoceny pomocí základních parametrů magnetické anizotropie v programu ANISOFT (Hrouda et al. 1990).

Pro analýzu AMS byly na lokalitě PVP Bukov odvrtny orientované horninové vzorky v celkovém počtu 16 odběrných míst, a to v oblasti (a) přístupové chodby BZ-XIIJ (6 vzorků R12-1 až R12-6), (b) zkušební rozrážky ZK-1 (4 vzorky B1 až B4) a (c) přístupového překopu BZ1-XII (6 vzorků B5 až B10). Lokalizace vzorků jsou uvedeny v Elektronická příloha 13. Analýza AMS byla provedena celkem na 155 orientovaných vzorcích (vrtných jádrech o průměru 48 a 25,6 mm). Měření AMS probíhalo na kappa můstku MFK1-FA ve firmě AGICO a Laboratoři horninového magnetismu na Ústavu geologie a paleontologie Přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy a v laboratoři České geologické služby. Termomagnetická analýza byla provedena v laboratoři horninového magnetismu na České geologické službě za použití nemagnetické pece CS4 (vysokoteplotní experiment v teplotním rozmezí 20 až 700 °C) a kryostatu CS-L (nízkoteplotní experiment v rozmezí teplot -196 až 20 °C). Termomagnetická data byla zpracována v programu Cureval 8 (<http://www.agico.com>).



Obr. 57 Odběr jádra na analýzu AMS pomocí elektrické vrtačky v rozrážce ZK-1 (jižní stěna)



Obr. 58 Horninový masiv po odběru jádra B8 (B8_1 a B8_2) v rozrážce BZ1-XII

Metodika

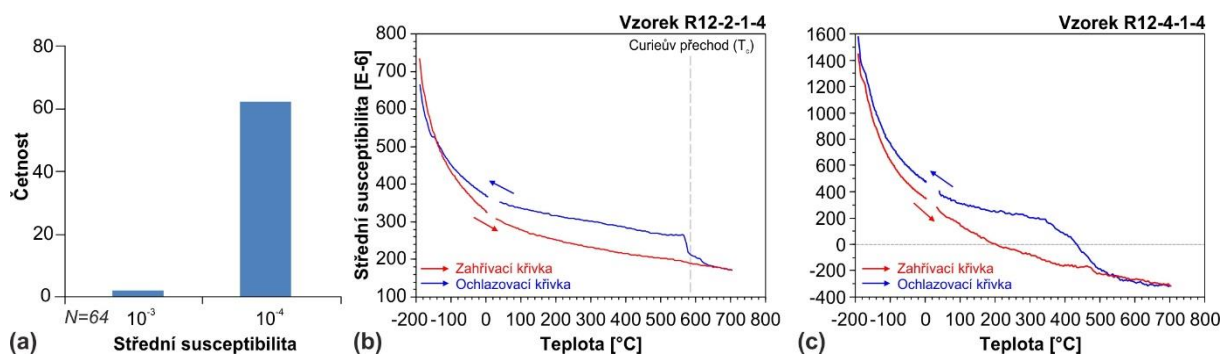
Magnetická susceptibilita $k = M/h$ (SI) je bezrozměrná konstanta úměrnosti velikosti magnetizace (M) a intenzity magnetického pole. V trojrozměrném prostoru je magnetická susceptibilita definována jako tenzor, jehož hlavní diagonální složky jsou maximální susceptibilita k_1 , střední susceptibilita k_2 a minimální susceptibilita k_3 . Na základě magnetických vlastností se rozlišují tři skupiny minerálů. (a) Diamagnetické minerály (křemen a živec) vykazují slabou zápornou magnetizaci ($k < 0$), která působí proti směru vnějšího magnetického pole. Velikost susceptibility je v řádu 10^{-5} . (b) Paramagnetické minerály (amfiboly, pyroxeny, slídy a olivín) se projevují slabou kladnou magnetizací (v řádech 10^{-2} až 10^{-4}), a to ve směru magnetického pole. (c) Feromagnetické materiály (např. magnetit, hematit a další oxidy železa a titanu, pyrrhotin) jsou charakterizovány složitou závislostí mezi vnějším polem a indukovanou magnetizací. Susceptibilita těchto minerálů je vysoká (v řádech 10^0 – 10^{-2} SI). Jednotlivé minerály vykazují dva typy magnetické anizotropie (Grégoire et al. 1995). Nositelem tvarové a distribuční anizotropie je magnetit a další minerály Fe-Ti oxidů. Nositelem krystalografické anizotropie jsou pak běžné horninotvorné minerály feromagnetických a paramagnetických vlastností.

Analýza AMS vychází z určení přednostní prostorové orientace hlavních os elipsoidu magnetické susceptibility ($k_1 \geq k_2 \geq k_3$), které odráží orientaci magnetických staveb (magnetické foliace a lineace). Magnetické lineace odpovídají orientaci maximální susceptibility (k_1). Magnetické foliace jsou kolmé na orientaci minimální susceptibility (k_3). Mezi další základní parametry metody AMS patří střední susceptibilita K_m ($k_m = (k_1 + k_2 + k_3)/3$). Stupeň anizotropie (P), která odráží kvalitativní a kvantitativní obsah magnetických minerálů v hornině. Stupeň magnetické anizotropie P ($P = k_1/k_3$) vyjadřuje excentricitu magnetického elipsoidu čili intenzitu přednostní orientace příslušných minerálů. Tvarový parametr T

($T=2\ln(k_2/k_3)/\ln(k_1/k_3)-1$) udává charakter magnetické stavby. Tvarový parametr T nabývá hodnot v rozmezí -1 až 0 (lineární stavba) a hodnot v rozmezí 0 až 1 (planární stavba). Metodika AMS byla zpracována na základě publikací Hrouda et al. (1990) a Tarling a Hrouda (1993).

Magnetická mineralogie

Převážná část analyzovaných vzorků (138 z celkového počtu 155 vzorků) vykazuje hodnoty magnetické susceptibility v řádu 10^{-4} (Obr. 59a), což indikuje dominanci paramagnetických minerálů jako hlavních nositelů signálu AMS. Zbývající minorita vzorků vykazuje hodnoty střední susceptibility v řádu 10^{-3} . Za účelem přesné identifikace nositelů AMS signálu byla provedena termomagnetická analýza na dvou reprezentativních vzorcích (Obr. 59 b, c). Oba vzorky R12-2-1-4 ($k_m = 2,65 \times 10^{-4}$) a R12-4-1-4 ($k_m = 2,83 \times 10^{-4}$) ukazují obdobný průběh termomagnetických křivek, kdy s rostoucí teplotou od -196°C klesá susceptibilita po hyperbolické křivce (Obr. 59 b, c). Tento jev je typický pro paramagnetické minerály (biotit a amfibol). U obou vzorků je dále patrný nárůst susceptibility na ochlazovací křivce, Curieův přechod při $\sim 575^\circ\text{C}$ u vzorku R12-2-1-4 (Obr. 59 b) a při $\sim 450^\circ\text{C}$ v případě vzorku R12-4-1-4 (Obr. 59 c). Jelikož nárůst susceptibility není patrný na zahřívací křivce (Obr. 59 b, c) je možné předpokládat částečnou krystalizaci feromagnetických složek až během experimentu. Dominantním zdrojem AMS jsou tedy čistě paramagnetické minerály (biotit a amfibol) bez příměsí Fe–Ti oxidů.



Obr. 59 (a) Histogram hodnot magnetické susceptibility (K_m) pro lokality R12-1 až R12-6, výsledky termomagnetické analýzy jako funkce teploty pro reprezentativní vzorky (b) R12-2 a (c) R12-4

Parametry AMS a magnetické stavby

Přehled výsledků měření AMS na 16 odběrných místech, kde bylo celkově analyzováno 155 horninových vzorků uvádí Elektronická příloha 26. Stupeň anizotropie P udává míru přednostní orientace minerálů (čím silnější stavba, tím vyšší stupeň anizotropie). Parametr T udává charakter stavby (prolátní – spíše lineární uspořádání minerálů, oblátní – převažuje planární uspořádání minerálů).

Stupeň anizotropie (P) vykazuje rovnoměrnou distribuci hodnot (Obr. 60 a, b), která se pohybuje od 1,025 do 1,25 ($\sim 2,5$ až 25% anizotropie) s průměrem 1,082 (~ 8 % anizotropie). Relativně nižší hodnoty P parametru byly zjištěny na lokalitách R12-1, R12-3, R12-5, R12-6, B-5, B-6, B-5, B-8 a B-9 (anizotropie v rozmezí 2,5 až 11%). Nejvyšší hodnoty anizotropie nesou horniny na lokalitách R12-2, B-2, B-3, a B-7 (anizotropie v rozmezí 15 až 25%).

Hodnoty tvarového parametru (T) v rozmezí -0,84 až 0,95 vymezují relativně široký rozptyl od lineárních k planárním stavbám (Obr. 60 b). Převážná část měřených vzorků však nabývá

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

kladných hodnot v rozmezí 0,01 až 0,95 (86% vzorků) s průměrnou hodnotou 0,5. Jedná se tedy o převažující oblátní (planární) charakter magnetické stavby. Převažující planární stavba byla zachycena na lokalitách R12-2, R12-5, B-3 a B-9 a B10. Neutrální tvar magnetického elipsoidu (s hodnotami okolo 0) pak vykazují zejména lokality R12-6 a B-5. Prolátní (lineární) tvar elipsoidu susceptibility byl zjištěn na lokalitě R12-4.

Magnetické foliace (plochy definované osami elipsoidu k_1-k_2) tvoří nevýrazný obloukový pás směru SZ–JV → SV–JZ → SZ–JV (Obr. 60 c). Tento orientační pás je definován projekcí strmé magnetické foliace v průběhu ZSZ–VJV až SZ–JV (zobrazení v okrajových částech diagramu; Obr. 60 c) a výrazným orientačním maximem magnetických foliací upadajících pod mírnými až středními úhly k JJV až JJZ (projekce ve středové části diagramu; Obr. 60 c). Mezi lokality s vyvinutou strmou orientací magnetické foliace v průběhu ZSZ–VJV až SZ–JV patří R12-5 a B-7. Dominantně mírně ukloněné magnetické foliace vykazují lokality B-1, B-3, B-9, B-10 a R12-2. Orientace magnetických lineací jsou poměrně homogenní, tvoří výrazné maximum v okrajové části diagramu s mírným sklonem k JV až JJZ (Obr. 60 c). Výjimku tvoří lokalita R12-4, kde jsou zaznamenány strmé orientace magnetických lineací.

Výsledky zhodnocení AMS stavby na vybraných vzorcích

B1 Velmi mírně šikmá magnetická foliace vůči orientaci vzorku (odchylka 20°), lineace v ploše foliace, kolmá na spádnici orientace vzorku. Stupeň anizotropie ca 15% (průměrná hodnota). Tvarový parametr (-0,14 – neutrální až slabě prolátní). Shoda mezoskopické a AMS foliace.

B2 Téměř paralelní magnetická foliace vůči orientaci vzorku (odchylka 10°), lineace v ploše foliace paralelní s orientací vzorku (odchylka 9%). Stupeň anizotropie ca 40% (výrazně nadprůměrná hodnota). Tvarový parametr (0,25 – slabě oblátní). Shoda mezoskopické a AMS foliace.

B3 Šikmá magnetická foliace vůči orientaci vzorku (odchylka ca 3°), lineace v ploše foliace šikmá k orientaci vzorku. Stupeň anizotropie ca 15% (výrazně nadprůměrná hodnota). Tvarový parametr (0,65 – oblátní). Shoda mezoskopické a AMS foliace.

B4 Šikmá magnetická foliace vůči orientaci vzorku (odchylka ca 40°), lineace v ploše foliace šikmá k orientaci vzorku. Stupeň anizotropie ca 10% (mírně podprůměrná hodnota). Tvarový parametr (0,84 – oblátní). Odchylka v mezoskopické a AMS foliaci (vrásavá struktura).

B5 Šikmá magnetická foliace vůči orientaci vzorku (odchylka ca 35°), lineace v ploše foliace šikmá k orientaci vzorku. Stupeň anizotropie ca 7% (mírně podprůměrná hodnota). Tvarový parametr (0,34 – slabě oblátní). Odchylka v mezoskopické a AMS foliaci (vrásavá struktura).

B6 Téměř kolmá magnetická foliace vůči orientaci vzorku (odchylka 17°), lineace v ploše foliace kolmá na spádnici orientace. Stupeň anizotropie ca 7% (mírně podprůměrná hodnota). Tvarový parametr (0,58 - oblátní). Shoda mezoskopické a AMS foliace.

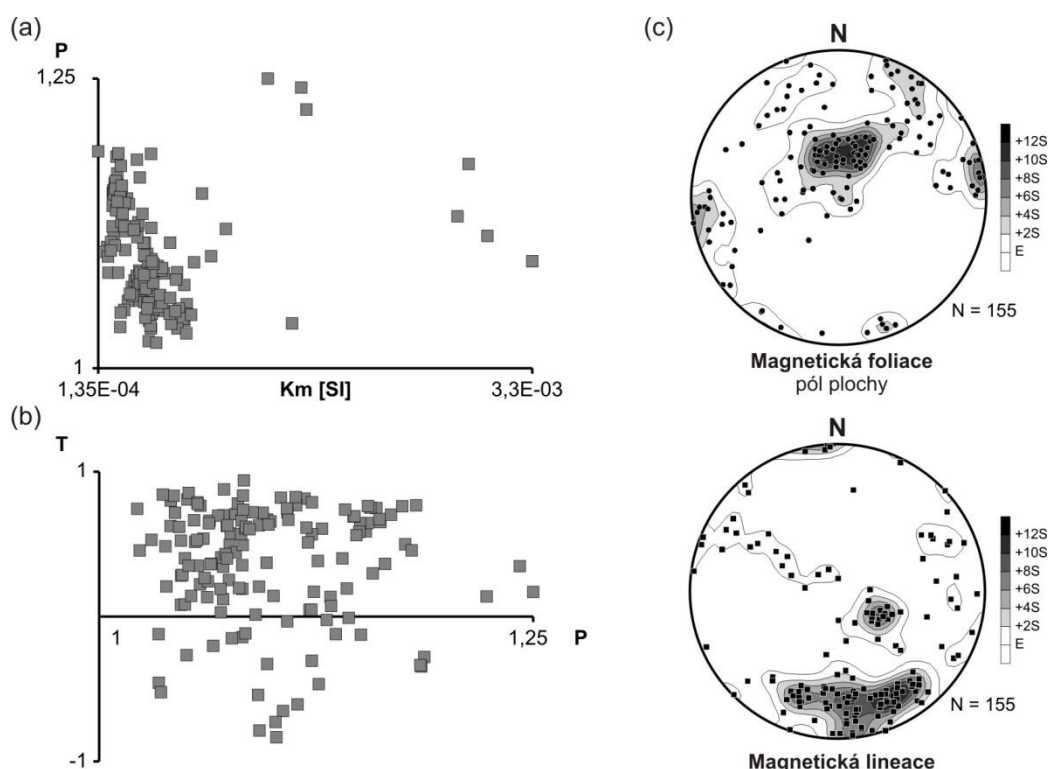
B7 Téměř kolmá magnetická foliace vůči orientaci vzorku (odchylka 16°), lineace v ploše foliace kolmá na spádnici orientace. Stupeň anizotropie ca 42% (výrazně nadprůměrná hodnota). Tvarový parametr (0,24 – slabě oblátní). Shoda mezoskopické a AMS foliace.

B8 Velmi mírně šikmá magnetická foliace vůči orientaci vzorku (odchylka 17°), lineace v ploše foliace (odchylka ca 25°). Stupeň anizotropie ca 7% (mírně podprůměrná hodnota). Tvarový parametr (0,74 – výrazně oblátní). Shoda mezoskopické a AMS foliace.

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

B9 Šikmá magnetická foliace vůči orientaci vzorku (odchylka 45°), lineace v ploše foliace (odchylka ca 15°). Stupeň anizotropie ca 6% (mírně podprůměrná hodnota). Tvarový parametr (0,39 –oblátní). Shoda mezoskopické a AMS foliace.

B10 Šikmá magnetická foliace vůči orientaci vzorku (odchylka 30°), lineace v ploše foliace (odchylka ca 5°). Stupeň anizotropie ca 5% (výrazně podprůměrná hodnota). Tvarový parametr (0,81 – výrazně oblátní). Shoda mezoskopické a AMS foliace.



Obr. 60 (a) Diagram stupně anizotropie (P) vs. střední magnetické susceptibilita Km. (b) Diagram hodnot tvarového parametru (T) a stupně anizotropie (P). (c) Orientační diagramy projekce magnetické foliace a lineace. Plochojevná projekce na spodní polokouli.

2.1.7 Analýza přednostní orientace pomocí difrakce zpětně odražených elektronů (EBSD)

Pro vzájemnou korelaci výsledků získaných metodami AMS a z transportních experimentů byly odebrány orientované geologické vzorky v místech, kde byla dříve navrtána jádra pro AMS (Obr. 61). Důraz byl kladen na odběr odpovídajícího vzorku s ohledem na navrtanou stavbu a možnost orientace vzorku na základě přítomné metamorfní foliace a lineace protažení biotitu a/nebo amfibolu. Z orientovaných vzorků (nazvaných EBX, kde BX je označení vzorku jádra odpovídající místu odběru) byly připraveny leštěné výbrusy, na kterých byla v Laboratoři elektronové mikroskopie a analýzy ČGS v Praze na Barrandově provedena analýza přednostní orientace minerálů pomocí zpětně odražených elektronů.

Pro analýzu byly výbrusy mechanicky leštěny OP-U koloidním roztokem s křemíkem firmy Struers. Analýza EBSD byla provedena pomocí elektronového mikroskopu FEG-SEM Tescan Mira 3-GMU s EBSD systémem Oxford Instruments NordlysII a softwaru AZtec Aquisition. Data byla dále zpracována v softwaru Channel5. Operační podmínky mikroskopu

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

byly následující: urychlující napětí 20kV, proud svazku 3nA, pracovní vzdálenost 20 mm s náklonem 70°.

Pro účely analýzy byly dále využity výbrusy, které se lišily svou texturou a obsahem minerálů, a zároveň je bylo možné korelovat dle shody AMS stavby se stavbou mesoskopickou. Na každém výbrusu bylo manuálním výběrem změřeno alespoň 500 zrn, dle zrnitosti materiálu a jeho zastoupení, co nejvíce tak, aby byl výsledek statisticky validní. Výsledné pólové diagramy (Obr. 62, Obr. 63,

Obr. 64) zobrazují orientaci uvedených směrů os krystalů křemene, kde jeho středem v horizontální rovině prochází orientace foliace a na jeho obvodu orientace lineace. Data lze pak interpretovat ve smyslu orientace jednotlivých směrů daných zrn minerálu ve vztahu k mesoskopické stavbě.

Ve výbrusu EB1 (Obr. 62) byl měřen křemen, plagioklas a amfibol. Je zřejmé, že přednostní orientace křemene není výrazná a projevuje se jen slabšími maximy c-os ve směru (0001). Plagioklas vykazuje také maximum (001) blízké orientaci lineace, amfibol má pak jasnou přednostní orientaci s maximem (100) ve směru Y, která je jasně patrná pásem také pro (001) a (010).

Ve výbrusu EB4 (Obr. 63) byl měřen křemen, plagioklas, biotit a amfibol. Přednostní orientace křemene není výrazná, projevuje se jen slabšími maximy (0001) subparalelními s lineací vzorku. Biotit má významné maxima c-os, s patrnou orientací lišt paralelní s mesoskopickou foliací, tedy (001) maximum kolmo k foliaci. Maxima orientace c-os amfibolu leží ve foliaci, blízko orientaci lineace. Plagioklas nejeví významnější přednostní orientaci.

Ve výbrusu EB5 (

Obr. 64) byl měřen křemen, biotit a plagioklas. Přednostní orientace křemene je v tomto jediném vzorku výrazná, projevuje se maximem c-os (0001) ve foliaci, kolmým k lineaci. Vzhledem k lehce nezvyklým orientacím c-os v tomto kinematickém rámci je snadno zpochybnitelné, zda byl vzorek dobře zorientován, vzhledem k ne zcela prokazatelné orientaci lineace v tomto mesoskopickém vzorku. Plagioklas jeví jasné maximum (010) ve směru Y a biotit má opět poměrně klasickou orientaci lišt paralelní s foliací a c-osy kolmé k foliaci.

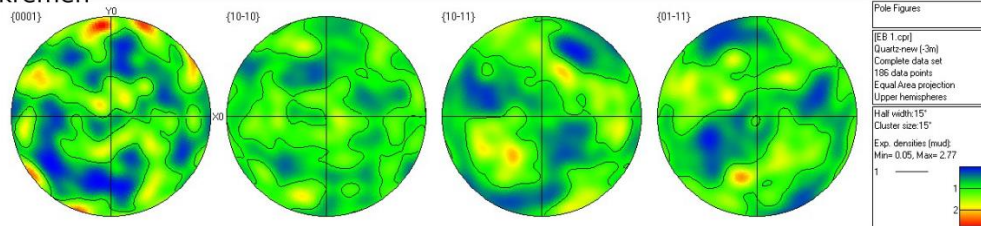
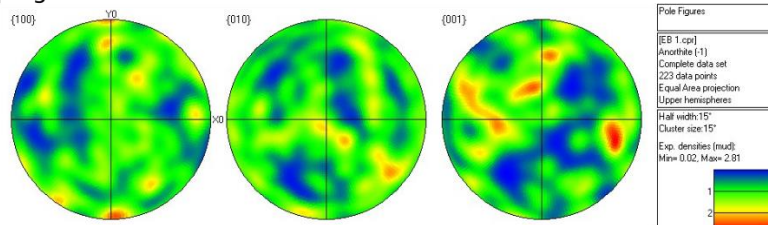
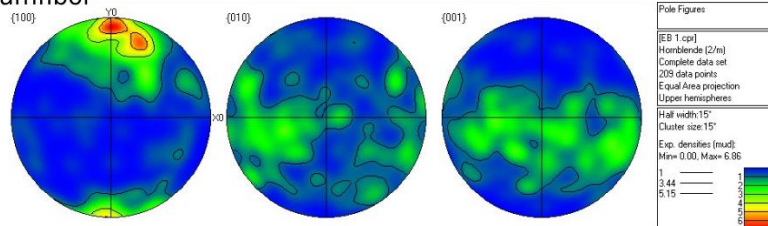
Korelace těchto dat s výsledky AMS a výsledky transportních experimentů prováděných UJV je komplikovaná, vzhledem k ne zcela jednoznačné orientaci AMS vrtů k mesoskopické stavbě. Obecně z dat vyplynula shoda mesoskopické a AMS foliace pro vzorek B1 (odebraný v ploché již vrásněné stavbě), u vzorků B4 a B5 se foliace mesoskopická a AMS lišila, jednalo se o vzorky odebrané ze zámku vrásky, kde lze s reorientací minerálů (a tedy změnou stavby) počítat.

Drobný rozdíl mezi AMS a mesoskopickou foliací může být dán orientací zrn amfibolu, která dle EBSD u vzorku EB4 vytváří významné maximum, zatímco u vzorku EB1 tvoří spíše pás orientací c-os. Vzhledem k nepřítomnosti biotitu ve studovaném vzorku EB1, nelze diskutovat o tomto rozdílu. Odlišná je také přednostní orientace křemene (zejména u vzorku EB5), ten ovšem výsledky AMS neovlivní. Tento rozdíl je pravděpodobně způsoben naložením deformačních staveb v zámkové doméně, kde může být zachován záznam starší stavby.

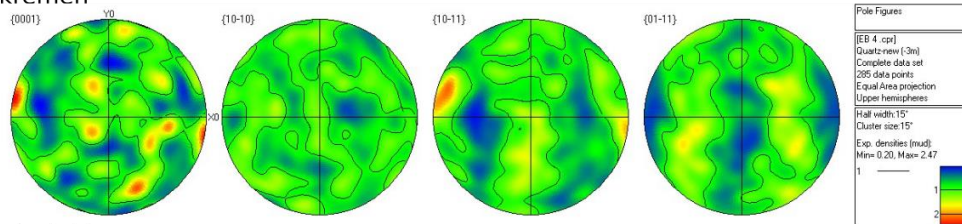
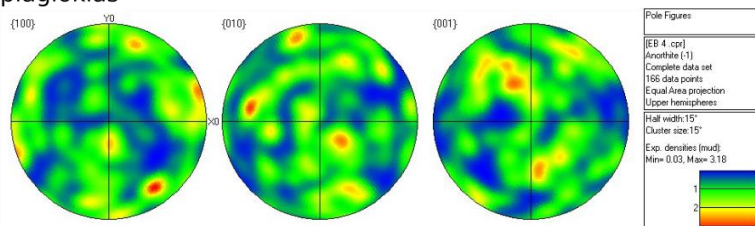
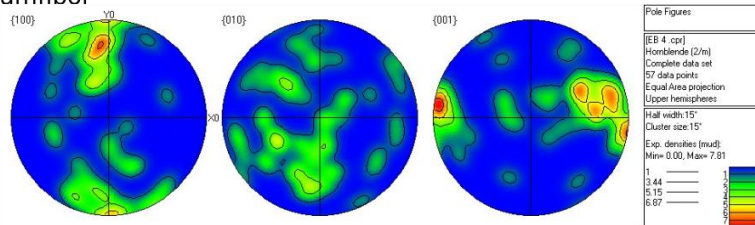
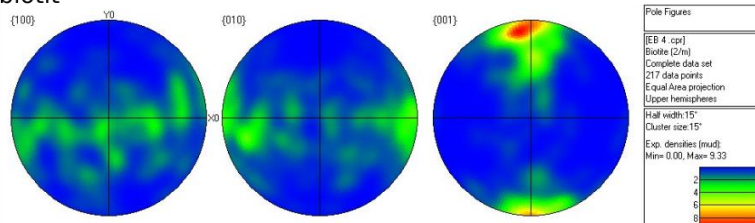
Pro vysvětlení těchto odchylek by ale byla potřeba podrobnější studie na větším počtu vzorků, i vzhledem k nehomogennitě daných staveb (zřejmým i z Obr. 61).



Obr. 61 Příklad místa odběru orientovaného vzorku EB3 pro analýzu EBSD u původního odběru jádra B3

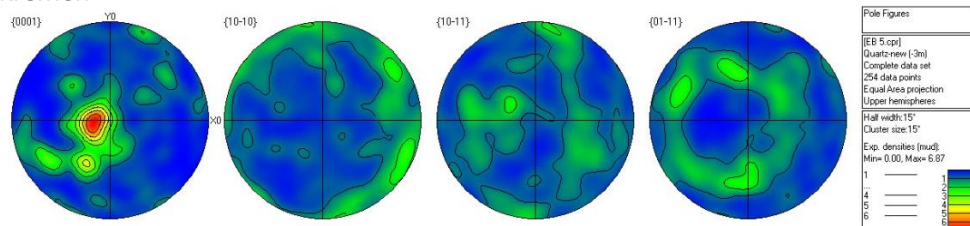
křemen

plagioklas

amfibol


Obr. 62 Krystalografická přednostní orientace minerálů vzorku EB1

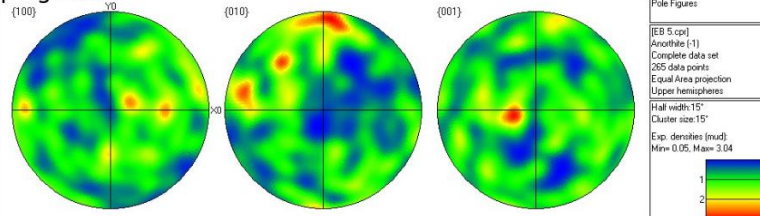
křemen

plagioklas

amfibol

biotit


Obr. 63 Krystalografická přednostní orientace minerálů vzorku EB4

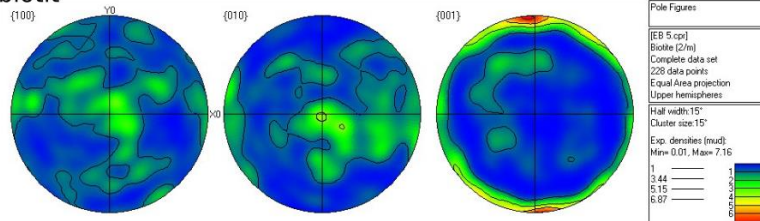
křemen



plagioklas



biotit



Obr. 64 Krystalografická přednostní orientace minerálů vzorku EB5

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

2.1.8 Geologická mapa 1 : 10 000 Bukov

Metodika geologického mapování

Metodika mapovacích a interpretačních prací při sestavování geologické mapy 1 : 10 000 Bukov vychází z platné směrnice pro sestavení základní geologické mapy ČR 1 : 25 000 (Hanžl et al. 2009) a řídí se metodickým pokynem České geologické služby k této směrnici (Hanžl et al. 2014). Vzhledem k zvláštnímu charakteru výzkumu na lokalitě Bukov (vyšší stupeň přesnosti) bylo mapování upraveno podle „Směrnice pro sestavení účelových geologických map na studijních lokalitách programu vývoje hlubinného úložiště VAO v ČR“, která je součástí závěrečné zprávy „Seznam účelových map 1 : 10 000 potřebných pro výběr lokalit HÚ a popis jejich náplně – Směrnice pro vybrané účelové mapy“ (Procházka et al. 2004).

Jako podklad pro terénní práce byly použity topografické mapy Českého úřadu zeměměřičského a katastrálního s využitím báze geografických dat ČR (ZABAGED) v měřítku 1 : 10 000 vydané v roce 2005. Terénní mapovací práce proběhly v květnu a červnu 2015. Cílem geologického mapování bylo identifikovat horninové typy, charakterizovat je, zjistit jejich vztahy a tvary jednotlivých těles.

Geologická mapa (Příloha 2) byla sestavena výhradně na základě nově provedených terénních prací. Mapování bylo prováděno klasickým pěším túrováním. Vzhledem k odkrytosti byly hranice jednotlivých těles, jejich tvar a lokalizace předpokládaných zlomových struktur určeny převážně na základě terénní dokumentace úlomků nebo bloků (Verner a Bukovská 2015). Průběh horninových těles byl, kromě samotných mapovaných hranic, stanoven na základě orientace regionálních struktur dokumentovaných na mapovaném území i v širším okolí. Také byly použity informace z důlních map ložiska Rožná (archiv GEAM Diamo, s.p.).

Geologická mapa (Příloha 2) je podložena celkem 63 dokumentačními body (Příloha 3), které jsou uloženy v databázi dokumentačních bodů ČGS. Jejich charakteristiky a lokalizace jsou uvedeny Elektronická příloha 12kce v alteračních minerálech

Elektronická příloha 12. Regionální rozdělení území vychází z platného regionálně geologického členění Českého masivu (Chlupáč a Štorch eds. 1992). Názvosloví a klasifikace sedimentárních hornin vychází z práce Kukala (1985), terminologie metamorfovaných hornin vychází z práce Hejtmána (1962). Pokud se uvádí hodnota strukturních měření, je ve stupních a ve spádníkovém tvaru (směr sklonu/směr).

Obecná charakteristika a regionální členění mapovaného území

Mapový list Bukov se nachází na území kraje Vysočina a okresu Žďár nad Sázavou. V severozápadní části území se nachází obec Bukov a ve východní části se nachází rozsáhlý areál těžební jámy státního podniku Diamo. Území patří z hlediska regionálně geografického členění do Česko-moravské soustavy, podsoustavy Českomoravská vrchovina. Západní část území patří do celku Křižanovská vrchovina, podcelku Bítešská vrchovina a okrsku Bobrovská pahorkatina. Východní část území spadá do celku Hornosvratecká vrchovina, podcelku Nedvědicke vrchovina a okrsku Pernštejnská vrchovina (Demek a Mackovčín 2006). Reliéf oblasti je relativně plochý s průměrnou nadmořskou výškou okolo 500 m. n. m. Území listu tvoří především pole, louky a pastviny. V jihozápadní a centrální části území protéká Bukovský potok se dvěma drobnými rybníky.

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

Horniny vyskytující se na mapovaném území patří podle regionálně geologického členění Českého masivu k jednotce strážeckého moldanubika, která je řazená do gfölské skupiny (Tajčmanová et al. 2006). Sedimentární horniny kvartérního stáří jsou řazeny do extraglaciální oblasti, v území morfologických sníženin mají akumulární a na vyvýšeninách pak denudační charakter.

Geologická a petrologická charakteristika

Na mapovaném území vystupují vysoce metamorfované horniny primárně vulkano-sedimentárního komplexu patřící do jednoty strážeckého moldanubika. Vznik protolitu těchto hornin je předpokládán v období neoproterozoika až spodního paleozoika (Košler et al. 2014) a jejich polyfázový metamorfní a deformační vývoj proběhl během svrchního devonu až spodního karbonu v období variské orogeneze (Schulmann et al. 2005, Tajčmanová et al. 2006). Sedimentární horniny kvartérního stáří jsou zastoupeny v omezeném plošném rozsahu i genetickém zastoupení a jejich stratigrafický rozsah spadá do období pleistocénu až holocénu. Celková geologická stavba studovaného území je definována dominantním průběhem kontaktů horninových těles, litologických přechodů metamorfních staveb v převažující orientaci ~SSV–JJZ až ~S–J. V rámci mapovaného území byly dále na základě geologického mapování identifikovány dvě zlomové struktury ~S–J průběhu, jedna zlomová linie průběhu ~JZ–SV a jedna průběhu ~JJZ–SSV průběhu. Tyto zlomové struktury mohou mít v hlubších partiích horninového masivu návaznost na rudonosné zóny (Kříbek a Hájek eds. 2005). Vzhledem k odkrytosti oblasti, které umožňuje hlavně mapování z úlomků, není možné přímo pozorovat kontakty jednotlivých horninových těles ani zlomů. Celková mocnost kvartérních sedimentárních hornin není ověřena.

Předplatformní jednotky Českého masivu: metamorfované horniny strážeckého moldanubika (neoproterozoikum – spodní paleozoikum)

9 Biotitický granulit, granulitová rula s granátem tvoří čočkovitá až protáhlá tělesa ve východní části území. Jedná se o tělesa protažená souhlasně s foliací, která se nacházejí v okolní biotitické, amfibol-biotitické až amfibolické migmatizované pararule. Je to světle šedá drobnozrnná a obvykle páskovaná hornina. Někdy jsou přítomny až 1 mm velké porfyroblasty hypautomorfního granátů. Základní granoblastická hmota je tvořena křemenem, draselným živcem a plagioklasem. Draselný živec někdy obsahuje drobné pertity a oba živce bývají místy postiženy sericitizací. Biotit tvoří drobné lupínky, které rostou souhlasně s nevýraznou foliací případně páskováním těchto hornin.

8 Stromatitický biotitický až sillimanit-biotitický migmatit s přechody do nebulitického typu se vyskytuje ve formě čoček a protáhlých těles v okolních migmatizovaných pararulách, do kterých plynule přechází. Tělesa migmatitů pravděpodobně reprezentují primárně více pelitické části vulkano-sedimentárního komplexu a také rozdíly ve stupni migmatizace. Lze pozorovat plynulé přechody stromatitického migmatitu do nebulitického typu. Jedná se o středně až drobně zrnité horniny s páskovanou texturou. Leukosom převažuje nad melanosomem a je zpravidla jemnozrnný až středně zrnitý. Skládá se z křemene, plagioklasu, draselného živce a biotitu. Melanosom tvoří tenké, několikamilimetrové polohy s vyšším obsahem biotitu. Relativně častý je v těchto horninách výskyt granátu, který tvoří hypautomorfně omezená zrna do velikosti 0,4 mm. Akcesoricky je zastoupen apatit a zirkon.

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

7 Biotitická, amfibol-biotitická až amfibolická migmatitizovaná pararula tvoří hlavní litologickou náplň mapového listu. Kontakty pararul s okolními migmatity jsou neostře. Pararuly jsou jemně až drobně zrnité horniny s lepidoblastickou, místy lepidogranoblastickou strukturou. Skládají se hlavně z biotitu, křemene a plagioklasu. Poměrně často je přítomen také amfibol, který tvoří až několik mm dlouhé hypautomorfní sloupce. Plagioklas je automorfní až hypautomorfní a často oscilačně zonální. Běžně jsou přítomné až několik cm mocné polohy leukosomu, který obsahuje křemen, plagioklas, draselný živec, často biotit a pouze vzácně je přítomen granát. Akcesoricky se vyskytuje titanit, apatit a zirkon.

6 Erlan, erlanová rula na listu vystupuje v podobě několika drobných čoček východně od obce Bukov. Většinou jde o drobně zrnité, někdy páskované horniny. Jednotlivé pásy světle šedé, světle zelené a tmavě zelené barvy o mocnosti od několika mm do několika cm mohou mít odlišné minerální složení. Světle šedé pásy jsou tvořeny hlavně kalcitem. Světle zelené pásy jsou složeny hlavně z hypautomorfního plagioklasu a diopsidu.

5 Amfibolit tvoří protáhlá tělesa, která se nacházejí především v severozápadní a východní části mapovaného území. Na základě pozorovaných úlomků lze předpokládat, že v některých případech mají amfibolity plynulé přechody do amfibolických až amfibol-biotitických pararul. Středně zrnitá hornina se skládá hlavně z amfibolu a plagioklasu. Plagioklas je hypautomorfní místy až xenomorfní, polysynteticky zdvojitý. Amfibol, tvoří hypautomorfně omezené sloupcovité krystaly. Pokud je přítomen křemen, je xenomorfní a undulózně zháší. Někdy se v malém množství vyskytují lupínky biotitu postižené sekundární chloritizací.

Kvartérní pokryv denudačních oblastí Českého masivu: sedimentární horniny (pleistocén – holocén)

4 Hlinitokamenité až kamenitohlinité svahové sedimenty tvoří jedno malé těleso zakrývající spodní část strmějšího svahu v jižní části obce Bukov v zářezu cesty v údolí Bukovského potoka. Jemnou složku v těchto horninách tvoří hnědé až šedohnědé, písčité až jílovitopísčité hlíny, níže až hlinité písky, ojediněle rezavě a bělošedě nepravidelně šmouhované. Klastickou součást (cca 4–40 %) tvoří ostrohranné až poloostrohranné, často zvětralé úlomky migmatitizovaných pararul o velikosti 0,5–7 cm. Pod 1 m mocnou kamenitohlinitou navážkou, na bázi s tenkou vyklíňující se polohou šedé humózní hlíny s kořínky rostlin a větvičkami, leží šedohnědá, prachovitojílovitá až jílovitá svahová hlína, místy s šedými, jílovitými šmouhami, nepravidelně rozmístěnými horninovými úlomky až kameny o velikosti do 15–20 cm a vyklíňujícími se polohami s četnými drobnými úlomky. Odkrytá mocnost svahových sedimentů je 1 m.

3 Splachové hlíny, jíly, písky vyplňují dna občasně protékaných depresí, které vyúsťují do údolní nivy Bukovského potoka nebo na ni podélně navazují. K jejich tvorbě dochází nepravidelným splachováním humózních hlín, zvětralin a svahových sedimentů srážkovou a tavnou vodou z bezprostředního okolí. Litologicky jde o hnědé, proměnlivě humózní, jílovité, prachovité až písčitojílovité hlíny ve spodních polohách s drobnými zvětralými horninovými úlomky do velikosti 5 mm. Lokálně tvoří splachy hnědá až tmavě hnědá, humózní, prachovitojílovitá hlína, hlouběji světle šedý, jemně až silně slídnatý, prachovitý jíl až jíl, nebo zvětralými horninovými úlomky o velikosti do 3 mm. Ojediněle je přítomen hnědý, humózní, hlinitý, středně až hrubě zrnitý písek, přecházející hlouběji pozvolna do slídnatého, jemně až středně zrnitého písku s jílovitou příměsí

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

2 Fluviální hlíny, jíly, písky až štěrky vyplňují údolní nivu říčky Bukovského potoka v jihozápadní části území. Fluviální sedimentární horniny tvoří šedohnědé, písčité až jílovité hlíny, místy s polohami hnědé, středně zrného, hlinitého písku s variabilním obsahem málo zaoblených úlomků pararul. Níže leží šedý, hlinitý, lokálně hlinitopísčité, hrubý až balvanitý štěrk se středně zaoblenými klasty dosahujícími velikosti 15–20 cm, maximálně 50 cm, místy s organickou příměsí. Pod štěrkem následuje šedý, v bazální části naředle modrozelený, zahliněný až hlinitý písek s občasnou organickou příměsí a málo zaoblenými valounky s převahou rul, amfibolitu, místy křemene.

1 Antropogenní uloženiny (navážky) se na zkoumaném území nacházejí v okolí těžní věže v severovýchodní části území. Tvoří je 1,5 m mocné hlinité písky až prachovité hlíny s příměsí horninových úlomků, kamenů a ojediněle i cihel, místy s příměsí organických látek, škváry, stavebního odpadu a asfaltu. Místy jsou skryty pod povrchovou úpravou terénu a není jasné patrný jejich plošný rozsah.

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

2.2 Stanovení petrofyzikálních charakteristik horninového prostředí PVP Bukov

Cílem provedených prací byla dokumentace a zpracování petrofyzikálních dat získaných měření horninových vzorků z prostoru podzemní laboratoře PVP Bukov. Vzorky byly odebrány ve dvou etapách prací. V první etapě prací byla k dispozici řada vzorků jednak z neorientovaných jader vrtů značených S-1, S-2, S-3 a S-4 a jednak z mělkých orientovaných vrtů B1, B2, B3 a B4 (lokalizace viz Elektronická příloha 13). Na tyto práce pak navázaly doplňující odběry orientovaných jader z mělkých vrtaných sond. Tyto následné sondy (vrty) byly označeny jako vzorky B5, B6, B7, B8, B9 a B10 a jádra z nich odebraná byla přednostně určena pro stanovení petrofyzikálních parametrů. Poskytnutý vzorkový materiál byl posléze většinou upravován na vzorky o délce cca 40 mm a o průměru 48 mm, orientovaná jádra byla označena spádníci vzhledem ke své terénní pozici a postupně na nich byla provedena petrofyzikální měření.

Vzorky z vrtů S-1 až S-4 a vzorky z lokalit B1 až B4 byly ve zjednodušeném petrografickém zařazení klasifikovány podle geologické dokumentace pracovníků ČGS (většinou výbrusy) jako ruly, migmatity a amfibolity. Cílem odběrů a zpracování v této etapě bylo především stanovit fyzikální parametry hlavních horninových typů a posoudit jejich variace. Ukázalo se, že z pohledu fyzikálních vlastností jsou horniny příliš nehomogenní a v rámci jednotlivých vzorků, i když petrograficky shodně zařazených, se hodnotově dosti liší. Proto jsme v druhé etapě prací u řady B5 až B10 přistoupili k petrografické klasifikaci na základě fyzikálních parametrů, jednotlivé mělké vrty jsou zpracovány v hloubkových profilech, kde je dobře patrná fyzikální odlišnost jednotlivých vzorků. Toto zpracování mělo za cíl usnadnit výběr vzorků pro navazující metody a interpretaci dat.

2.2.1 Přehled odebraných a zpracovaných vzorků

Celkové počty změřených vzorků jednotlivými petrofyzikálními metodami v obou etapách prací udává Tab. 4, přehled zpracovávaných vzorků a použitých metod v první etapě prací udává Tab. 5. Vysvětlivka použitých kódů – zkratk je uvedena vždy pod tabulkou.

Seznam vzorků a použitých metod z etapy II je uveden v Tab. 6.

Ke každému vzorku z jednotlivých jader byla přiřazena hloubka odběru v cm. Pro zjednodušení zpracování u mělkých vrtů řady B jsou dále v textu vzorky řazeny po 10 cm, i když pozice vzorku v jádře byla většinou posunutá v +/- cm hodnotách výše, nebo hlouběji. Po provedených měření byly vzorky předány odběrateli k využití ve škále dalších metod.

Tab. 4 Použité petrofyzikální metody a počty změřených vzorků

Hustotní parametry	Magnetická susceptibilita	AMS	Rychlosti elastických vln	Radioaktivita	Elektrická konduktivita
125	103	101	18 vzorků a 50 měření	33	18

Tab. 5 Přehled odebraných vzorků a použitých petrofyzikálních metod – vrty série S-1, S-2, S-3, S-4 a B1, B2, B3 a B4

Vzorek (vrt)	Hornina	Kód metody	Metráž (m)	Původ vzorku
S1B	AMF	H,S	28,8	úlomky výbrusového materiálu
S1C	AMF	H,S	37,8	úlomky výbrusového materiálu

		Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov		Evidenční označení:
				ZZ 191/2017
Vzorek (vrt)	Hornina	Kód metody	Metráž (m)	Původ vzorku
S1D	MGM	H,S	41,8	úlomky výbrusového materiálu
S1E	AMF	H,S	74,6	úlomky výbrusového materiálu
S1F	REST	H,S	77,6	úlomky výbrusového materiálu
S1G	MGM	H,S	89,5	úlomky výbrusového materiálu
S1H	RUL	H,S	119,4	úlomky výbrusového materiálu
S1I	RUL	H,S	123,3	úlomky výbrusového materiálu
S1J	MGM	H,S	139,4	úlomky výbrusového materiálu
S2B	PEG	H,S	10,2	úlomky výbrusového materiálu
S2C	AMF	H,S	11,4	úlomky výbrusového materiálu
S2D	ERL	H,S	20,1	úlomky výbrusového materiálu
S2E	RUL	H,S	31,6	úlomky výbrusového materiálu
S2F	MGM	H,S	53,8	úlomky výbrusového materiálu
S2G	RUL	H,S	84,5	úlomky výbrusového materiálu
S2J	MGM	H,S	129	úlomky výbrusového materiálu
S2K	AMF	H,S	133,4	úlomky výbrusového materiálu
S2L	AMF	H,S	135,5	úlomky výbrusového materiálu
S2M	MGM	H,S	135,6	úlomky výbrusového materiálu
S2N	MGM	H,S	142,8	úlomky výbrusového materiálu
S2O	MGM	H,S	149,2	úlomky výbrusového materiálu
S3_02	RUL	H,S,R	15,15	jádro 60mm v blízkosti výbrusu
S3_03	AMF	H,S,R	66,5	jádro 60mm v blízkosti výbrusu
S3_04A	MGM	H,S,R,K,E	79,3	jádro 60mm v blízkosti výbrusu
S3_04B	AMF	H,S,R	51,8	jádro 60mm v blízkosti výbrusu
S3_05	AMF	H,S,R, K, E	63,6	jádro 60mm v blízkosti výbrusu
S3_06	MGM	H,S,R	80,7	jádro 60mm v blízkosti výbrusu
S3_07	AMF	H,S,R	82,7	jádro 60mm v blízkosti výbrusu
S4_01	RUL	H,S,R	10,4	jádro 60mm v blízkosti výbrusu
S4_02	AMF	H,S,R	27,4	jádro 60mm v blízkosti výbrusu
S4_03	AMF	H,S,R,K,E	38	jádro 60mm v blízkosti výbrusu
S4_04	RUL	H,S,R	34,2	jádro 60mm v blízkosti výbrusu
S4_05	RUL	H,S,R	15,35	jádro 60mm v blízkosti výbrusu
S4_06	AMF	H,S,R	23,9	jádro 60mm v blízkosti výbrusu
B1_X1	RUL	H,S,A,E		Makrovzorky
B1_X2	RUL	H,S,A		Makrovzorky
B1_Y1	RUL	H,S,A,E		Makrovzorky
B1_Y2	RUL	H,S,A		Makrovzorky
B2_X1	RUL	H,S,A,E		Makrovzorky

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov			Evidenční označení:
				ZZ 191/2017
Vzorek (vrt)	Hornina	Kód metody	Metráž (m)	Původ vzorku
B2_X2	RUL	H,S,A		Makrovzorky
B2_Y1	RUL	H,S,A,E		Makrovzorky
B2_Y2	RUL	H,S,A		Makrovzorky
B1_1	RUL	H,S,A,K,E		orientovaná jádra 48 mm
B1_2	RUL	H,S,A		orientovaná jádra 48 mm
B1_3	RUL	H,S,A,K,E		orientovaná jádra 48 mm
B1_4	RUL	H,S,A,K,E		orientovaná jádra 48 mm
B1_5	RUL	H,S,A		orientovaná jádra 48 mm
B1_6	RUL	S,A		orientovaná jádra 48 mm
B1_7	RUL	S,A		orientovaná jádra 48 mm
B2_1	AMF	H,S,A,K,E		orientovaná jádra 48 mm
B2_2	AMF	H,S,A,K,E		orientovaná jádra 48 mm
B2_3	AMF	H,S,A,K,E		orientovaná jádra 48 mm
B2_4	AMF	S,A		orientovaná jádra 48 mm
B2_5	AMF	S,A		orientovaná jádra 48 mm
B2_6	AMF	S,A		orientovaná jádra 48 mm
B3_1	MGM	H,S,A,K,E		orientovaná jádra 48 mm
B3_2	MGM	H,S,A		orientovaná jádra 48 mm
B3_3	MGM	H,S,A,K,E		orientovaná jádra 48 mm
B3_4	MGM	H,S,A		orientovaná jádra 48 mm
B3_5	MGM	H,S,A,K,E		orientovaná jádra 48 mm
B3_6	MGM	S,A		orientovaná jádra 48 mm
B3_7	MGM	S,A		orientovaná jádra 48 mm
B4_1	MGM	H,S,A,K,E		orientovaná jádra 48 mm
B4_2	MGM	H,S,A,K,E		orientovaná jádra 48 mm
B4_3	MGM	S,A		orientovaná jádra 48 mm
B4_4	MGM	S,A		orientovaná jádra 48 mm
Legenda: MGM – migmatit, AMF – amfibolit, RUL – rula, PEG – pegmatit, REST – restit, H – hustotní parametry, S – magnetická susceptibilita, A – anizotropie magnetické susceptibility, K – elektrická konduktivita, E – rychlosti elastických vln, R – radioaktivita				

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

Tab. 6 Seznam odebraných vzorků – vrty série B5, B6, B7, B8, B9 a B10, orientace jádra a použité petrofyzikální metody

Pořadové číslo vzorku	Číslo lokality	Pořadové číslo jádra na lokalitě	Číslo vzorku na jádře	Orientace	Kód metody
1	B5	1	1	257/22	H,S,A
2	B5	1	2	257/22	H,S,A
3	B5	1	3	257/22	H,S,A
4	B5	2	1	352/20	H,S,A
5	B5	2	2	352/20	H,S,A
6	B5	2	3	352/20	H,S,A
7	B5	2	4	352/20	H,S,A
8	B5	2	5	352/20	H,S,A
9	B6	1	1	142/8	H,S,A,R
10	B6	1	2	142/8	H,S,A
11	B6	1	3	142/8	H,S,A
12	B6	1	4	142/8	H,S,A
13	B6	1	5	142/8	H,S,A
14	B6	2	1	152/8	H,S,A,R
15	B6	2	2	152/8	H,S,A
16	B6	2	3	152/8	H,S,A
17	B6	2	4	152/8	H,S,A
18	B6	2	5	152/8	H,S,A
19	B6	2	6	152/8	H,S,A
20	B6	3	1	132/7	H,S,A,R
21	B6	3	2	132/7	H,S,A
22	B6	3	3	132/7	H,S,A
23	B6	3	4	132/7	H,S,A
24	B7	1	1	202/36	H,S,A,R
25	B7	1	2	202/36	H,S,A
26	B7	1	3	202/36	H,S,A
27	B7	1	4	202/36	H,S,A
28	B7	1	5	202/36	H,S,A
29	B7	2	1	198/32	H,S,A,R
30	B7	2	2	198/32	H,S,A
31	B7	2	3	198/32	H,S,A
32	B7	2	4	198/32	H,S,A
33	B7	2	5	198/32	H,S,A

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

Pořadové číslo vzorku	Číslo lokality	Pořadové číslo jádra na lokalitě	Číslo vzorku na jádře	Orientace	Kód metody
34	B7	2	6	198/32	H,S,A
35	B8	1	1	152/5	H,S,A,R
36	B8	1	2	152/5	H,S,A
37	B8	1	3	152/5	H,S,A
38	B8	1	4	152/5	H,S,A
39	B8	1	5	152/5	H,S,A
40	B8	1	6	152/5	H,S,A
41	B8	2	1	151/5	H,S,A,R
42	B8	2	2	151/5	H,S,A
43	B8	2	3	151/5	H,S,A
44	B8	2	4	151/5	H,S,A
45	B9	1	1	321/39	H,S,A,R
46	B9	1	2	321/39	H,S,A
47	B9	1	3	321/39	H,S,A
48	B9	1	4	321/39	H,S,A
49	B9	1	5	321/39	H,S,A
50	B9	2	1	314/40	H,S,A,R
51	B9	2	2	314/40	H,S,A
52	B9	2	3	314/40	H,S,A
53	B9	2	4	314/40	H,S,A
54	B9	2	5	314/40	H,S,A
55	B9	2	6	314/40	H,S,A
56	B10	1	1	196/2	H,S,A,R
57	B10	1	2	196/2	H,S,A
58	B10	1	3	196/2	H,S,A
59	B10	1	4	196/2	H,S,A
60	B10	1	5	196/2	H,S,A
61	B10	1	6	196/2	H,S,A
62	B10	2	1	188/2	H,S,A,R
63	B10	2	2	188/2	H,S,A
64	B10	2	3	188/2	H,S,A
65	B10	2	4	188/2	H,S,A
66	B10	2	5	188/2	H,S,A
67	B10	3	1	194/2	H,S,A,R

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov			Evidenční označení:	
				ZZ 191/2017	

Pořadové číslo vzorku	Číslo lokality	Pořadové číslo jádra na lokalitě	Číslo vzorku na jádře	Orientace	Kód metody
68	B10	3	2	194/2	H,S,A
69	B10	3	3	194/2	H,S,A

Legenda: H – hustotní parametry, S – magnetická susceptibilita, A – anizotropie magnetické susceptibilita, R – radioaktivita

2.2.2 Metodika měření

Současné petrofyzikální postupy jsou postaveny především na možnosti provádět veškerá stanovení nedestrukčně na jediném kusu jádra o daném průměru a délce tam, kde to terénní a technické podmínky dovolují. Je tak vyloučen vliv nehomogenity horninového materiálu, kterou lze v geologickém profilu, nebo vrtu (zkoumaném jádru) očekávat. Takto pojatá komplexní metodika je popisována např. ve zprávách Rukavičkové et al. (2011, 2012); Fraňka et al. (2013, 2014); Vondrovic et al. (2013), Hanáka et al. (2010a, 2010b) a Hanáka (2016), nebo Verner a Bukovské (2015) a dalších. Použitá metodika významným způsobem omezuje závislost stanovení jednotlivých parametrů na tvaru a velikosti vzorků a vychází z předpokladu, že je k dispozici jádro vhodného průměru (48 mm), s možností připravit vzorky o délce ca 40 mm.

Použité petrofyzikální metody jsou:

- hustotní parametry – objemová hustota (D_o), mineralogická hustota (D_m), pórovitost (Por),
- magnetická susceptibilita (k), anizotropie magnetické susceptibilita (AMS),
- laboratorní spektrometrie gama – obsahy U, eU(Ra), eTh a K.
- elektrické odporové vlastnosti (R),
- rychlosti elastických vln (V_p a V_s).

Teoretické základy petrofyzikálních metod, které byly pro tuto studii použity, jsou popsány v řadě prací, např. Uhmanna (1962) a Uhmanna et al. (1964); Hroudě (1982); Bartošek et al. (1975, 1980); Bartošek (1977) Kašparec et al. (1988); Kober et al. (1997), nověji pak např. Rukavičková et al. (2011); Franěk (2013, 2014); a zejména Verner a Bukovská et al. (2015). Skupina metod zabývající se měřením rychlostí elastických vln, tak jak byla použita v této studii, je podrobně popsána v ISRM (1978) nebo v Zavoral et al. (1987). Na podrobný popis metodik odkazujeme ve výše uvedených zprávách, zde popisujeme jen základní principy, více je rozveden popis výpočtu odvozených parametrů u rychlostí elastických vln.

Na měření vzorků a interpretaci spolupracovali prof. RNDr. F. Hroudě, CSc. a RNDr. M. Chlupáčová, CSc. (Agico s.r.o. Brno – měření magnetické anizotropie), Ing. I. Kašparec a Mgr. J. Žižka (Georadis s.r.o. Brno – měření radioaktivity a rezistivity), RNDr. K. Sosna, Ph.D. (Arcadis CZ a.s. Praha – měření elastických vlastností) a RNDr. P. Ondra (zpracování dat). Za jejich pomoc jim velmi děkujeme.

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

Hustotní parametry (D_o , D_m , P_o)

Hustotní parametry jsou stanovovány dnes již klasickou a mnohokrát ověřovanou metodou „trojího vážení“. Metodu začátkem šedesátých let minulého století zavedl do geofyzikální praxe J. Uhmanna (1962), a její principy se používají s jistými úpravami a přesnější dostupnou technikou stále. V současné době platí pro stanovení „hustotních parametrů“ i technická norma ČSN EN 1936.

Metoda spočívá ve vážení suchého vzorku na vzduchu, v měrné kapalině po evakuaci a na vzduchu s póry naplněnými měrnou kapalinou. Tím zjistíme objemovou i mineralogickou hustotu zároveň s pórovitostí.

Výsledkem hustotních měření je:

Objemová hustota (D_o) představuje hustotu vysušené horniny včetně pórů.

Mineralogická hustota (D_m) udává hustotu pevné fáze horniny bez pórů s jejich výplní.

U objemové a mineralogické hustoty činí chyba stanovení $\pm 0,003 \text{ g.cm}^{-3}$ a u pórovitosti $\pm 0,2 \%$. Hodnoty D_o a D_m jsou svázány matematickými vztahy s dalšími charakteristikami.

Pórovitost (P_o) stanovená touto metodou udává poměr komunikujících pórů a rozumíme jí tzv. otevřenou pórovitost. Ta je v petrofyzikálním pojetí charakterizována jako pórovitost efektivní a je v matematickém vztahu s hustotními parametry.

Magnetická susceptibilita (k), anizotropie magnetické susceptibility (AMS)

Stanovení AMS poskytuje údaje o magnetické stavbě horniny, určí hlavní plochy magnetických foliací a směr magnetické lineace. Principy a využití metod magnetické anizotropie jsou popsány v knize Tarlinga a Hroudy (1993).

Magnetická susceptibilita (k) je tenzor druhého řádu, určující relaci mezi magnetickým polem a indukovanou magnetizací podle rovnice (2.2.1)

$$\mathbf{M}_i = k\mathbf{H} \quad (2.2.1)$$

kde $\mathbf{M}_i$ je indukovaná magnetizace (A.m^{-1}) a $\mathbf{H}$ je intenzita magnetického pole (A.m^{-1}), přičemž veličiny $\mathbf{M}_i$ a $\mathbf{H}$ jsou vektory. Susceptibilita je veličina bezrozměrná. Její číselná hodnota podle ČSN ISO 80000 – 2 (011300) může být udávána pouze v soustavě SI.

AMS orientovaných vzorků upravených do tvaru válce o průměru 48 mm a výšce 40 mm se měří manuální metodou vypracovanou pro velké válce v 15 nezávislých směrech odpovídajících rotativnímu měřicímu designu. V našem případě byla AMS měřena pomocí střídavého můstku MFK1-FA (Pokorný et al. 2011) a vyhodnocena pomocí programů SAFYRBIG a ANISOFT (Chadima a Jelínek 2008).

Pozn.: Dále v textu, tabulkách a grafech je označována střední magnetická susceptibilita jako K_m , objemová magnetická susceptibilita jako $SUSC$. Data jsou hodnotově blízká a neovlivňují statistický výpočet ve zpracování.

Přirozená radioaktivita hornin (obsahy eTh , U , $eU(Ra)$ a K)

Radioaktivita hornin (eTh , $eU(Ra)$, K) představuje tzv. látkové parametry horniny a laboratorní spektrometrie gama poskytuje údaje o obsazích přirozených radioaktivních prvků, včetně nerovnováhy uranu a radia. Laboratorní scintilační spektrometrie vzorků hornin je v klasické podobě založena na srovnávacím měření drcených a homogenizovaných

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

vzorků hornin. Ty jsou porovnávány s referenčními materiály (RG set IAEA, Vídeň), které byly měřeny za stejných podmínek jako vzorky hornin – podobné navážky, měřicí pouzdro, atd.

Při měření radioaktivních vlastností na vrtných jádrech se tvar vzorku liší od standardní geometrie měření v pouzdrech o objemu 270 ml. Většina jader má průměr cca 48 mm a pro další petrofyzikální metody jsou upravovány na délku 40 mm. Takto upravená jádra jsou velmi rozdílná od referenčních materiálů distribuovaných IAEA Vídeň, když hmotnost upraveného vzorku jádra je kolem 180 g. Proto je nutné při měření válcových vzorků provést geometrickou opravu na základě speciálně připravených etalonů a postup měření je časově náročnější, než u běžné metodiky. V souladu s mezinárodní nomenklaturou jsou obsahy označovány jako ekvivalentní – eTh, eU (Ra). Při navážce (cca 180 g) je za těchto podmínek a v materiálu s nízkou radioaktivitou možno reálně stanovit s relativní chybou asi 25 % tyto minimální obsahy eTh, U, eU (Ra) a K – platí pro vzorek (jádro) o průměru 48 mm a výšce 40 mm, navážka 170–180 g (viz Tab. 7).

Tab. 7 Citlivost metody stanovení přirozeně radioaktivních prvků

Stanovovaná složka		Citlivost stanovení obsahu
eTh	(²³² Th)	0,8 ppm
U	(²³⁸ U)	1,8 ppm
eU	(²²⁶ Ra)	0,5 ppm
K	(⁴⁰ K)	0,25 %

Metodu upravil a na podkladě mezinárodních standardů ověřil a používá Ing. Kašparec – GEORADIS s.r.o. Brno. Měření probíhá na laboratorním spektrometru RT–50, výrobce GEORADIS s.r.o., Brno (je typově schválen ČMI, IIZ Praha a je používán pro měření průmyslových nebo geologických vzorků v řadě zemí).

Elektrické vlastnosti

Elektrická rezistivita (konduktivita nebo také vodivost) hornin je směrový parametr, který významně koreluje s pórovitostí a má vztah jak k látkovým, tak i strukturním parametrům hornin. Jednotkou rezistivity R je ohm.m. Převrácenou hodnotou rezistivity je konduktivita, udávaná v $S.m^{-1}$. Rezistivita závisí na frekvenci elektrického proudu v celém frekvenčním rozsahu používaném při terénních i laboratorních měřeních (0–17 kHz) a mění se v rozmezí několika řádů. Podrobnější informace o rezistivitě a ostatních elektrických vlastnostech obsahuje např. stať J. Kněže (str. 77–108 v Kober et al. 1997), z novějších lze uvést např. studijní texty Englera (2012). Samotné měření na LRC můstku umožňuje určit reálnou a imaginární část impedance, kdy pak s pomocí algebraických manipulátorů lze řešit vztahy R k ostatním závislým parametrům. Výsledná hodnota rezistivity je pak frekvenčně závislá. Metodika vychází z poznatků o těchto závislostech z prací Olhoefa (1981), nebo Laštovičkové a Bochníčka (1992). Vzorky je nutno před měřením vysušit a čela vzorků plazmaticky napařit mědí (viz. Obr. 65). Metodika je blíže specifikována v práci Vernerá a Bukovské (2015).

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017



Obr. 65 Vzorky na měření rezistivity (elektrické konduktivity) s plazmaticky (Cu) upravenými čely jader

Metodika ultrazvukového prozařování

Rychlosti elastických vln stanovené metodou ultrazvukového prozařování představují směrový parametr, který významně koreluje s pórovitostí a má vztah jak k látkovým, tak i strukturním parametrům hornin.

Metodika ultrazvukového prozařování je podrobně popsána v ISRM (1978) nebo v Zavoral et al. (1987). Jako zdroj ultrazvukových pulzů byl použit generátor a zesilovač firmy Olympus tovární značky 5072PR. K prozařování P-vlnami byla použita dvojice piezosnímačů V 103, pro prozařování S-vlnami byly použity snímače V 153 od téže firmy.

Zpoždění signálu bylo vyhodnocováno na čtyřkanálovém digitálním osciloskopu DSO7014A od firmy AGILENT se 100 MHz vzorkováním (Brož et al. 2009). Vybraná tělesa byla podrobena testování polarizace S-vln. Podstatou měření polarizace je pootočení piezosnímačů umístěných na vzorku horniny o 90°. Vypočtené hodnoty P a S vln pak umožňují výpočet dynamického Youngova modulu pružnosti E_d , dynamického střížného modulu G_d a Poissonova čísla ν_d .

Rychlost P-vln v_p a S- vln v_s byla vyhodnocena podle vztahů (2.2.2) a (2.2.3),

$$v_p = \frac{l}{t_p} \quad (2.2.2)$$

$$v_s = \frac{l}{t_s} \quad (2.2.3)$$

kde l odpovídá nejkratšímu rozměru vzorku mezi piezosnímači a t_p resp. t_s odpovídá času příchodu podélné resp. příčné vlny.

Dynamický Youngův modul pružnosti E_d , dynamický střížný modul G_d a Poissonovo číslo ν_d byly vyhodnoceny podle vztahů (2.2.4, 2.2.5 a 2.2.6), (Zisman W. A. 1933),

$$E_d = \frac{\rho \cdot v_s^2 \cdot (3 \cdot v_p^2 - 4 \cdot v_s^2)}{v_p^2 - v_s^2} \quad (2.2.4)$$

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

$$G_d = \rho \cdot v_s^2 \quad (2.2.5)$$

$$v_d = \frac{v_p^2 - 2 \cdot v_s^2}{2 \cdot (v_p^2 - v_s^2)} \quad (2.2.6)$$

kde ρ odpovídá objemové hmotnosti vzorku, v_p odpovídá rychlosti podélných vln a v_s odpovídá rychlosti příčných vln.

2.2.3 Výsledky měření

Ve zpracování rozlišujeme v podstatě soubory účelově zaměřených vrtů S-1 až S-4, orientované mělké vrty B1 až B4 a mělké orientované návrty řady B5 až B10. Zdůvodnění tohoto rozdělení je v úvodní kapitole 2.2.1.

Hustotní parametry a magnetická susceptibilita

Soubor vzorků z vrtů S1, S2, S3, S4 a B1, B2, B3 a B4, B5, B6, B7, B8, B9 a B10

V tomto popisu fyzikálních vlastností hodnotíme podrobněji parametry hustot, pórovitostí a magnetických susceptibilit, které byly stanoveny na vzorcích prezentovaných v Tab. 5 a Tab. 6. Především na základě výbrusového materiálu bylo možné mezi vzorky z vrtů rozlišit tři základní petrografické typy a to pararuly (v tabulkách kód RUL), migmatity (MGM) a amfibolity (AMF). Kódy byly převzaty podle ekvivalentních typů hornin z petrofyzikální databáze (např. Dědáček et al. 2003), jejímž správcem je ČGS – GEOFOND Praha, tak aby bylo snáze umožněno eventuální posouzení s archivními daty.

Pro každý takto vymezený petrografický typ byly generovány histogramy a vypočteny statistické hodnoty. Výčet měřených hustotních parametrů, pórovitostí a magnetických susceptibilit pro řadu S-1 až S-4 a B1 až B4 udává Tab. 8.

Jádra z mělkých orientovaných vrtů řady B5 až B10 byla určena pro navazující specializované práce, proto vyhodnocení hustotních měření a magnetické susceptibility probíhalo odlišným způsobem tak, aby každý vzorek v návrtnu bylo možné přehledně fyzikálně klasifikovat.

Ukázalo se, že mineralogické hustoty mají velkou variabilitu hodnot v rámci jednotlivých návrtnů, to znamená, že na relativně krátkých úsecích jádra ca 50 cm dlouhého dochází k významným látkovým změnám. Z těchto důvodů jsou jednotlivé vzorky v jádrech znázorňovány v hloubkových profilech, kde je odlišnost jednotlivých vzorků dobře patrná. Vzorky pak posuzujeme petrologicky z pohledu petrofyzikálních dat v rozsahu hornin rula – migmatit – amfibolit.

Vycházíme z předpokladu, že pro každý vzorek z návrtnu určený pro petrofyzikální měření nelze vytvořit výbrus a že mineralogická hustota jako objektivní látkový parametr dobře indikuje měnící se poměry minerálních součástí a to zejména v migmatitech (viz modelový výpočet mineralogické hustoty pro migmatity v Tab. 23). Je zřejmé, že měření navazujících

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

metod prováděná na látkově odlišných vzorcích by mohla přinést zavádějící výsledky. V Tab. 9 až Tab. 15 jsou pak uvedena data pro řadu B5 až B10.

Tab. 8 Hustotní parametry, pórovitost a magnetická susceptibilita – vrty S-1 až S-4 a B1 až B4

Vzorek	Hornina	Metráž	Objemová hustota (Do)	Mineralogická hustota (Dm)	Pórovitost (Por)	Magnetická susceptibilita (SUSC)
(vrt)		(m)	(g.cm ⁻³)	(g.cm ⁻³)	(%)	(10 ⁻⁶ J.SI)
S1B	AMF	28,8	2,912	2,927	0,51	1300,06
S1C	AMF	37,8	2,651	2,708	2,11	751,15
S1D	MGM	41,8	2,606	2,637	1,17	85,03
S1E	AMF	74,6	2,966	3,003	1,24	1219,86
S1F	REST	77,6	2,634	2,782	5,34	419,38
S1G	MGM	89,5	2,743	2,753	0,34	1212,47
S1H	RUL	119,4	2,947	2,991	1,47	2479,52
S1I	RUL	123,3	2,855	3,003	4,92	1584,04
S1J	MGM	139,4	2,701	2,713	0,45	236,33
S2B	PEG	10,2	2,592	2,672	2,98	62,92
S2C	AMF	11,4	2,908	2,932	0,80	696,59
S2D	ERL	20,1	2,921	3,016	3,13	513,41
S2E	RUL	31,6	2,837	2,922	2,90	790,11
S2F	MGM	53,8	2,748	2,860	3,89	695,45
S2G	RUL	84,5	2,838	2,896	2,00	966,80
S2J	MGM	129	2,597	2,664	2,52	182,95
S2K	AMF	133,4	3,038	3,044	0,20	2344,04
S2L	AMF	135,5	3,056	3,062	0,19	3437,47
S2M	MGM	135,6	2,760	2,778	0,63	576,27
S2N	MGM	142,8	2,712	2,717	0,19	714,25
S2O	MGM	149,2	2,625	2,646	0,77	89,96
S3_02	RUL	15,15	2,803	2,809	0,23	342,8
S3_03	AMF	66,5	2,693	2,788	3,41	639,1
S3_04A	MGM	79,3	2,662	2,720	2,15	283,2
S3_04B*	AMF?	80,7	2,725	2,737	0,43	787,9
S3_05	AMF	82,7	2,963	2,968	0,15	7575
S3_06	AMF	51,8	2,937	2,950	0,42	663,4
S3_07	AMF	63,6	2,902	2,905	0,10	643,8
S4_01	RUL	10,4	2,740	2,748	0,29	290,9
S4_02	AMF	27,4	2,912	2,916	0,15	525
S4_04	AMF	34,2	2,847	2,866	0,63	471,4
S4_05	RUL	15,35	2,931	2,942	0,38	1158
S4_06	RUL	23,9	2,750	2,770	0,71	347,8
S4_03	AMF	38	2,940	2,966	0,89	504,3
B1_X1	RUL	X1	2,801	2,808	0,22	862,3
B1_X2	RUL	X2	2,806	2,811	0,20	679,6
B1_Y1	RUL	Y1	2,821	2,825	0,15	639,6

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

Vzorek	Hornina	Metráž	Objemová hustota (Do)	Mineralogická hustota (Dm)	Pórovitost (Por)	Magnetická susceptibilita (SUSC)
(vrt)		(m)	(g.cm ⁻³)	(g.cm ⁻³)	(%)	(10 ⁻⁶ J.SI)
B1_Y2	RUL	Y2	2,805	2,810	0,18	549,8
B2_X1	RUL	X1	2,816	2,819	0,10	499,7
B2_X2	RUL	X2	2,810	2,813	0,11	476,3
B2_Y1	RUL	Y1	2,819	2,823	0,14	478,4
B2_Y2	RUL	Y2	2,814	2,822	0,29	531,5
B1_1	RUL	0,05	2,829	2,832	0,10	1080
B1_2	RUL	0,1	2,904	2,907	0,10	573,4
B1_3	RUL	0,15	2,909	2,914	0,18	894,1
B1_4	RUL	0,2	2,817	2,823	0,22	1374
B1_5	RUL	0,25	NS			660,6
B1_6	RUL	0,3	NS			571
B1_7	RUL	0,35	NS			
B2_1	AMF	0,05	2,906	2,911	0,17	4477
B2_2	AMF	0,1	2,938	2,942	0,14	8072
B2_3	AMF	0,15	2,965	2,968	0,12	9980
B2_4	AMF	0,2	NS			7820
B2_5	AMF	0,25	NS			5743
B2_6	AMF	0,3	NS			9065
B3_1	MGM	0,05	2,712	2,725	0,49	255,8
B3_2	MGM	0,1	2,722	2,732	0,40	249,6
B3_3	MGM	0,15	2,720	2,726	0,20	272,1
B3_4	MGM	0,2	2,717	2,726	0,30	241,2
B3_5	MGM	0,25	2,711	2,725	0,52	268,4
B3_6	MGM	0,3	NS			243,9
B3_7	MGM	0,3	NS			254,8
B4_1	MGM	0,05	2,726	2,740	0,50	301,5
B4_2	MGM	0,1	2,703	2,709	0,21	200,4
B4_3	MGM	0,15	NS			345,1
B4_4	MGM	0,2	NS			308,2

Legenda: MGM –migmatit, AMF – amfibolit, RUL – rula, PEG – pegmatit, REST – restit, NS – nebylo možno provést měření hustotních parametrů (lepené vzorky)

Pozn.: Vzorek S3 – 4B neodpovídá fyzikálně amfibolitům, ve statistikách s ním nebylo počítáno

Skupina vzorků z vrtů S1, S2, S3, S4

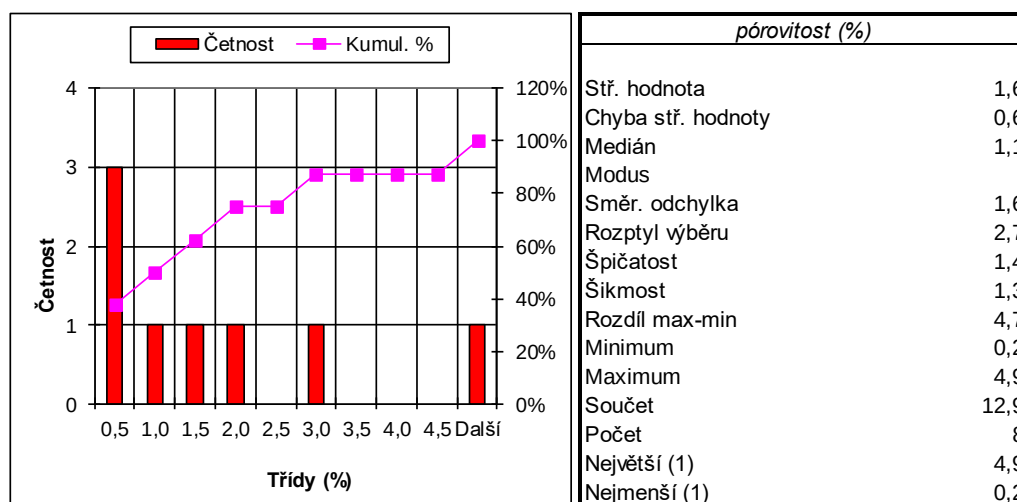
Ruly, pararuly (RUL)

Pórovitost (Por, Obr. 66) Větší část rozdělení se nalézají v rozmezí 0,5–2 %; maximum naměřené hodnoty pak dosahuje 4,9 %. U tohoto měření jde patrně o vzorek odebraný z partie postižené alterací. Vzorky z vrtů, které byly odebrány hluboko pod povrchem, tedy mimo dosah exogenních činitelů, mohou mít tedy relativně zvýšenou Por (velikosti několika procent).

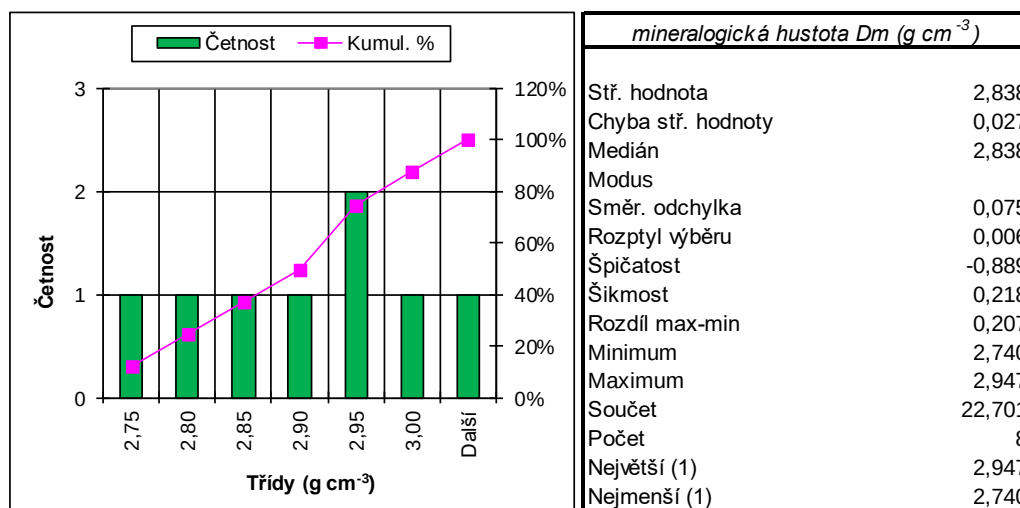
 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

U mineralogické hustoty (Dm, Obr. 67) se naměřené hodnoty pohybují v relativně širokém rozmezí 2,77 až 3,00 g.cm⁻³. Tato variabilita bezprostředně odráží změny v modálním složení takto petrograficky zařazených vzorků, které lokálně kolísá.

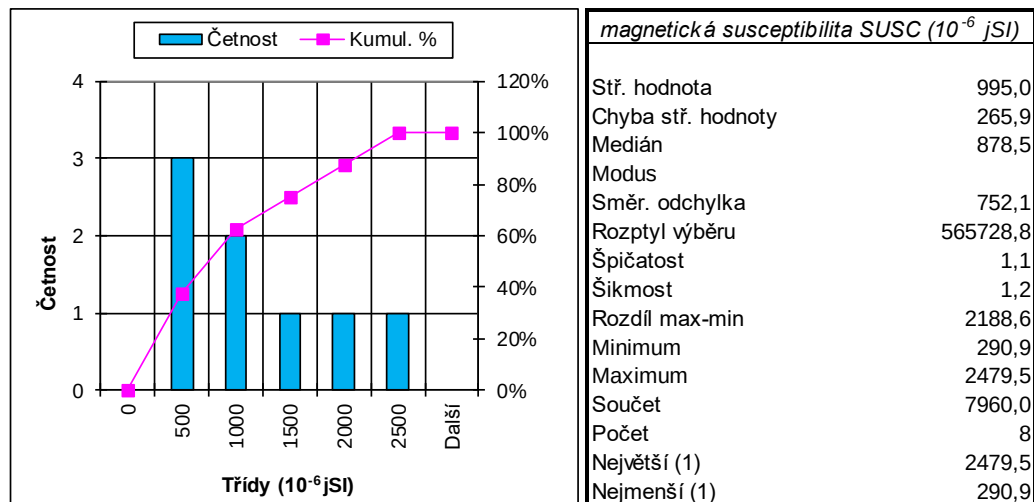
Magnetická susceptibilita (SUSC, Obr. 68) kolísá v rozmezí řádů 10⁻⁴ až 10⁻³ jednotek SI. Kolísání hodnot je patrně hlavně zapříčiněno úzce lokálními změnami zastoupení rudních feromagnetických minerálů.



Obr. 66 Pararuly (RUL), vrty S-1,S-2,S-3,S-4 – pórovitost, histogram a statistické parametry



Obr. 67 Pararuly (RUL), vrty S-1,S-2,S-3,S-4 – mineralogická hustota, histogram a statistické parametry



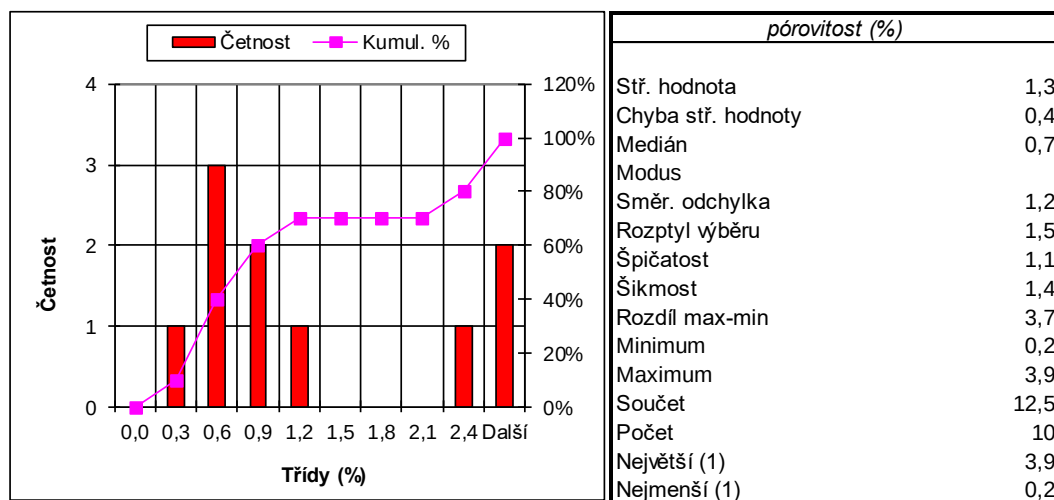
Obr. 68 Pararuly (RUL), vrtý S-1,S-2,S-3,S-4 – magnetická susceptibilita, histogram a statistické parametry

Migmatity (MGM)

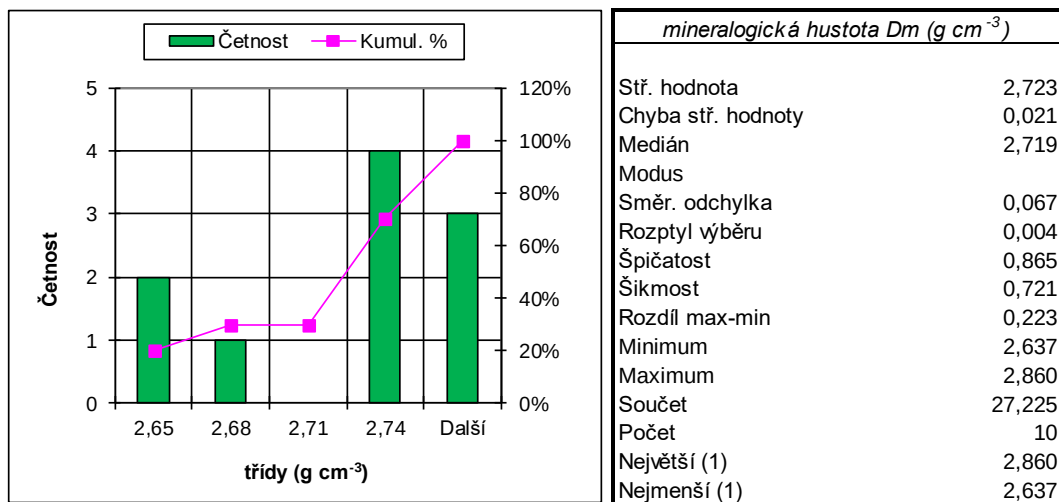
Pórovitost (Por, Obr. 69). Zjištěná měření lze zhruba rozdělit do dvou skupin: <1,2 % a >2,5 %.

Mineralogická hustota (Dm, Obr. 70) kolísá v relativně širokém rozmezí 2,637 - 2,860 g.cm⁻³. V případě tohoto typu hornin je variabilita Dm patrně zapříčiněna kolísáním zastoupení substrát – metatekt v jednotlivých měřených vzorcích. Leukosom je nepoměrně lehčí (většinou <2,65 g.cm⁻³) než substrát (pararuly), jejichž Dm obvykle bývá >2,70 g.cm⁻³.

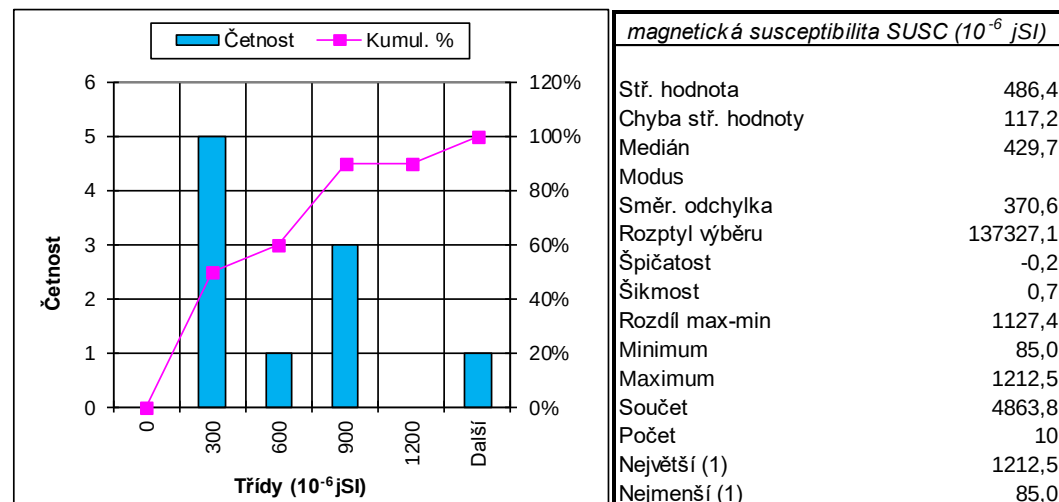
Magnetická susceptibilita (SUSC, Obr. 71), její medián je v případě migmatitů menší než u rul. SUSC metatektu (světlá, křemen–živcová složka migmatitů) je obvykle až řádově nižší než u substrátu (též paleosom, metastar, restit), který obsahuje více tmavých součástí, většinou biotitu. Rozmezí naměřených hodnot je zde 85⁻⁶ až 1212⁻⁶ j. SI.



Obr. 69 Migmatity (MGM), vrtý S-1,S-2,S-3,S-4 – pórovitost, histogram a statistické parametry



Obr. 70 Migmatity (MGM), vrty S-1,S-2,S-3,S-4 – mineralogická hustota, histogram a statistické parametry



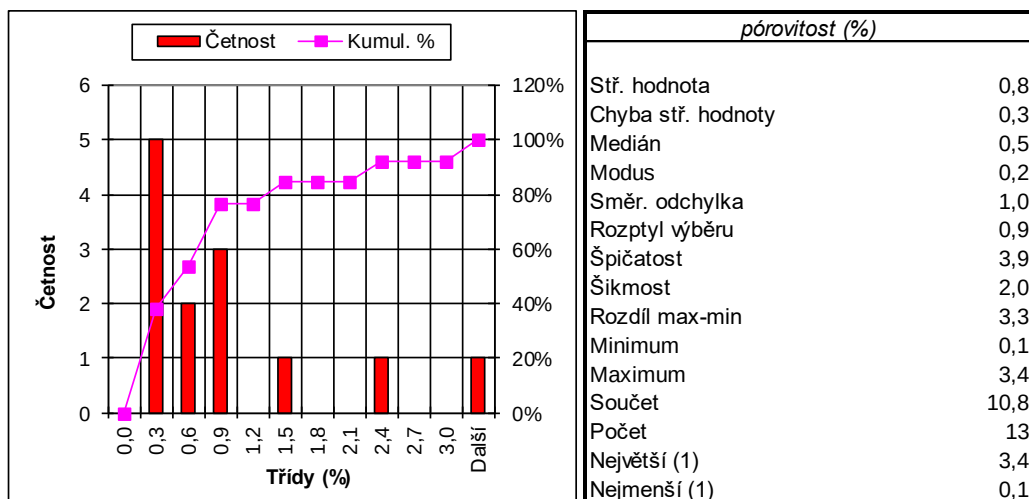
Obr. 71 Migmatity (MGM), vrty S-1,S-2,S-3,S-4 – magnetická susceptibilita, histogram a statistické parametry

Amfibolity (AMF)

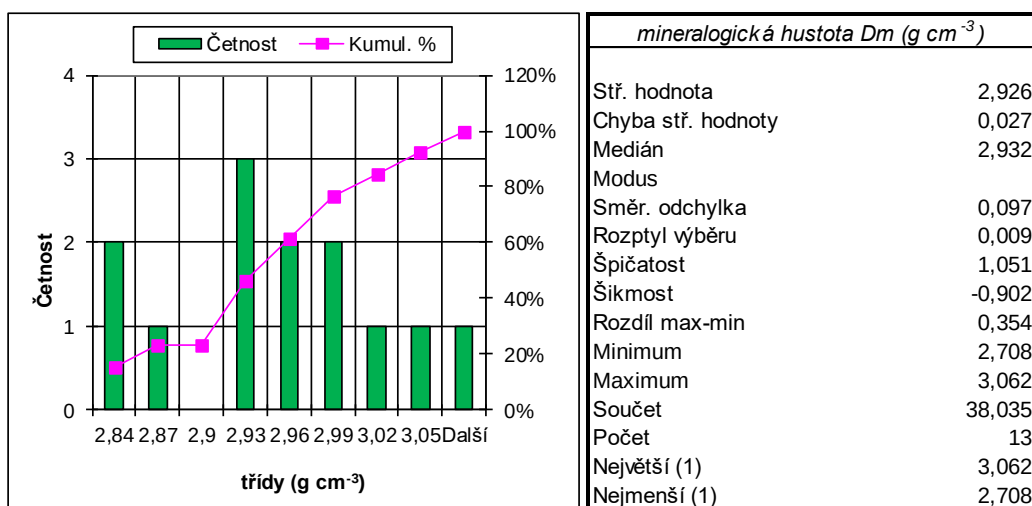
Pórovitost (Por, Obr. 72). Naměřené hodnoty se pohybují v rozmezí 0,1 až 3,4 %. Rozdělení je asymetrické (modus = hodnota, která má nejvyšší četnost = 0,2 %, medián 0,5 %).

Mineralogická hustota (Dm, Obr. 73) kolísá v rozmezí 2,7 až 3,1 g.cm⁻³. Relativně nízké hodnoty (<2,9 g.cm⁻³) jsou patrně způsobeny zvýšeným obsahem metatektu.

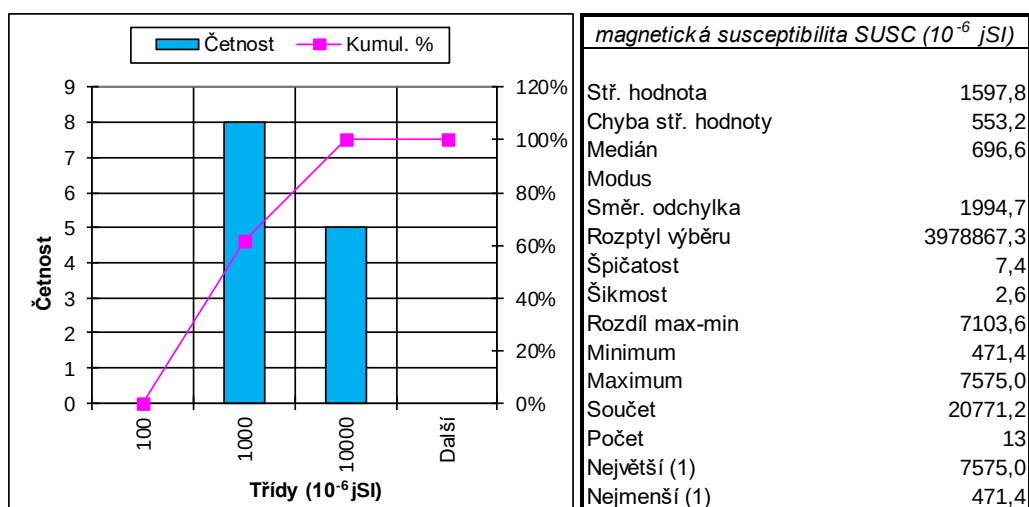
Magnetická suseptibilita (SUSC, Obr. 74). Široké rozmezí naměřených hodnot 471*10⁻⁶ až 7575*10⁻⁶ jednotek SI je patrně opět způsobeno měnícím se poměrem substrát – metatekt v měřeném vzorku.



Obr. 72 Amfibolity (AMF), vrtý S-1,S-2,S-3,S-4 – pórovitost, histogram a statistické parametry



Obr. 73 Amfibolity (AMF), vrtý S-1,S-2,S-3,S-4 – mineralogická hustota, histogram a statistické parametry



 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

Obr. 74 Amfibolity (AMF), vrty S-1,S-2,S-3,S-4 – magnetická susceptibilita, histogram a statistické parametry

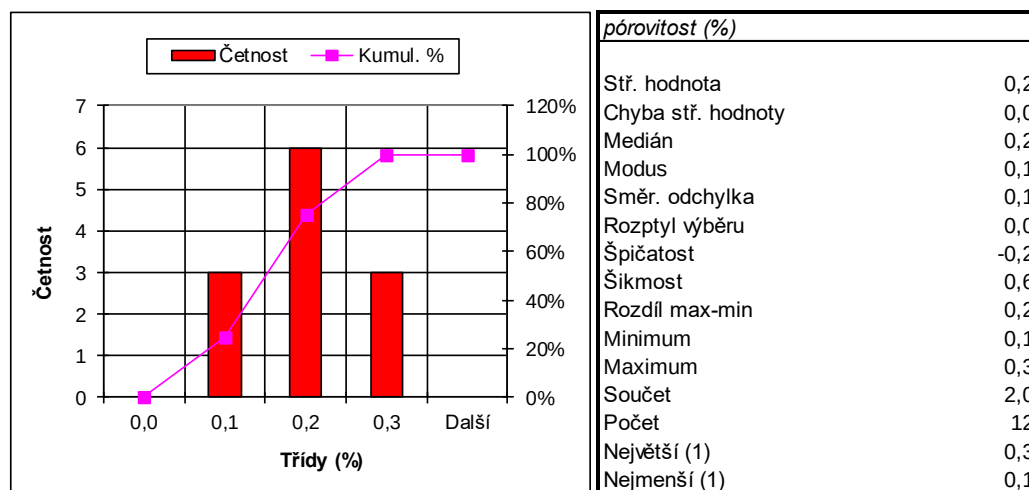
Skupina vzorků z vrtů B1, B2, B3, B4, vzorky B1X, B1Y, B2X a B2Y

Ruly, pararuly (RUL)

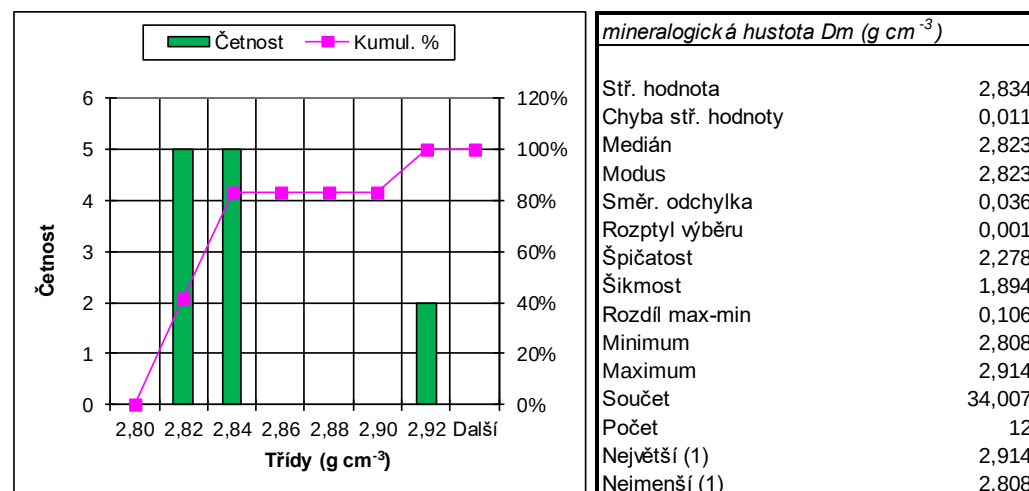
Pórovitost (Por, Obr. 75). Rozdíl minima a maxima naměřených hodnot (min= 0,1; max=0,3; AM=0,2; SD = 0,1 %) je zde relativně velmi nízký, nasvědčuje na stejnorodost výběru vzorků z hlediska Por.

Mineralogická hustota (Dm, Obr. 76). Rozdíl minimálních a maximálních naměřených hodnot je zde ovlivněn dvěma měřeními s hodnotami 2,907 a 2,914 g.cm⁻³. Ostatní hodnoty (při N=12) se pohybují v rozmezí 2,808 – 2,832 g.cm⁻³, tedy v relativně velmi úzkém rozmezí.

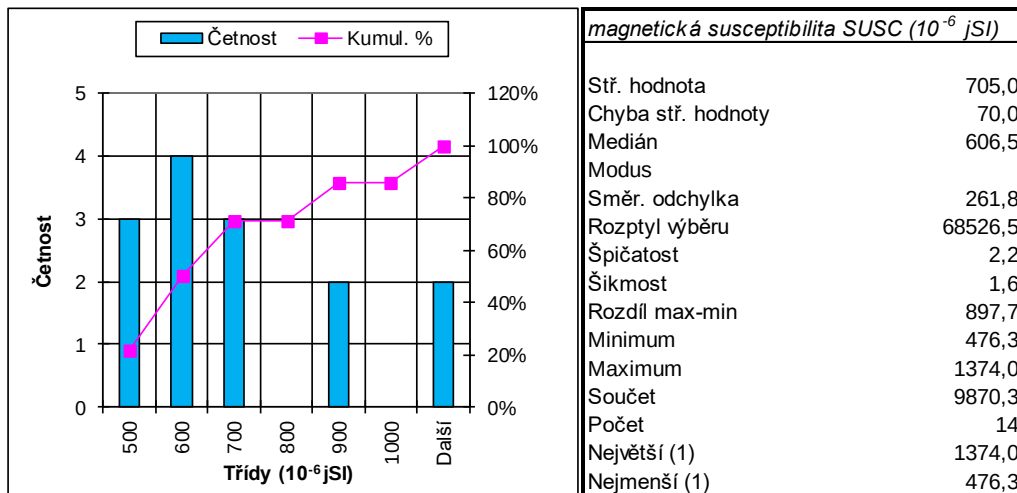
Magnetická susceptibilita (SUSC, Obr. 77). Počet měřených vzorků N=14. Rozdělení a velikost hodnot jsou podobné jako u souboru vzorků z vrtů řady S-1 až S-4.



Obr. 75 Ruly (RUL), vzorky B1, B2, B3 a B4 – pórovitost, histogram a statistické parametry



Obr. 76 Ruly (RUL), vzorky B1, B2, B3 a B4 – mineralogická hustota, histogram a statistické parametry



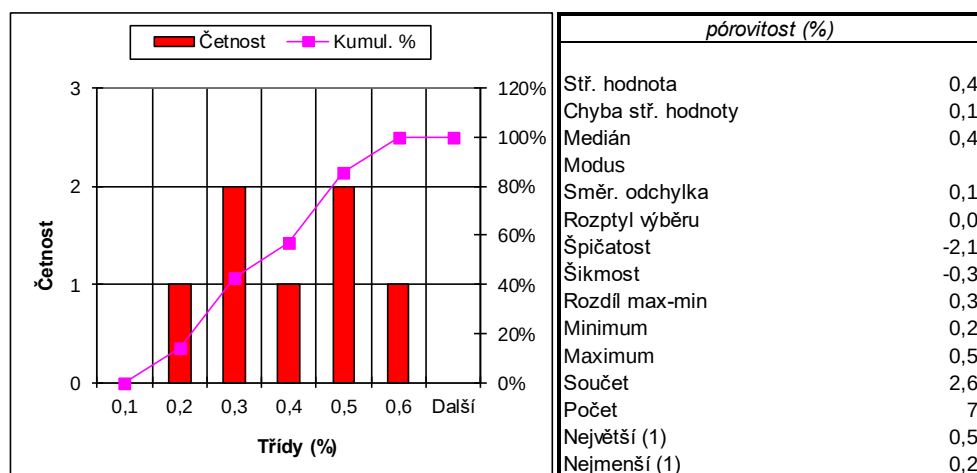
Obr. 77 Ruly (RUL), vzorky B1, B2, B3 a B4 – magnetická susceptibilita, histogram a statistické parametry

Migmatity (MGM)

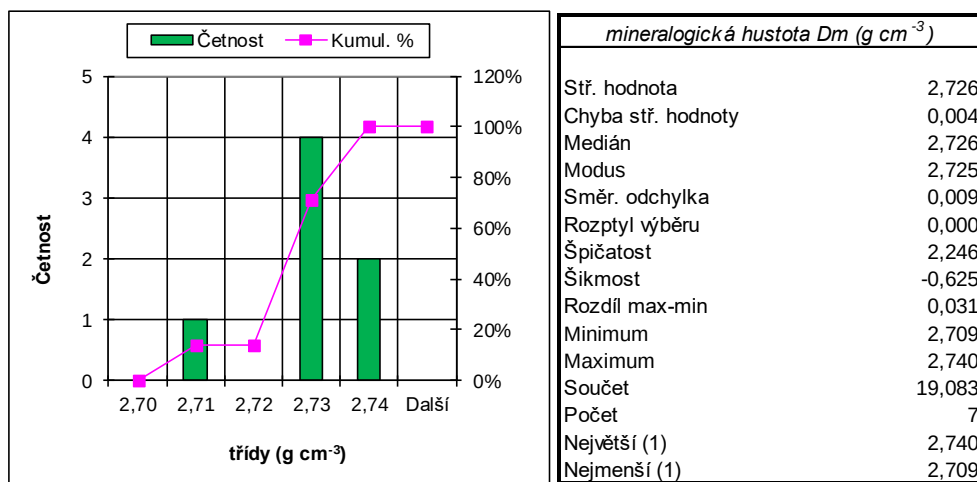
Pórovitost (Por, Obr. 78) – její hodnoty lze označit za velmi nízké (AM=0,4 %, rozsah naměřených hodnot 0,2 až 0,6 %). Nízké velikosti jsou v souladu s nízkými hodnotami Por ostatních typů hornin z vrtů skupiny B.

Mineralogická hustota (Dm, Obr. 79). Hodnota AM = 2,73 g.cm⁻³ je nejnižší ve srovnání s rulami a amfibolity. To je podmíněno přítomností „lehké“ granitické složky (metatektu). Rozsah naměřených hodnot je 2,71 – 2,74 g.cm⁻³, hodnoty se tedy pohybují v relativně úzkém rozmezí.

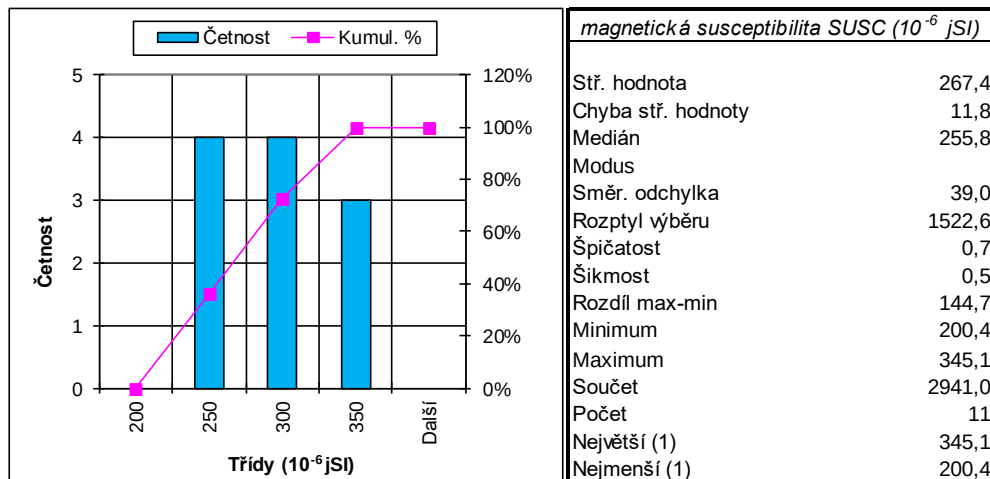
Magnetická susceptibilita (SUSC, Obr. 80) kolísá v rozmezí 200 až 345 $\cdot 10^{-6}$ SI. Tento rozsah je možno považovat za poměrně nízký; zastoupení rudních feromagnetik se v jednotlivých vzorcích mění jen nepatrně, soubor vzorků je z tohoto hlediska homogenní.



Obr. 78 Migmatity (MGM), vzorky B1, B2, B3 a B4 – pórovitost, histogram a statistické parametry



Obr. 79 Migmatity (MGM), vzorky B1, B2, B3 a B4 – mineralogická hustota, histogram a statistické parametry

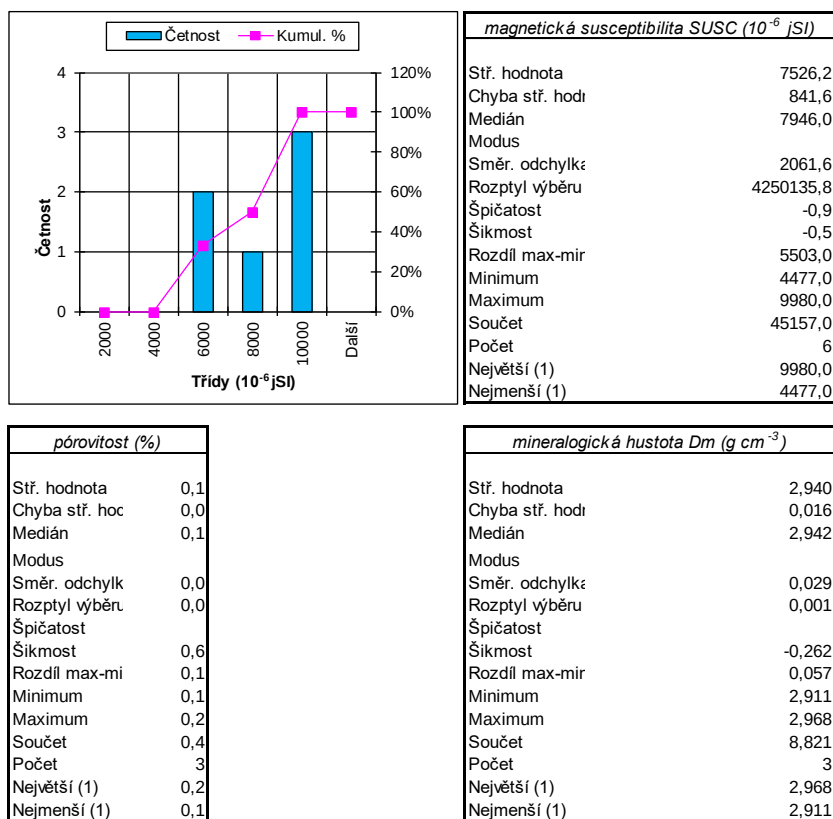


Obr. 80 Migmatity (MGM), vzorky B1, B2, B3 a B4 – magnetická susceptibilita, histogram a statistické parametry

Amfibolity (AMF)

Pórovitost (Por, Obr. 81). U těchto hornin byla Por stanovena pouze u 3 vzorků, nelze tedy vykreslit histogram. Naměřené hodnoty se pohybují v řádu desetin %. Mineralogická hustota (Dm, Obr. 81). U 3 vzorků se naměřené hodnoty pohybují v rozmezí 2,91 – 2,97 g.cm⁻³. Jejich rozptyl je nižší než v případě souboru vzorků z vrstů S.

Magnetická susceptibilita (SUSC, Obr. 81). Naměřené hodnoty (zde N=6) mají rozptyl relativně nízký, pohybují se v rozmezí 1000 – 10000 *10⁻⁶ J. SI.



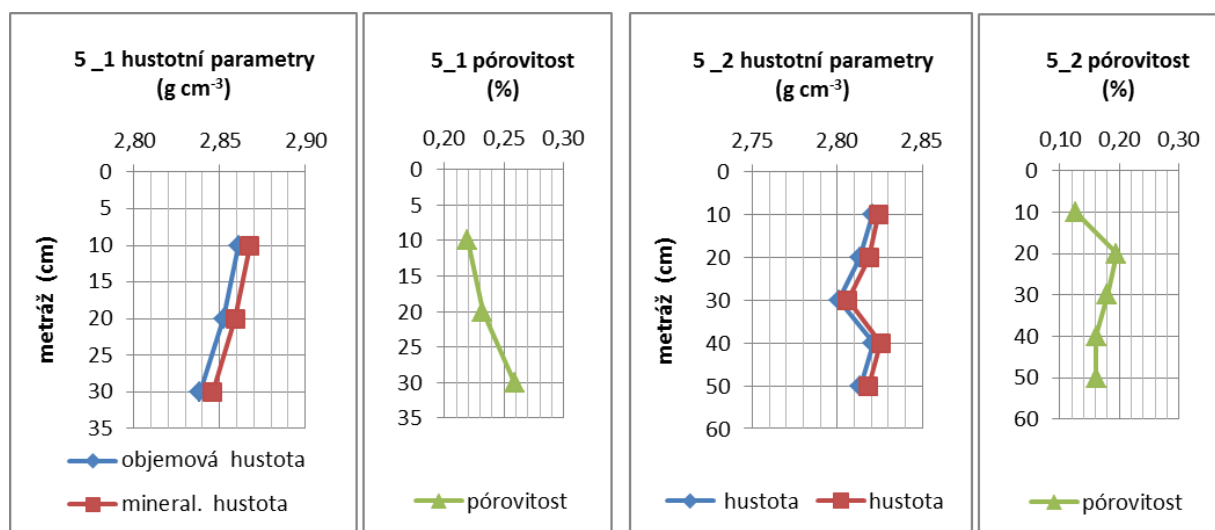
Obr. 81 Amfibolity (AMF), vzorky B1, B2, B3 a B4 – magnetická susceptibilita, pórovitost a mineralogická hustota, histogram a statistické parametry

Skupina vzorků z vrtů B5, B6, B7, B8, B9 a B10

Hustotní parametry

Lokalita B5 – jádra B5_1 a B5_2.

Hustotní parametry z lokality B5 jsou znázorněny na Obr. 82 a uvedeny v Tab. 9. Naměřené hodnoty mineralogických hustot jádra B5_1, ale i jádra B5_2 odpovídají buď amfibolickým rulám nebo silněji migmatitizovaným amfibolitům a pohybují se od 2,806 do 2,868 g.cm^{-3} . Diference mezi hustotami v takto krátkých úsecích je poměrně velká, tento stav se konečně opakuje i u dalších lokalit. Pórovitost u obou návrtů je velmi nízká, kolem 0,2 %.



Obr. 82 Lokalita B5, jádro B5_1 a B5_2 – hustotní parametry, hloubková závislost

Tab. 9 Lokalita B5, jádro B5_1 a B5_2 – hustotní parametry, data

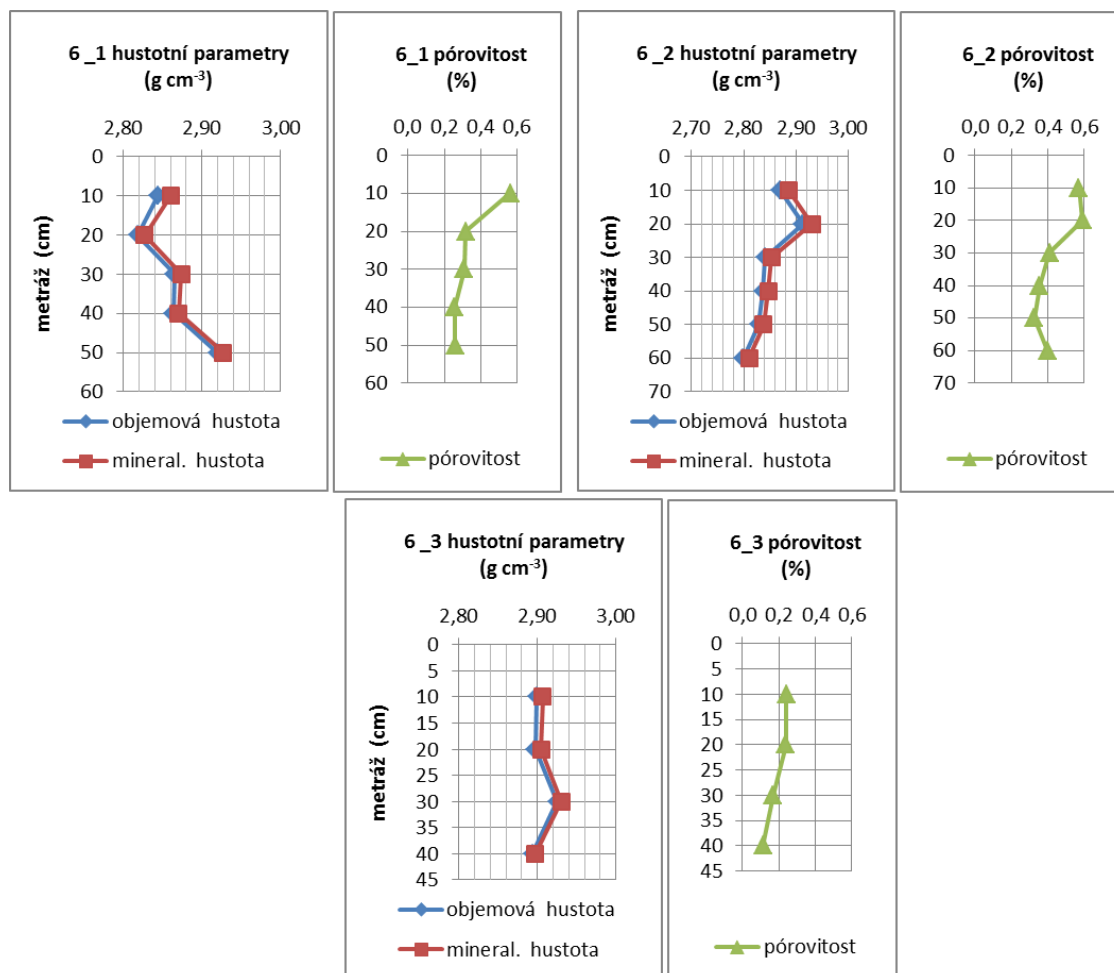
Lokalita	Objemová hustota (Do)	Mineralogická hustota (Dm)	Pórovitost (Por)
metráž (cm)	(g.cm ⁻³)	(g.cm ⁻³)	(%)
B5_1/10	2,861	2,868	0,22
B5_1/20	2,853	2,859	0,23
B5_1/30	2,839	2,846	0,26
B5_2/10	2,821	2,824	0,13
B5_2/20	2,813	2,819	0,20
B5_2/30	2,801	2,806	0,18
B5_2/40	2,821	2,826	0,16
B5_2/50	2,814	2,818	0,16

Lokalita B6 – jádra B6_1 a B6_2 a B6_3

Hustotní parametry hornin z lokality B6 jsou znázorněny na Obr. 83 a hodnoty jsou uvedeny v Tab. 10. Objemová a mineralogická hustota jádra B6_1 jeví tendenci nárůstu v intervalu hloubek 10–50 cm, a to s diferencí až 0,1 g.cm⁻³. Diferenci je možno považovat za relativně vysokou, nasvědčující na podstatnější změnu v modálním složení horniny. U tohoto jádra B6_1 lze tedy hodnotu Dm z hloubky 20 cm (2,818 g.cm⁻³) považovat za spíše bližší rulám až amfibolickým rulám, maximální hodnotu z hloubky 50 cm 2,92 g.cm⁻³ spíše amfibolitům.

Jeví se též trend úbytku pórovitosti s hloubkou. Na počátku jádra (hlava jádra), může být také poněkud vyšší pórovitost (0,5%) způsobena mechanickým poškozením stěny při ražbě. Hodnoty vyšší než 0,5 % považujeme v krystalinických horninách za indikátor již jistého stupně přeměny v horninové matici. To platí i pro další lokality.

V případě jádra B6_2 je velikost difference minima a maxima naměřených hodnot mineralogických hustot ($2,829\text{--}2,913\text{ g.cm}^{-3}$) podobná jako v předchozím případě. Svědčí rovněž o podstatných rozdílech modálního složení hornin odpovídající oběma krajním hodnotám. Rozdíl mezních hodnot mineralogických hustot naměřených na jádře B6_3 ($2,897\text{--}2,930\text{ g.cm}^{-3}$) je již poněkud nižší, odpovídá spíše amfibolitům, různou měrou migmatizovaným.



Obr. 83 Lokalita B6, jádro B6_1, B6_2 a B6_3 – hustotní parametry, hloubková závislost

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

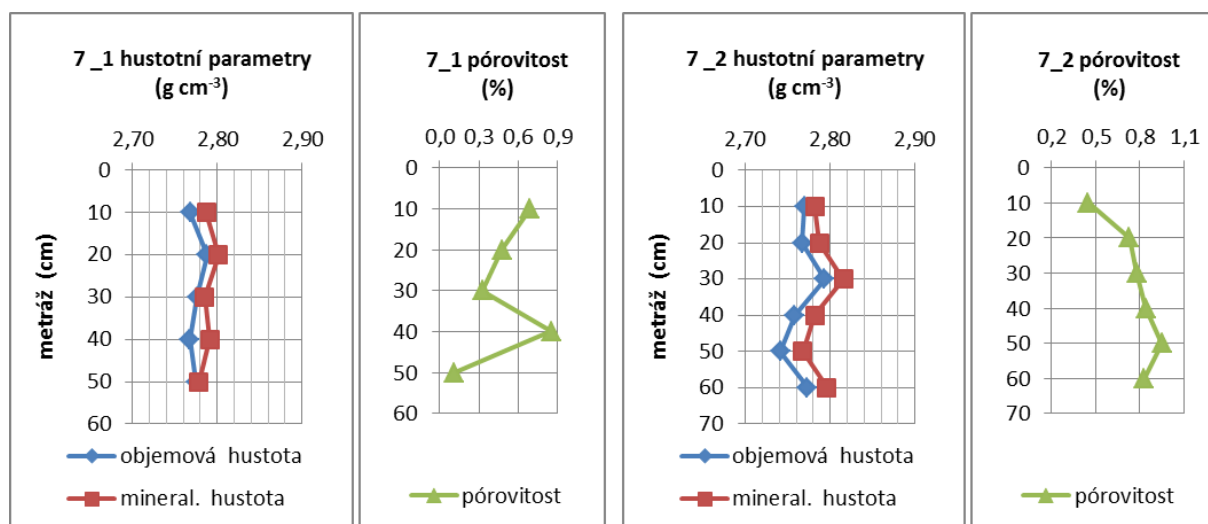
Tab. 10 Lokalita B6, jádro B6_1, B6_2 a B6_3 – hustotní parametry, data

Lokalita	Objemová hustota (Do)	Mineralogická hustota (Dm)	Pórovitost (Por)
metráž (cm)	(g.cm ⁻³)	(g.cm ⁻³)	(%)
B6_1/10	2,844	2,860	0,56
B6_1/20	2,818	2,827	0,32
B6_1/30	2,865	2,874	0,31
B6_1/40	2,863	2,871	0,26
B6_1/50	2,920	2,927	0,26
B6_2/10	2,869	2,886	0,57
B6_2/20	2,913	2,930	0,59
B6_2/30	2,841	2,853	0,41
B6_2/40	2,837	2,847	0,36
B6_2/50	2,829	2,838	0,33
B6_2/60	2,800	2,811	0,40
B6_3/10	2,900	2,907	0,24
B6_3/20	2,898	2,904	0,24
B6_3/30	2,925	2,930	0,17
B6_3/40	2,894	2,897	0,11

Lokalita B7 – jádra B7_1 a B7_2

Obr. 84 a Tab. 11 uvádí data naměřená na lokalitě B7. Naměřené hodnoty mineralogických hustot jádra B7_1 (převážně <2,80 g.cm⁻³) nasvědčují na skutečnost, že jde o ruly (snad až ruly amfibolické), nebo velmi silně migmatitizované amfibolity. Totéž platí i o měřených vzorcích jádra B7_2.

Čistě hypoteticky jsou tyto hodnoty typické pro intruzivní typy (v tom případě nejspíše intermediální – diority, tonality). Horniny na lokalitě B7 jsou z hlediska zvýšených pórovitostí nejvíce postiženy případnými „alteracemi“, nejvyšší pórovitosti se blíží 1 %, nejnižší pak jsou na hranici citlivosti metody (0,11 %).



Obr. 84 Lokalita B7, jádro B7_1 a B7_2 – hustotní parametry, hloubková závislost

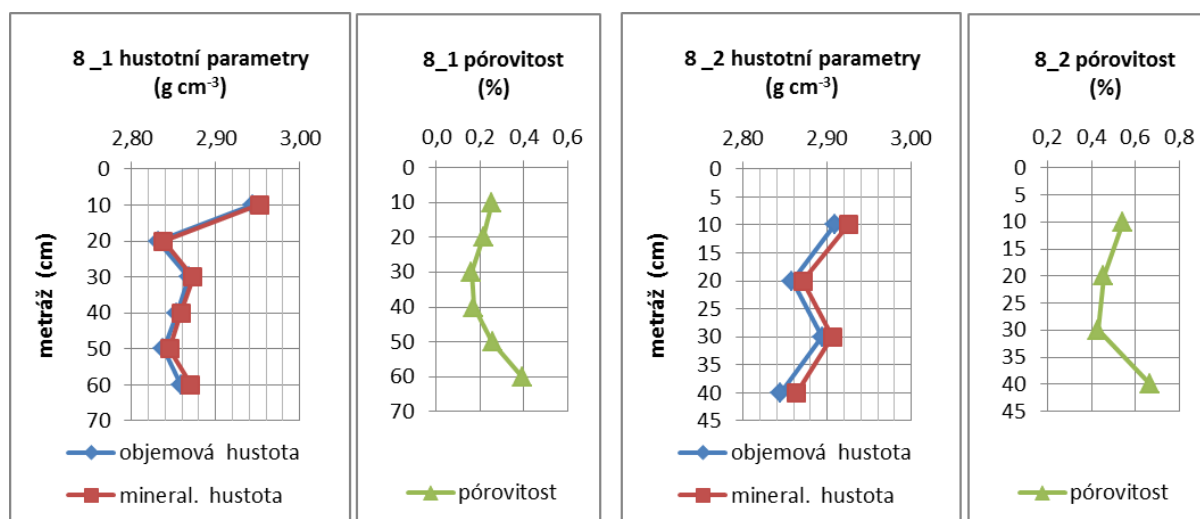
Tab. 11 Lokalita B7, jádro B7_1 a B7_2 – hustotní parametry, data

Lokalita	Objemová hustota (Do)	Mineralogická hustota (Dm)	Pórovitost (Por)
metráž (cm)	(g.cm ⁻³)	(g.cm ⁻³)	(%)
B7_1/10	2,768	2,787	0,69
B7_1/20	2,788	2,801	0,48
B7_1/30	2,776	2,785	0,33
B7_1/40	2,767	2,791	0,85
B7_1/50	2,775	2,778	0,11
B7_2/10	2,769	2,782	0,45
B7_2/20	2,767	2,787	0,73
B7_2/30	2,793	2,816	0,78
B7_2/40	2,758	2,782	0,84
B7_2/50	2,741	2,768	0,95
B7_2/60	2,773	2,796	0,83

Lokalita B8 – jádra B8_1 a B8_2

Naměřené hodnoty z lokality B8 jsou znázorněny na Obr. 85, data jsou uvedena v Tab. 12. Podle naměřené mineralogické hustoty na jádře B8_1 z hloubky 10 cm – 2,952 g.cm⁻³ jde pravděpodobně o amfibolit; u vzorku z hloubky 20 cm (2,838 g.cm⁻³) o amfibolit silně migmatizovaný, či amfibolickou rulu.

Na přechody mezi těmito typy hornin lze usuzovat i podle hodnot naměřených na jádru B8_2. Pórovitosti se pohybují pod hranicí 0,5 %, dva vzorky z jádra B8_2 jsou mírně nad touto hranicí (0,54 a 0,67 %). Toto jádro má celkově mírně zvýšenou pórovitost oproti jádru B8_1.



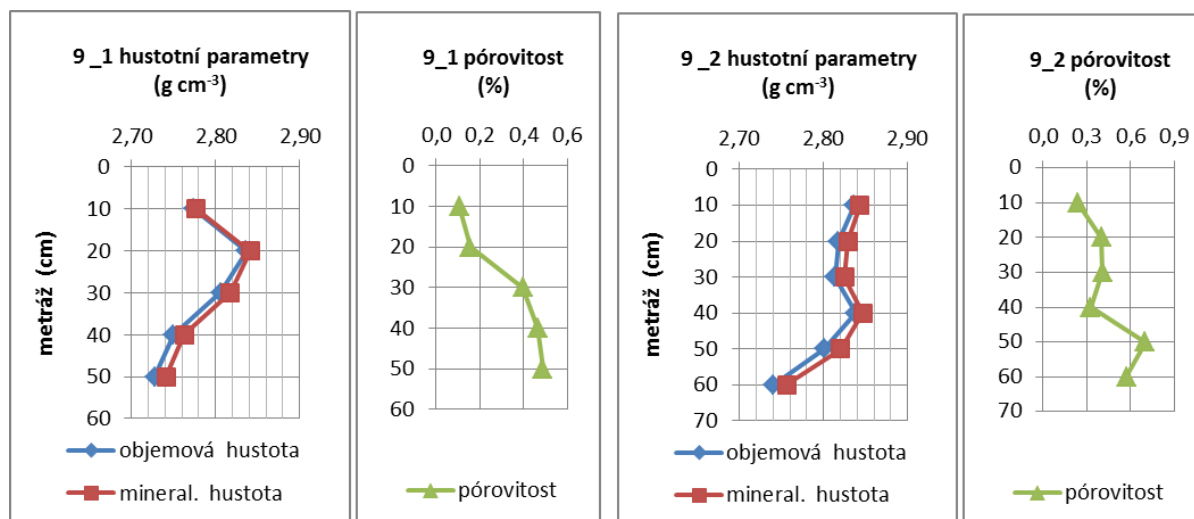
Obr. 85 Lokalita B8, jádro B8_1 a B8_2 – hustotní parametry, hloubková závislost

Tab. 12 Lokalita B8, jádro B8_1 a B8_2 – hustotní parametry, data

Lokalita	Objemová hustota (Do)	Mineralogická hustota (Dm)	Pórovitost (Por)
metráž (cm)	(g.cm^{-3})	(g.cm^{-3})	(%)
B8_1/10	2,944	2,952	0,26
B8_1/20	2,832	2,838	0,21
B8_1/30	2,868	2,873	0,16
B8_1/40	2,854	2,859	0,17
B8_1/50	2,838	2,845	0,26
B8_1/60	2,859	2,870	0,39
B8_2/10	2,909	2,925	0,54
B8_2/20	2,858	2,871	0,45
B8_2/30	2,894	2,906	0,43
B8_2/40	2,844	2,864	0,67

Lokalita B9 – jádra B9_1 a B9_2

Lokalita B9 je znázorněna na Obr. 86, data jsou uvedena v Tab. 13. Průměrné hodnoty mineralogických hustot na jádře B9_1 jsou zde poměrně nízké (nejnižší v hloubce 40 a 50 cm) a to $2,728$ a $2,750 \text{ g.cm}^{-3}$. K tomu lze poznamenat, že průměrné hustoty biotitických pararul v moldanubiku se pohybují kolem hodnot $2,75 \text{ g.cm}^{-3}$. K těmto typům hornin tedy mají vzorky z tohoto jádra pravděpodobně blízko. Podobný pokles mineralogických hustot v hloubce 50 a 60 cm lze pozorovat i v případě jádra B9_2. Pórovitosti ve dvou případech převyšují hranici 0,5 % a to ve spodní části jádra B9_2 – 0,57 a 0,70 %.



Obr. 86 Lokalita B9, jádro B9_1 a B9_2 – hustotní parametry, hloubková závislost

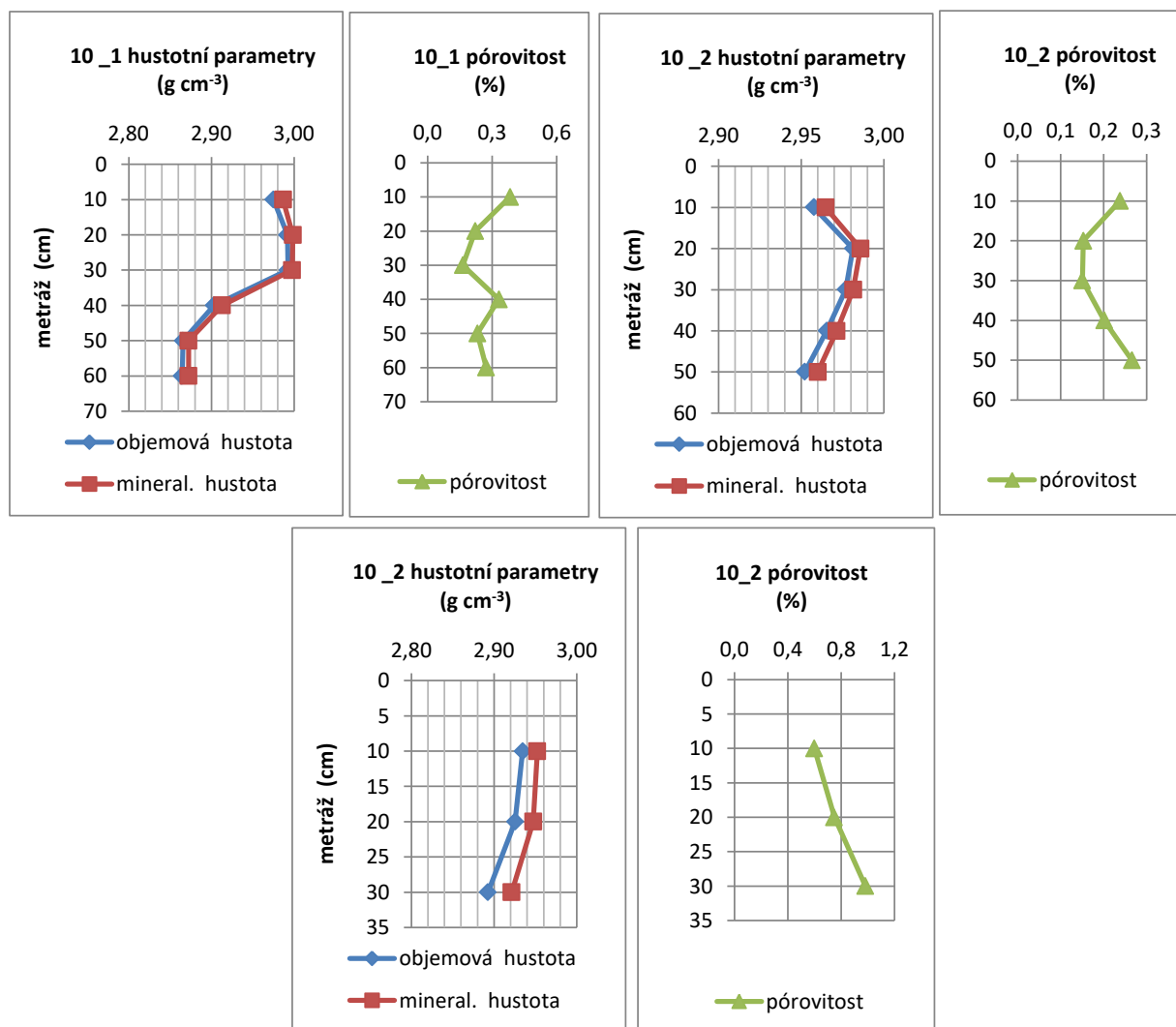
Tab. 13 Lokalita B9, jádro B9_1 a B9_2 – hustotní parametry

Lokalita	Objemová hustota (Do)	Mineralogická hustota (Dm)	Pórovitost (Por)
metráž (cm)	(g.cm ⁻³)	(g.cm ⁻³)	(%)
B9_1/10	2,774	2,777	0,11
B9_1/20	2,837	2,841	0,16
B9_1/30	2,806	2,817	0,40
B9_1/40	2,750	2,763	0,47
B9_1/50	2,728	2,741	0,49
B9_2/10	2,837	2,843	0,24
B9_2/20	2,818	2,829	0,40
B9_2/30	2,813	2,825	0,41
B9_2/40	2,838	2,847	0,33
B9_2/50	2,801	2,820	0,70
B9_2/60	2,741	2,756	0,57

Lokalita B10 – jádra B10_1, B10_2 a B10_3

Lokalita B10 je znázorněna na Obr. 87 v Tab. 14. U jádra B10_1 průběh mineralogických hustot s hloubkou vykazuje výrazně vyšší hodnoty v hloubkách 10, 20, 30 cm oproti vzorkům 50 a 60 cm.

U mělčeji uložených vzorků, jejichž Dm odpovídá běžným amfibolitům, hodnoty kolem 2,87 g.cm⁻³ odpovídají spíše amfibolitům migmatitizovaným. Hloubkový průběh mineralogických hustot jádra B10_2 je z tohoto hlediska vyrovnanější, pohybuje se v rozmezí 2,98 až 2,96 g.cm⁻³. Totéž lze konstatovat u jádra B10_3. Horniny zde jsou rozpukané, což je patrné na zvýšené pórovitosti, která se pohybuje mezi 0,68 až 0,90 %, zatímco u předchozích návrťů nepřesahuje 0,5 %.



Obr. 87 Lokalita B10, jádro B10_1, B10_2 a B10_3 – hustotní parametry, hloubková závislost

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

Tab. 14 Lokalita B10, jádro B10_1 a B10_2 – hustotní parametry, data

Lokalita	Objemová hustota (Do)	Mineralogická hustota (Dm)	Pórovitost (Por)
metráž (cm)	(g.cm ⁻³)	(g.cm ⁻³)	(%)
B10_1/10	2,975	2,987	0,38
B10_1/20	2,992	2,998	0,22
B10_1/30	2,993	2,997	0,16
B10_1/40	2,903	2,913	0,33
B10_1/50	2,866	2,872	0,23
B10_1/60	2,864	2,872	0,27
B10_2/10	2,958	2,965	0,24
B10_2/20	2,981	2,986	0,15
B10_2/30	2,977	2,981	0,15
B10_2/40	2,965	2,971	0,20
B10_2/50	2,952	2,960	0,27
B10_3/10	2,935	2,952	0,60
B10_3/20	2,925	2,947	0,75
B10_3/30	2,893	2,921	0,98

Skupina vzorků z vrtů B5, B6, B7, B8, B9 a B10

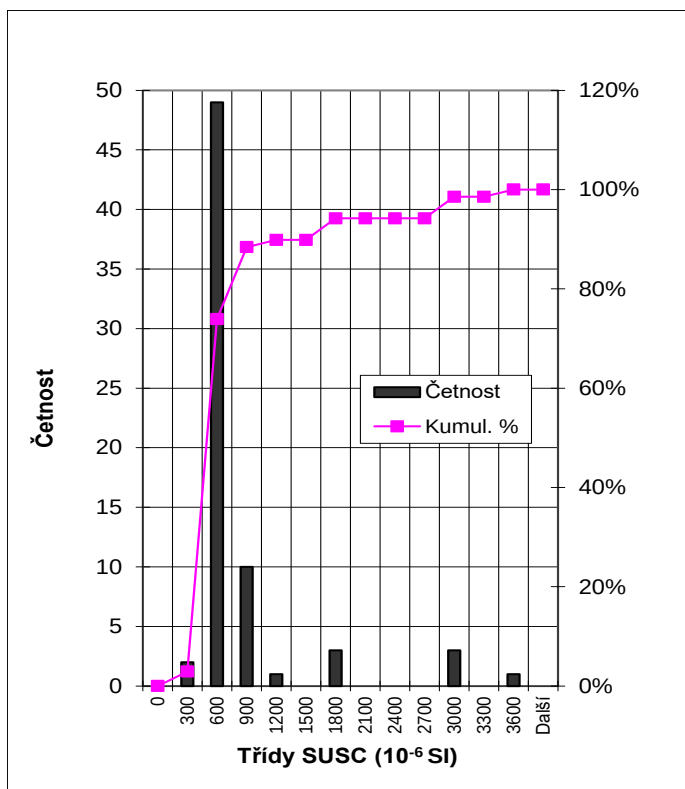
Střední magnetická susceptibilita (Km)

Střední magnetickou susceptibilitu (Km) znázorňujeme sumárně v Tab. 15 a na histogramu Obr. 88. Susceptibilita většiny vzorků se pohybuje v jednotkách řádu 10^{-4} SI, což je dokladem převládajícího vlivu paramagnetické složky reprezentované především amfibolem a biotitem. Několik vzorků, a to B7/1 a B6/3, má susceptibilitu vyšší (v řádu 10^{-3} j. SI). Histogram rozdělení hodnot (Obr. 88) ukazuje na pravostrannou asymetrii. Šikmost $k_3=2,98$ je poměrně vysoká, což je pro tento parametr typické. 8 hodnot z celkového počtu 69 měření má velikost $>1000 \cdot 10^{-6}$ SI. Jde o vzorky odebrané z lokalit B6 a B7. Horniny této lokality jsou patrně charakteristické relativně zvýšenými obsahy feromagnetických akcesorií (v praxi jde řádově o tisíce obj. %). V kapitole 2.2.4 je na Obr. 101 znázorněn vztah mineralogické hustoty (Dm) a střední magnetické susceptibilitu (Km) a je velice těsný. Potvrzuje závislost magnetické susceptibilitu především na obsazích amfibolu a biotitu – s narůstající Dm se zvyšuje hodnota magnetické susceptibilitu.

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

Tab. 15 Hodnoty střední magnetické susceptibility u vzorků B5 až B10 z lokality PVP Bukov

Lokalita číslo vzorku	Magnetická susceptibilita Km (j.SI)	Lokalita číslo vzorku	Magnetická susceptibilita Km (j.SI)
B5/1/1	5,36E-04	B8/1/1	5,60E-04
B5/1/2	5,15E-04	B8/1/2	4,17E-04
B5/1/3	4,76E-04	B8/1/3	7,11E-04
B5/2/1	4,40E-04	B8/1/4	4,28E-04
B5/2/2	4,15E-04	B8/1/5	4,41E-04
B5/2/3	3,80E-04	B8/1/6	4,69E-04
B5/2/4	4,23E-04	B8/2/1	5,83E-04
B5/2/5	4,14E-04	B8/2/2	4,51E-04
B6/1/1	5,27E-04	B8/2/3	5,04E-04
B6/1/2	3,52E-04	B8/2/4	4,38E-04
B6/1/3	4,01E-04	B9/1/1	2,96E-04
B6/1/4	4,16E-04	B9/1/2	4,72E-04
B6/1/5	4,76E-04	B9/1/3	4,48E-04
B6/2/1	5,20E-04	B9/1/4	3,29E-04
B6/2/2	6,15E-04	B9/1/5	2,47E-04
B6/2/3	4,44E-04	B9/2/1	5,15E-04
B6/2/4	4,74E-04	B9/2/2	4,79E-04
B6/2/5	4,93E-04	B9/2/3	4,92E-04
B6/2/6	3,26E-04	B9/2/4	5,23E-04
B6/3/1	2,84E-03	B9/2/5	4,75E-04
B6/3/2	3,31E-03	B9/2/6	3,17E-04
B6/3/3	2,98E-03	B10/1/1	7,65E-04
B6/3/4	2,76E-03	B10/1/2	7,82E-04
B7/1/1	4,18E-04	B10/1/3	7,81E-04
B7/1/2	1,18E-03	B10/1/4	5,93E-04
B7/1/3	1,69E-03	B10/1/5	5,40E-04
B7/1/4	1,62E-03	B10/1/6	5,06E-04
B7/1/5	1,66E-03	B10/2/1	7,26E-04
B7/2/1	4,38E-04	B10/2/2	7,65E-04
B7/2/2	4,28E-04	B10/2/3	7,53E-04
B7/2/3	5,23E-04	B10/2/4	7,14E-04
B7/2/4	4,28E-04	B10/2/5	6,68E-04
B7/2/5	3,96E-04	B10/3/1	5,17E-04
B7/2/6	4,58E-04	B10/3/2	4,79E-04
		B10/3/3	4,95E-04



Obr. 88 Histogram rozdělení naměřených hodnot u magnetické susceptibility – lokality B5 až B10

Anizotropie magnetické susceptibility (AMS).

Anizotropii magnetické susceptibility (AMS) z mělkých vrtů řady B1 až B10 zde nehodnotíme, je detailně zpracovávána v kapitole 2.1.7.

Přirozená radioaktivita – obsahy K, U, e U(Ra) a eTh

Soubor vzorků z vrtů S1, S2, S3, S4 a B1, B2, B3 a B4, B5, B6, B7, B8, B9 a B10.

Pro stanovení obsahů radioaktivních prvků byla ze série vrtů řady S1 až S4 a B1 až B4 vybrána škála 19 vzorků hornin tak, aby byly zastíženy tři základní typy, a to ruly, migmatity a amfibolity. Výsledky měření jsou shrnuty v Tab. 16. Z těchto měření byly vypočteny základní statistické parametry a porovnány se vzorky z povrchu z řešerší (Tab. 17).

Obsahy radioaktivních prvků proti vzorkům z povrchu mohou být dosti odlišné, zejména když na PVP Bukov jsou charakterizovány převážně horniny s větším či menším obsahem amfibolu. To se projevuje především v nižších obsazích Th i U, na rozdíl od biotitických rul a migmatitů. Radioaktivita roste s obsahem biotitu, který je nositelem radionuklidů (Manová a Matolín 1995).

Nejvyšší hodnoty eTh byly stanoveny u migmatitů z vrtu S-4 (11–2 ppm), nejnižší přísluší amfibolitům (pod 1 ppm). Obsahy uranu jsou nízké, nepřevyšují 4 ppm.

Do statistiky nebyl zařazen vzorek S3–04B (viz Tab. 16) – pro sporné petrografické zařazení.

Pro soubor vzorků z vrtů B5 až B10 byla přirozená radioaktivita stanovena jako doplňková informace na odřezcích z jednotlivých návrťů a to tam, kde byl dostatek materiálu. Odřezky vzorků byly nejdříve podrceny na zrna pod 1 cm, nasypány do kyvet a po ustálení

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

radioaktivní rovnováhy změřeny laboratorní spektrometrií gama. Takto bylo možno zpracovat 14 vzorků a hodnoty představují směsný vzorek pro konkrétní jádro z dané lokality. Data tedy bereme jako orientační. Tyto analyzované vzorky (z návrťů B5 až B10) představují podle našeho zařazení amfibolické ruly až amfibolity různou měrou migmatizované. Průměrné obsahy eTh, eU, K jsou – posuzováno v základních typech hornin – u amfibolitů relativně nízké, u migmatitů až mnohonásobně vyšší. V tomto smyslu lze za "nízké" považovat obsahy eTh ve vzorcích B6/2, B6/3, B8/1, B8/2, a to od 0,58 do 2,54 ppm. Naopak poměrně vysoké jsou ve vzorcích B5, B7, B9 a B10 (10 až 23 ppm).

Uran je v parametru eU(Ra) stanovován za předpokladu rovnováhy obou prvků, jako Ra a U. Zatímco Th patří k prvkům relativně málo mobilním, takže při procesu zvětrání přechází jen v relativně malé míře (na rozdíl od U) do vodního roztoku, uran se v horninách vyskytuje ve dvou formách, jako čtyřmocný a šestimocný. Jak uvádí Procházka (2010) je distribuce uranu v horninách poměrně složitá a již při nepatrném zvětrání je tento uran zoxidován a odnesen především v podobě uranylu ($[U_{VI}O_2]^{2+}$) ve vodném roztoku. Na distribuci uranu mají vliv i další recentní a subrecentní procesy, a proto se poměr parametrů eU(Ra) a U často liší od 1. Za porušení rovnováhy se považuje hranice zhruba 1:3, avšak v našem případě lze konstatovat, že rovnováha U a Ra nebyla porušena. Obsahy uranu jsou obecně nízké, nepřesahují hodnotu 5 ppm.

V korelační závislosti se jeví jako kladné, statisticky významné vztahy eTh s eU(Ra) a U (korelační koeficient $r = 0,619$, resp. $0,753$ při kritické hodnotě $0,532$ pro 14 vzorků). Tento jev je v metamorfovaných horninách obvyklý.

Pozn.: Korelační koeficient (r) vyjadřuje míru korelace, tj. vztah mezi dvěma veličinami. Může nabývat hodnot od -1 až po $+1$. V našem případě sledujeme vazbu mezi parametry naměřenými v jednom statistickém souboru, a to ve všech vzájemných kombinacích. Výsledkem je korelační matice s korelačními koeficienty r . Statisticky významné vazby v jednotlivých kombinacích jsou ty, kde kritická hodnota překročí pravděpodobnost $> 95\%$ (ve smyslu $+$ nebo $-$) oproti kritické hodnotě, která je dána tabulkově.

Tepelná produkce jako další informace byla získána výpočtem z naměřených obsahů radioaktivních prvků. Byla spočítána podle Matolína v Hazdová et al. (1981).

V tabulce (Tab. 18) jsou uvedeny jednotkové koncentrace radioaktivních prvků, z nichž je pak odvozen výpočet. Tab. 19 pak uvádí stanovené obsahy radioaktivních prvků na vzorcích řady B5 až B10 z PVP Bukov a vypočtenou tepelnou produkci.

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

Tab. 16 Obsahy eTh, U, eU(Ra) a K v horninách lokality PVP Bukov – vrty S-1 až S-4 a B1 až B4

Vzorek	hornina	eTh	U	eU(Ra)	K
	kód	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(%)
S4-01	RUL	7,4	2,7	2,1	1,92
S4-02	AMF	0,9	0,2	0,2	0,31
S4-03	AMF	1,5	0,3	0,5	0,34
S4-04	RUL	2,6	0,7	0,6	0,98
S4-05	RUL	1,6	0,7	1,5	1,1
S4-06	AMF	0,1	0,6	0,8	0,73
S3-02	RUL	0,9	0,6	0,6	0,76
S3-03	AMF	1,4	2,4	1,8	1,72
S-04A	MGM	11,1	1,9	3,5	3,32
S3-04B	AMF	12,3	2,5	3,2	2,53
S3-05	AMF	2,7	0,7	1,7	0,43
S3-06	MGM	1	1,9	2,9	1,02
S3-07	AMF	3,5	2,2	1,8	0,84
B1-X1	RUL	1,8	1,8	1,1	0,59
B2-X1	RUL	2,2	0,2	1,1	0,7
B1-1	RUL	2,8	1,7	1,1	0,38
B2-1	AMF	1,4	0,4	0,3	0,29
B3-1	MGM	6,1	0,5	1,1	1,49
B4-2	MGM	5,3	0,8	0,9	1,15

Legenda: RUL– ruly, AMF – amfibolity, MGM – migmatity

Tab. 17 Statistické parametry obsahů eTh, U, eU(Ra) a K v rulách, migmatitech a amfibolitech z vrtů řady S-1 až S-4 a B1 až B4 v porovnání s ekvivalenty hornin z archivních údajů

Hornina	eTh (ppm)				U (ppm)				eU(Ra) (ppm)				K (%)			
	AM	SD	ME	N	AM	SD	ME	N	AM	SD	ME	N	AM	SD	ME	N
Moldanubikum – rešeršní údaje – vzorky z povrchu																
Amfibolity	3,7	5,4	0,7	3					1,4	1	1,9	3	1,11	0,81	1,28	3
Migmatity	13,5	6,3	15,5	9	5,6	2,3	5,80	7	3,4	1,3	3,75	8	3,84	0,88	4,09	9
Pararuly	11,5	4,2	10,5	4	1,6	1,1	1,6	2	2,7	0,5	2,6	4	2,78	0,7	2,71	4
Bukov – vrty S1 až S4 a B1 až B4 v podzemí																
Amfibolity	1,6	1,0	1,4	7	1,0	0,9	0,6	7	1,0	0,7	0,8	7	0,67	0,47	0,43	7
Migmatity	5,9	3,6	5,7	4	1,3	0,6	1,35	4	2,1	1,1	2	4	1,75	0,93	1,32	4
Pararuly	2,8	2,0	2,2	7	1,2	0,8	0,7	7	1,2	0,5	1,1	7	0,92	0,46	0,76	7
AM	Aritmetický průměr															
SD	Směrodatná odchylka															
ME	Medián															
N	Počet vzorků															

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

Tab. 18 Tepelná produkce jednotkových koncentrací draslíku, uranu a thoria (podle Matolína in Hazdrová et al. 1981)

Tepelná produkce jednotkové hmoty radionuklidu (Adams a Gasparini 1970, cit. Matolín in Hazdrová et al. 1981)				1 tuna horniny, 1 ppm U, nebo 1 ppmTh, nebo 1 % K		Matolín a Hazdrová
Nuklid	J.g ⁻¹ .rok ⁻¹	W.g ⁻¹	μW.g ⁻¹	μW.t ⁻¹	μW.m ⁻³	μW.m ⁻³
přeměnová řada ²³⁸ U	2,97					
přeměnová řada ²³⁵ U	18,00					
přír. U celkem	3,06	0,97 . 10 ⁻⁷	0,097	0,097	0,25802	0,258
přeměnová řada ²³² Th	0,84	0,27 . 10 ⁻⁷	0,027	0,027	0,07182	0,071
⁴⁰ K	0,92					
přír. K	1,13 . 10 ⁻⁴	3,58 . 10 ⁻¹²	3,58 . 10 ⁻⁶	0,0358	0,095228	0,096

Formule námi používaná, má podobu (2.2.2)

$$\text{HPU} = \text{Do} * (\text{ekvTh} * 26,61 + \text{ekvURa} * 96,96 + \text{K} * 35,8 / 1000) \quad (2.2.2)$$

kde obsahy Th a U jsou udány v ppm, K v %, Do znamená průměrnou objemovou hustotu v g.cm⁻³ příslušné lokality (mělkého vrtu).

Tab. 19 Hodnoty obsahů přirozených radioaktivních prvků (K, U, eU(Ra) a eTh) a hodnot tepelné produkce u série vzorků řady B5 až B10 z prostorů lokality PVP Bukov

Lokalita	K	U	eU(Ra)	eTh	poměr eU/U	objemová hustota	tepelná produkce
	(%)	(ppm)	(ppm)	(ppm)		AM (g.cm ⁻³)	(μW.m ⁻³)
B5/1	0,89	2,05	1,66	8,05	0,81	2,851	1,16
B5/2	0,96	2,08	1,87	10,58	0,90	2,814	1,40
B6/1	0,80	4,19	3,45	6,12	0,82	2,862	1,50
B6/2	0,66	1,12	1,08	0,58	0,96	2,848	0,41
B6/3	0,78	2,12	2,13	2,66	1,00	2,904	0,89
B7/1	2,10	4,33	3,50	22,77	0,81	2,775	2,83
B7/2	2,29	2,78	3,09	16,35	1,11	2,767	2,26
B8/1	1,57	1,09	1,74	1,28	1,60	2,866	0,74
B8/2	1,00	0,89	1,04	2,54	1,16	2,876	0,59
B9/1	1,35	4,54	3,47	20,01	0,76	2,790	2,56
B9/2	1,03	4,43	3,72	13,38	0,84	2,808	2,11
B10/1	0,94	3,19	3,99	8,36	1,25	2,932	1,89
B10/2	1,10	3,88	4,34	10,87	1,12	2,967	2,22
B10/3	0,92	3,59	3,62	9,79	1,01	2,918	1,88
(AM – aritmetický průměr hodnot z příslušné lokality)							

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

Výsledky ultrazvukového prozařování – soubor výběrových vzorků z vrtů S-3, S-4 a B21, B2, B3 a B4

Celkem bylo prozařováno 18 laboratorních těles vybraných ze souboru vzorků z vrtů S-3, S-4 a B21, B2, B3 a B4. Výsledky měření P–vln a S–vln jsou přehledně shrnuty v následující tabulce (Tab. 20). Vybraná tělesa byla prozařována ve třech vzájemně kolmých směrech. První směr odpovídal ose vrtu (mezi podstavami válce), druhý směr byl veden na plášti válce ve směru šipky, která značí orientaci jádra, a třetí byl na plášti válce kolmo na směr 2 (tj. šipky). Dynamický Youngův modul pružnosti E_d , dynamický střižný modul G_d a Poissonovo číslo ν_d byly vyhodnoceny podle vztahů 2.2.4, 2.2.5 a 2.2.6, uvedených v kapitole „Metodika ultrazvukového prozařování“ a jsou uvedeny v tabulce (Tab. 21).

Tab. 20 Ultrazvukové rychlosti P–vln a S–vln u vzorků z lokality PVP Bukov – vrty S-3, S-4 a B1, B2, B3 a B4

Označení vzorku	Číslo vzorku	Směr	rychlost P-vlny (km.s ⁻¹)	rychlost S-vlny (km.s ⁻¹)
B1	X1	1A	6,028	3,454
		2A	6,471	3,780
		2B		3,465
		3A	6,458	3,713
		3B		3,483
B1	Y1	1A	6,608	3,724
		2A	6,577	3,704
		2B		3,778
		3A	6,160	3,514
		3B		3,593
B2	X1	1A	6,167	3,476
		2A	6,632	3,886
		2B		3,473
		3A	6,605	3,794
		3B		3,540
B2	Y1	1A	6,489	3,746
		2A	6,074	3,428
		2B		3,479
		3A	6,545	3,571
		3B		3,847
B1	1	1A	6,626	3,772
		2A	6,238	3,587
		2B		3,772
		3A	6,637	3,772

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

Označení vzorku	Číslo vzorku	Směr	rychlost P-vlny (km.s ⁻¹)	rychlost S-vlny (km.s ⁻¹)
		3B		3,832
B1	3	1A	6,793	3,931
B1	4	1A	6,836	3,823
B2	1	1A	6,771	3,792
		2A	6,716	3,722
		2B		3,984
		3A	6,467	3,743
		3B		3,927
B2	2	1A	7,090	3,931
B2	3	1A	7,046	3,981
B3	1	1A	6,212	3,526
		2A	5,741	3,415
		2B		3,415
		3A	5,950	3,504
		3B		3,492
B3	3	1A	6,149	3,586
B3	5	1A	6,038	3,520
B4	1	1A	5,784	3,243
		2A	5,880	3,484
		2B		3,459
		3A	5,725	3,472
		3B		3,497
B4	2	1A	5,988	3,542
S3	4B	1A	5,715	3,413
S3	5	1A	6,530	3,814
S4	3	1A	5,975	3,469

Tab. 21 Vypočtené hodnoty dynamického modulu pružnosti, střížného modulu a Poissonova čísla z lokality PVP Bukov – vrty S-3, S-4 a B1, B2, B3 a B4

Označení vzorku	Číslo vzorku	Směr	E _{dyn} (GPa)	G _{dyn} (GPa)	ν _{dyn} (-)
B1	X1	1A	83,914	33,415	0,256
		2A	99,323	40,014	0,241
		2B			
		3A	96,775	38,616	0,253

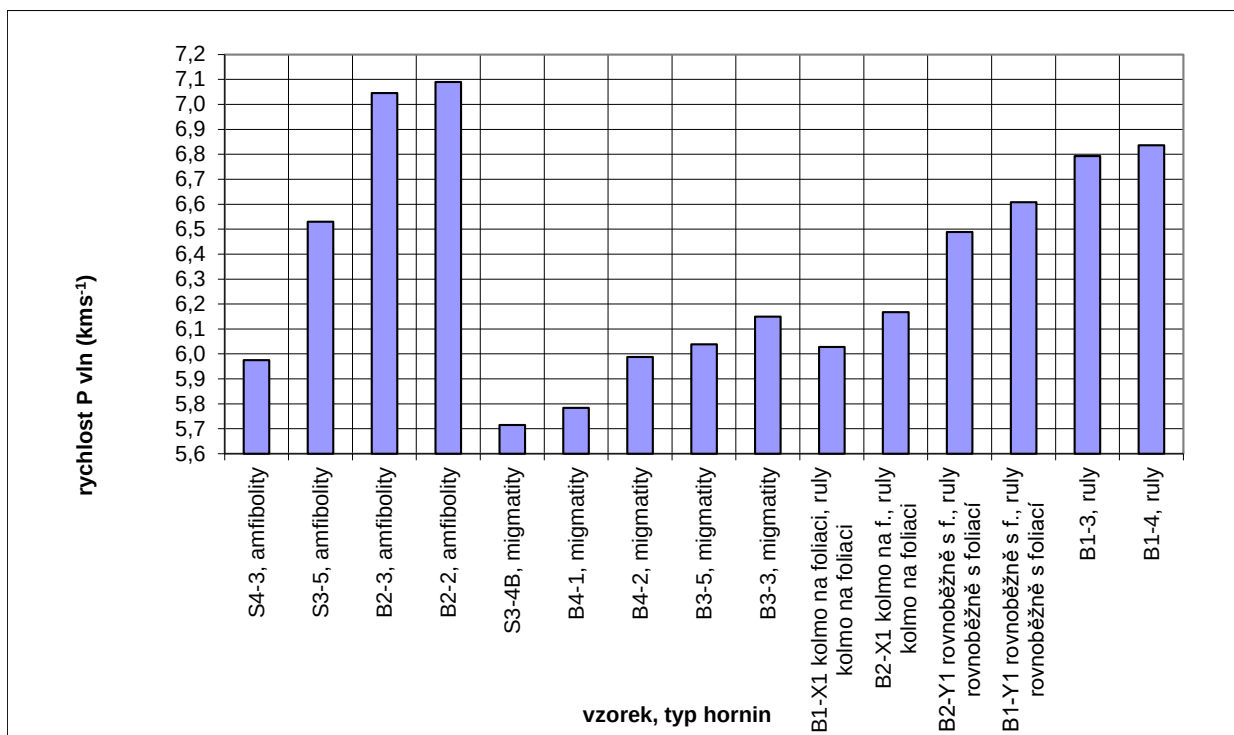
Označení vzorku	Číslo vzorku	Směr	E_{dyn} (GPa)	G_{dyn} (GPa)	$\square_{dyn}^{(-)}$
		3B			
B1	Y1	1A	99,146	39,115	0,267
		2A	98,137	38,705	0,268
		2B			
		3A	87,694	34,83	0,259
		3B			
B2	X1	1A	86,236	34,027	0,267
		2A	105,35	42,531	0,239
		2B			
		3A	101,64	40,531	0,254
		3B			
B2	Y1	1A	98,914	39,564	0,250
		2A	83,913	33,133	0,266
		2B			
		3A	92,596	35,942	0,288
		3B			
B1	1	1A	101,43	40,241	0,260
		2A	91,23	36,407	0,253
		2B			
		3A	101,54	40,245	0,262
		3B			
B1	3	1A	112,21	44,943	0,248
B1	4	1A	104,78	41,172	0,272
B2	1	1A	106,28	41,793	0,271
		2A	102,93	40,255	0,278
		2B			1,000
		3A	101,64	40,717	0,248
		3B			1,000
B2	2	1A	116,03	45,391	0,278
B2	3	1A	118,93	46,986	0,266
B3	1	1A	85,114	33,712	0,262
		2A	77,563	31,63	0,226
		2B			1,000
		3A	82,233	33,307	0,234

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov			Evidenční označení:	
				ZZ 191/2017	
Označení vzorku	Číslo vzorku	Směr	E_{dyn} (GPa)	G_{dyn} (GPa)	$\nu_{\text{dyn}}^{(-)}$
		3B			1,000
B3	3	1A	86,913	34,984	0,242
B3	5	1A	83,473	33,59	0,243
B4	1	1A	72,881	28,678	0,271
		2A	81,377	33,098	0,229
		2B			1,000
		3A	79,463	32,858	0,209
		3B			1,000
B4	2	1A	83,489	33,918	0,231
S3	4B	1A	77,98	31,887	0,223
S3	5	1A	106,99	43,103	0,241
S4	3	1A	88,145	35,379	0,246

Z výsledků je patrné, že se rychlosti P–vln pohybují mezi 5,7 až 7,1 km.s⁻¹. Rychlosti S–vln jsou mezi 3,2 až 4,0 km.s⁻¹. Tomu odpovídají dynamický Youngův modul v rozmezí 72,9 GPa až 118,9 GPa, dynamický střižný modul 28,7 GPa až 47,0 GPa a dynamické Poissonovo číslo 0,21 až 0,29. Tyto vypočtené dynamické parametry se mohou od reálně naměřených dat dosti lišit. Např. Schügerl (2010) uvádí až řádové rozdíly mezi vypočtenými parametry a reálně naměřenými. Závisí samozřejmě na podmínkách měření. Proto tato data mají tedy pouze informativní charakter a nejsou blíže hodnocena.

Vztah rychlostí P–vln a typu horniny je znázorněn na Obr. 89, který ilustruje velikosti rychlostí elastických vln P na jednotlivých vzorcích. Vzorky jsou seřazeny podle typu hornin. Je zřejmé, že relativně nejvyšší hodnoty byly naměřeny u dvou vzorků amfibolitů (více jak 7 km.s⁻¹), nízké naopak u migmatitů (5,7 až 5,8 km.s⁻¹). Nízké hodnoty migmatitů jsou patrně zapříčiněny přítomností žilek leukosomu.

V případě rul jsou dvě z nejnižších hodnot zřejmě způsobeny orientací měřeného vzorku ve směru kolmém na foliaci (6,0 až 6,2 km.s⁻¹), ve směru rovnoběžném s foliací jsou rychlosti výrazně vyšší a to 6,5 až 6,6 km.s⁻¹.



Obr. 89 Graf velikosti rychlostí P-vln podle typu hornin – lokalita PVP Bukov – vrty S-3, S-4 a B1, B2, B3 a B4

Výsledky stanovení elektrické rezistivity (konduktivity)

Na souboru 18 vzorků bylo provedeno měření elektrické rezistivity (konduktivity). Výsledky měření udává Tab. 22. Soubor vzorků je totožný se souborem, na kterém byly stanoveny rychlosti elastických vln a další fyzikální parametry. Jen po úpravách a sušení byla čela plazmaticky napařena Cu.

V souboru provedených měření elektrických konduktivit (Obr. 90) u vzorků řady B1, B2, B3 a B4 jsou nápadné vzorky s extrémními hodnotami vodivosti (B1-1, B2-1, B3-1). Vzhledem k tomu, že se jedná o čela jader, která byla v přímém kontaktu s důlními technickými vodami, je možné, že vzorky jsou těmito vodami kontaminované. Ovlivnění naměřených hodnot je zde velmi pravděpodobné. V dalším statistickém zpracování v kapitole 2.2.4 (Tab. 24) hodnoty od těchto vzorků nepoužíváme. Maximální hodnoty konduktivity dosahují až 85,11 $\mu\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$ u amfibolitů (jedná se však o problematická čela vzorků), minimální pak u rul 0,68 $\mu\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$ při frekvenci 1 kHz.

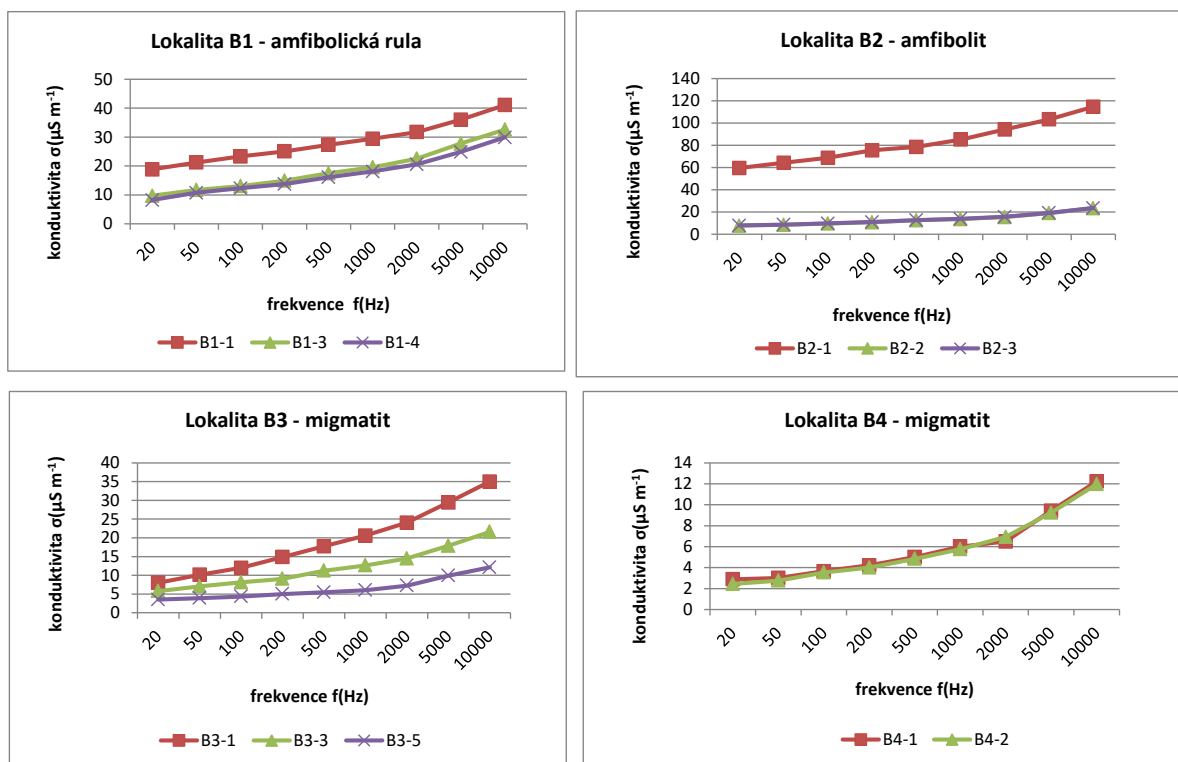
Na Obr. 91 jsou pak znázorněny hodnoty elektrických konduktivit v závislosti na frekvenci u vzorků B1X,Y a B2X,Y, které byly připraveny kolmo a rovnoběžně s foliací. Je zřejmé vyšší vodivost ve směru rovnoběžném s foliací což je i v souladu s měřením rychlostí elastických vln (viz Obr. 89).

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

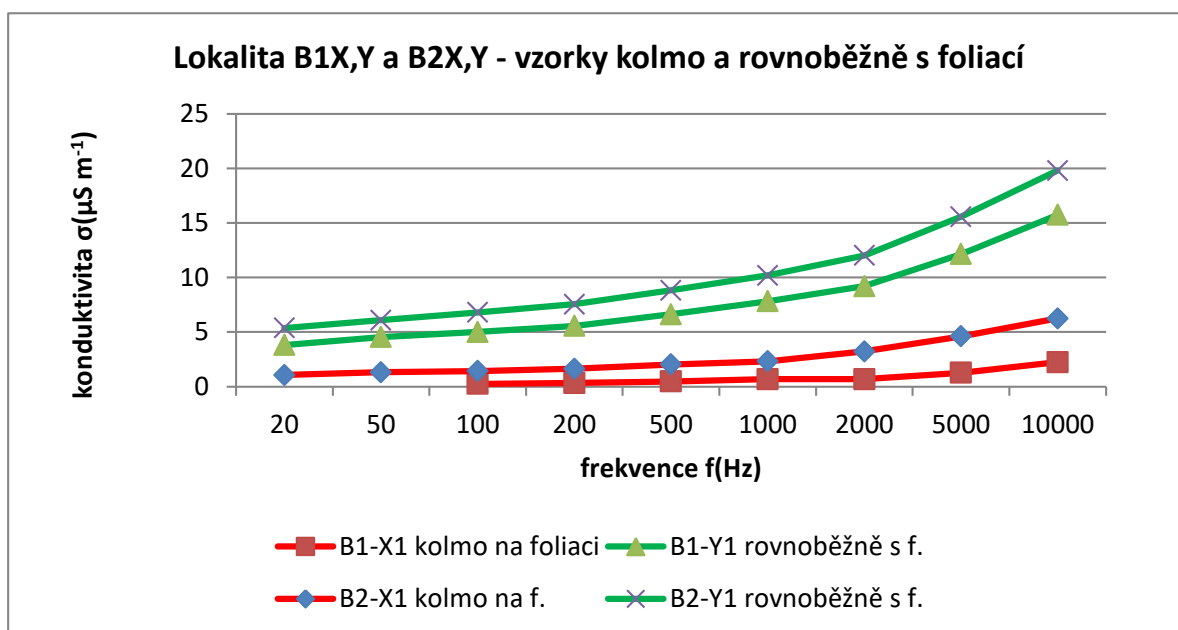
Tab. 22 Elektrická konduktivita $\sigma(\mu\text{S m}^{-1})$ u vzorků hornin z lokality PVP Bukov – vrty S-3, S-4 a B1, B2, B3 a B4

		frekvence f[Hz]								
Vzorek	Kód horniny	20	50	100	200	500	1000	2000	5000	10000
B1-1	RUL	18,81	21,22	23,26	25,03	27,32	29,40	31,69	36,00	41,05
B1-3	RUL	9,71	11,69	13,05	14,92	17,46	19,56	22,53	27,75	32,58
B1-4	RUL	8,20	10,71	12,30	13,76	16,09	18,12	20,56	24,84	29,88
B2-1	AMF	59,53	64,16	68,70	75,43	78,50	85,11	94,19	103,30	114,56
B2-2	AMF	7,66	8,52	9,65	10,72	12,56	13,59	15,45	19,03	23,44
B2-3	AMF	7,89	8,61	9,70	10,93	12,69	13,87	15,70	19,26	23,65
B3-1	MGM	8,04	10,16	12,00	14,86	17,74	20,58	24,05	29,44	35,00
B3-3	MGM	5,80	7,06	8,11	9,06	11,23	12,63	14,46	17,85	21,58
B3-5	MGM	3,53	3,89	4,32	5,00	5,46	6,01	7,25	9,90	12,12
B4-1	MGM	2,89	3,02	3,66	4,22	5,00	6,00	6,49	9,44	12,22
B4-2	MGM	2,44	2,75	3,53	4,00	4,83	5,75	6,93	9,24	11,96
B1-X1	RUL			0,25	0,32	0,48	0,68	0,68	1,28	2,23
B1-Y1	RUL	3,82	4,55	5,00	5,56	6,63	7,82	9,21	12,15	15,73
B2-X1	RUL	1,06	1,31	1,43	1,64	2,04	2,32	3,23	4,60	6,25
B2-Y1	RUL	5,38	6,09	6,81	7,55	8,83	10,20	12,02	15,57	19,80
S3-4B	MGM	2,56	3,01	3,90	4,60	5,01	6,01	7,25	9,43	12,59
S3-5	AMF	7,12	7,46	8,00	8,92	10,24	12,47	14,56	18,66	23,00
S4-3	AMF	8,01	8,94	9,98	11,45	12,88	14,12	16,71	19,00	22,02
	vodivost	$\sigma(\mu\text{S m}^{-1})$								
Legenda: RUL – ruly, AMF – amfibolity, MGM – migmatity, B1-X1 a B2-X1 jsou orientovány kolmo na foliaci ve směru měření a B1-Y1 a B2-Y1 jsou rovnoběžně s foliací										

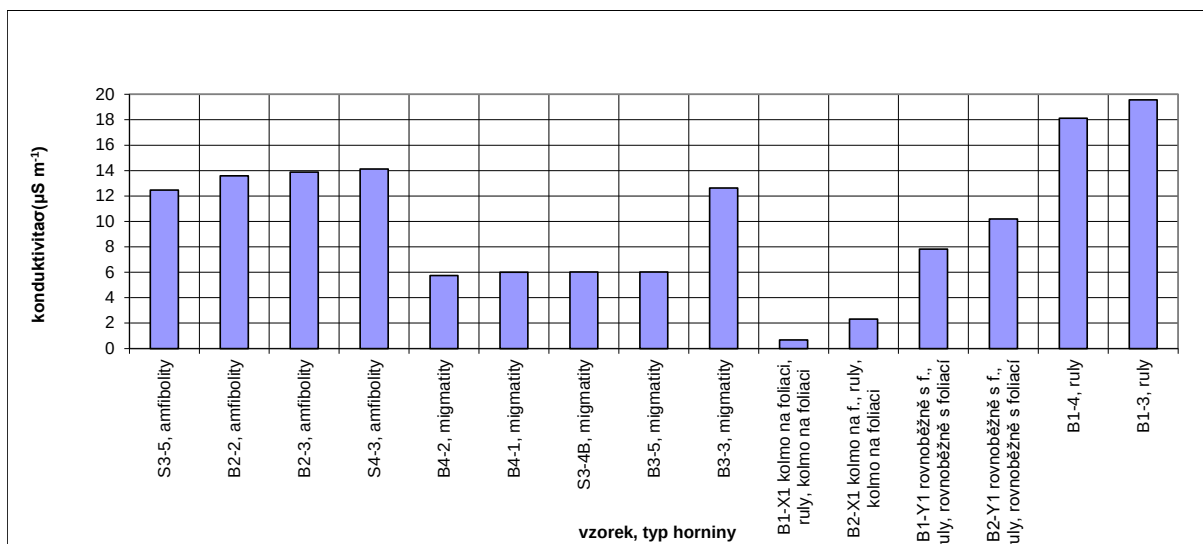
Na Obr. 92 jsou podobně znázorněny velikosti konduktivity měřené při frekvenci 1 kHz. Výsledky jsou prezentovány podle typů hornin. Nejnižší konduktivita byla zjištěna u vzorků rul ve směru kolmém na foliaci, nejvyšší konduktivity pak byly naměřeny na čelech jader B1, B2 a B3 – ty však v grafu nejsou zahrnuty z výše uvedených důvodů.



Obr. 90 Elektrická konduktivita v závislosti na frekvenci u orientovaných vzorků řady B1 až B4 – PVP Bukov



Obr. 91 Elektrická konduktivita v závislosti na frekvenci u vzorků řady B1,2 X,Y upravených ve směrech kolmo a paralelně s foliací – PVP Bukov



Obr. 92 Graf velikosti konduktivity hornin řady S-3, S-4 a B1, B2, B3, B4 při frekvenci 1 kHz, seřazeno podle typu hornin

2.2.4 Zhodnocení výsledků

V prostoru podzemní laboratoře Bukov byla provedena série petrofyzikálních měření na řadě vzorků hornin, které byly získány jednak ze skupiny vrtů označených jako S-1, S-2, S-3, S-4, a jednak z mělkých orientovaných návrťů řady B. Ve většině případů byla pro měření použita jádra (o průměru 48 mm a délce cca 40 mm) a postupně na nich byla provedena následující měření:

- magnetická susceptibilita (k), anizotropie magnetické susceptibility (AMS),
- hustotní parametry – objemová hustota (D_o), mineralogická hustota (D_m), pórovitost (Por),
- elektrické odporové vlastnosti (R),
- rychlosti elastických vln,
- laboratorní spektrometrie gama – obsahy U , $eU(Ra)$, eTh a K .

V souhrnném hodnocení data dále v textu blíže popisujeme a u vybraných parametrů řešíme také některé vztahy mezi nimi.

Hustotní parametry a magnetická susceptibilita

Hodnoty pórovitostí, mineralogických hustot a střední magnetické susceptibility u vrtů řady S-1 až S-4, B1 až B4 ve srovnání s archivovanými daty vzorků z povrchu

Data z podzemních vrtů řady S-1, S-2, S-3, S-4 a B1, B2, B3 a B4 byla statisticky zpracována a porovnána se vzorky z povrchu z archivních materiálů. Hodnoty z archivních materiálů představují vzorky z povrchu a jsou převzaty ze studie Hanáka et al. (2015). Zde byly charakterizovány hlavní horninové typy, a to:

- Ruly (pararuly) moldanubika, které byly odebírány v území ohraničeném obcemi Mitrov – Moravecké Pavlovice – Bobrová – Milasín. Jde o typy charakterizované jako pararuly se zastoupením biotitu, sillimanitu, biotitu ± cordieritu, muskovitu, granátu, případně + sillimanitu, biotitu.

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

- Migmatity až silně migmatitizované ruly strážeckého moldanubika jsou charakterizovány podle vzorků odebraných v území mezi Rožnou, Křižanovem a Rovným (lokalita jv. od Nového Města n. Mor.).
- Amfibolity strážeckého moldanubika byly odebírány v pruhu mezi Radešínskou Svratkou (SV) a Víckovem (JZ). Jde o amfibolity místy migmatitizované, nebo amfibolity až amfibolické ruly.

Ve vrtech řady S-1 až S-4 a řady B1 až B4 jsou rozlišovány ruly, pararuly, migmatity a amfibolity (až amfibolické ruly). Vzájemné relace pórovitosti, mineralogické hustoty a magnetické susceptibility mezi jednotlivými typy hornin lze dobře dokumentovat na Obr. 93, Obr. 94 a Obr. 95. Znázorňují aritmetický průměr (AM) a velikost směrodatné odchylky SD ($AM \pm 1/2 SD$). V případě magnetické susceptibility je vyneseno geometrický průměr. Do tohoto zpracování nejsou zařazeny vrty řady B5 až B10, neboť petrografické zařazení těchto vzorků bylo provedeno jen na základě fyzikálních parametrů, a to z důvodů uvedených výše v textu.

Pórovitosti jsou u vzorků z povrchu u rul a migmatitů vyšší – pohybují se kolem 2,5 %. Amfibolity pak mají zhruba hodnoty mezi 0,8 až 1,6 %. Horniny jsou ovlivněny povrchovým navětráním, amfibolity jsou oproti němu odolnější. Ve sledovaných vrtech jsou pórovitosti nízké, zvláště u vzorků řady B, kde nepřevyšují 1 %. To platí i pro dále hodnocený soubor B5 až B10 (viz Obr. 99).

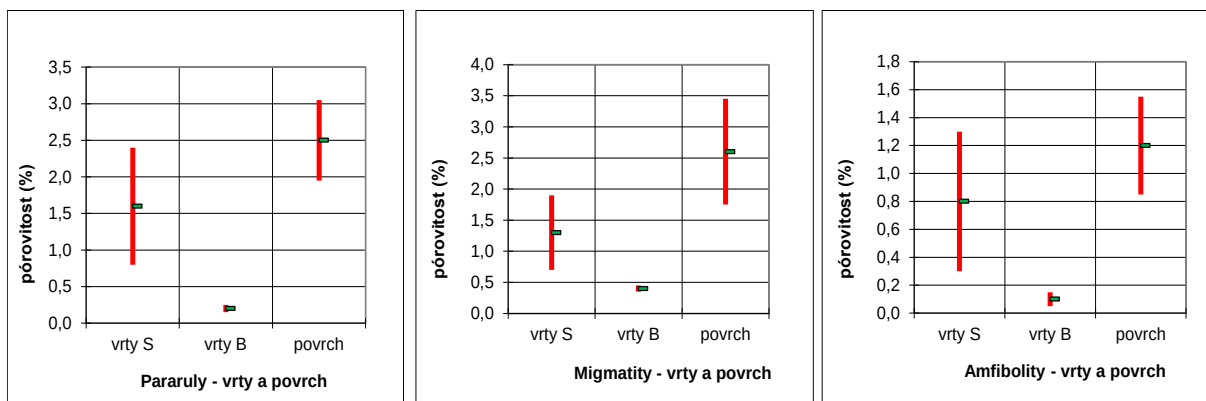
Mineralogické hustoty u rul z povrchu jsou mírně nižší ($2,74 \text{ g.cm}^{-3}$) než u jejich ekvivalentů z podzemí (kolem $2,84 \text{ g.cm}^{-3}$). Rozdíl v aritmetickém průměru je zhruba $0,1 \text{ g.cm}^{-3}$. Záleží na obsazích tmavých minerálů, zejména amfibolu a biotitu (hustota biotitu je uváděna mezi 2,70–3,40, u amfibolu pak 2,90 až $3,60 \text{ g.cm}^{-3}$). Podobná situace je u migmatitů, kde vzorky hodnocené z povrchu byly zřejmě převážně leukokrátního charakteru s průměrnou hustotou $2,65 \text{ g.cm}^{-3}$. Migmatity z vrtů S-1 až S-4 a B1 až B4 mají průměrnou mineralogickou hustotu 2,723, resp. $2,726 \text{ g.cm}^{-3}$. Rozdíly jsou dány poměrem leukosomu a substrátu, kdy při převaze leukosomu dochází většinou i ke snížení hodnot mineralogické hustoty, ale i magnetické susceptibility.

Průměrné hodnoty Dm u amfibolitů jsou oproti povrchu mírně nižší, u řady S je $AM=2,926$, řada B1 až B4 $AM=2,940 \text{ g.cm}^{-3}$.

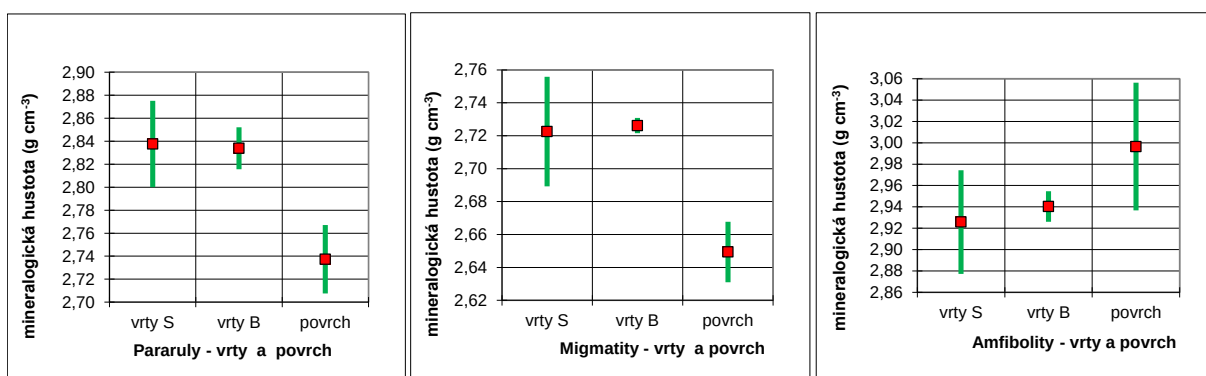
Rozpětí naměřených hodnot magnetické susceptibility u amfibolitů je v rozmezí 3 řádů. Kolísání susceptibility je většinou dáno nahodilou přítomností zrn feromagnetických minerálů ve vzorcích a obsahy tmavých minerálů. U migmatitů a rul z vrtů jsou hodnoty mírně vyšší, než u vzorků z povrchu, u rul se pohybují zhruba mezi 700 až $1000 \cdot 10^{-6} \text{ J. SI}$, u amfibolitů pak mezi $1000 \cdot 10^{-6} \text{ J. SI}$ u vrtů řady S, až $8000 \cdot 10^{-6} \text{ J. SI}$ u řady B1 až B4.

Ke srovnávaným parametrům je třeba poznamenat, že petrografické typy v podpovrchových vrtech a z odběrů na povrchu sice sobě v principu odpovídají, v důlním díle však jsou zastiženy horniny buď více či méně postihnuté sekundární alterací, nebo naopak tzv. zcela „čerstvé“. Jejich fyzikální vlastnosti se od typických rul, migmatitů a amfibolitů strážeckého moldanubika mohou lišit.

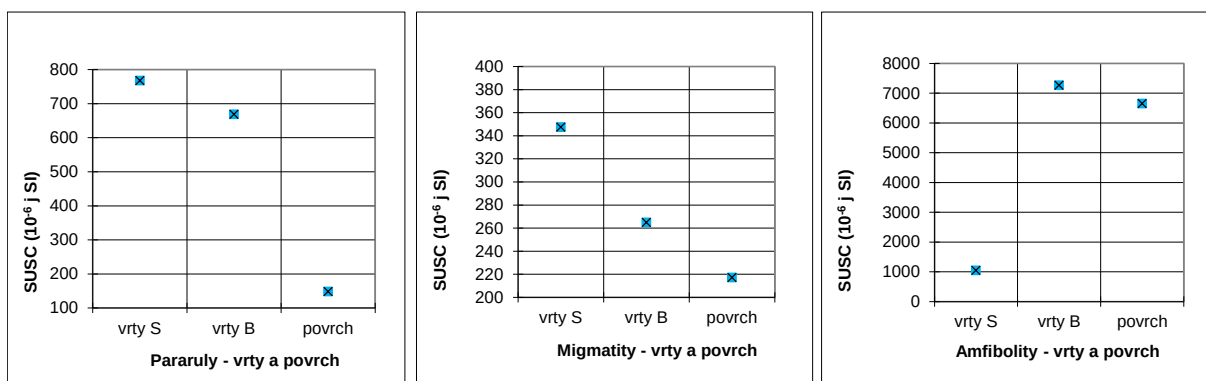
Lze konstatovat, že ve vrtech S a B1 – B4 jsou rozdíly mezi porovnávanými parametry a horninovými typy srovnatelné – to lze vztáhnout i na vzorky řady B5 až B10, která zde není zařazena, avšak v typech vymezených fyzikálně lze najít hodnoty ekvivalentní.



Obr. 93 Velikosti pórovitosti pararul, migmatitů a amfibolitů ve vrtech S-1 až S-4 a B1 až B4 a vzorcích z povrchu ($AM \pm 1/2 SD$)



Obr. 94 Velikosti mineralogické hustoty pararul, migmatitů a amfibolitů ve vrtech řady S-1 až S-4 a B1 až B4 a vzorcích z povrchu ($AM \pm 1/2 SD$)



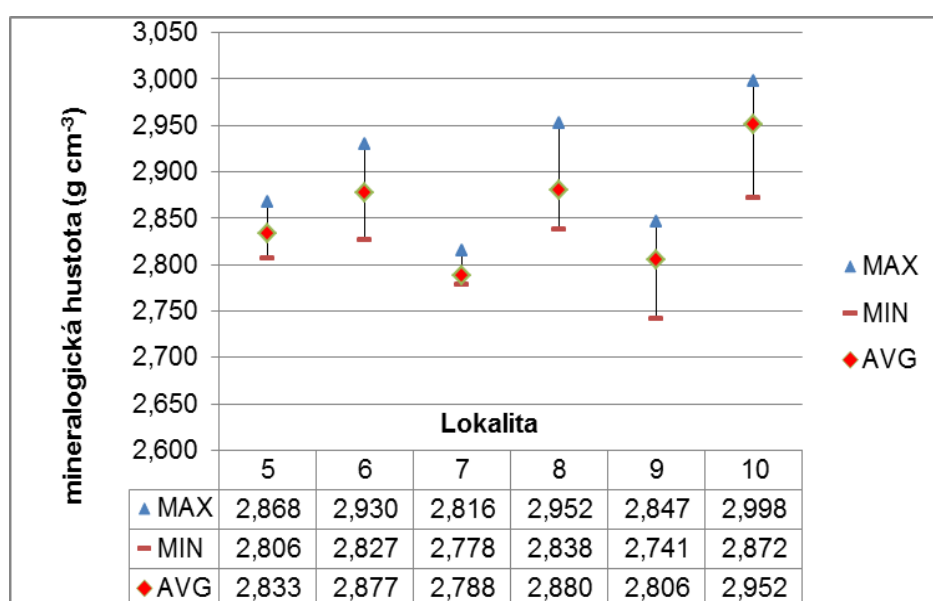
Obr. 95 Velikosti susceptibility (geometrický průměr) pararul, migmatitů a amfibolitů ve vrtech S-1 až S-4, B1 až B4 a vzorcích z povrchu

Hustotní parametry a magnetická susceptibilita u specializované série vzorků z vrtů B5 až B10

Soubor dat z této série vzorků byl blíže posouzen několika grafy a korelacemi parametrů. Rozsah hodnot mineralogické hustoty (D_m) na jednotlivých lokalitách B5 – B10 je znázorněn na Obr. 96. Ve zpracovaném souboru vzorků jde tedy zřejmě o ekvivalentní řadu hornin s výše sledovanými typy, a to s různým stupněm migmatitizace: od amfibolitů (D_m amfibolitů

v moldanubiku je udávána v rozmezí $2,95\text{--}3,10\text{ g.cm}^{-3}$), až po pararuly s Dm v hodnotách pohybujících se v intervalu $2,7\text{--}2,8\text{ g.cm}^{-3}$.

Na Obr. 97 je dobře patrný velký rozsah hodnot mineralogických hustot v jednotlivých měřeních na lokalitách B5 až B10, a to v relativně malém prostorovém rozsahu lokality. Hodnoty jsou seřazeny podle velikosti. Z grafu je zřejmé, že nejnížší zjištěné hodnoty (nejvyšší počet nízkých měření) byl zjištěn u lokality B7 (hodnoty Dm se pohybují mezi $2,782$ až $2,801\text{ g.cm}^{-3}$) a u lokality B9 (nejnížší naměřená hodnoty $Dm=2,741\text{ g.cm}^{-3}$). Naopak relativně nejvyšší naměřené hodnoty Dm převládají na jádrech lokality B10 – hodnoty se pohybují mezi $2,913$ až $2,998\text{ g.cm}^{-3}$. Na lokalitě B10, tedy mezi měřenými vzorky, nejpravděpodobněji převládají amfibolity – různou měrou migmatizované, naopak u lokalit B7 a B9 naopak spíše pararuly.



Obr. 96 Rozsah hodnot mineralogické hustoty (g.cm^{-3}) na jednotlivých lokalitách B5 – B10, kde (MAX) je maximum hodnot, (MIN) minimum a (AVG) aritmetický průměr

Je nutno zdůraznit, že hodnoty mineralogických hustot u této série jsou hodnotově velmi blízké stanoveným parametrům u série vrtů S-1 až S-4 a B1 až B4 a to ve vztahu k ekvivalentním typům hornin.

Na modelovém příkladu (Tab. 23) si můžeme ukázat, jak se mění mineralogická hustota (Dm) v závislosti na obsahu minerálních součástí v procesu migmatizace. Mineralogickou hustotu lze vypočítat z planimetrické analýzy, která je k dispozici např. u migmatitů z lokality Drátenická skála. I když se jedná o migmatity z jiné geologické oblasti (kutnohorská svratecká oblast - svratecké krystalinikum), jako modelový příklad závislosti mineralogické hustoty na minerálním složení lze údaje použít. Data jsou převzata z Mapového portálu ČGS.

<http://lokality.geology.cz/d.pl?item=7&id=794&Okres=ZR&vyb=1&text=Lokalita%20v%20okrese>

Modální analýza uvádí, že hornina je složena z křemene 42,6 %, K-živce 20,1 %, plagioklasu 29,3 %, muskovitu 4,3 %, biotitu 3,5 % a akcesorií 0,2 %. Petrograficky jde o dvojslídne, leukokratické migmatity. Leukosom převládá, melanosom tvoří tenké šliry a bloky v leukosomu.

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

Oproti stanovenému modálnímu složení jsme vytvořili teoretické modální složení pro řadu ortorula – migmatit – pararula. K výpočtu se použije vážený průměr s využitím tabelárních hustot minerálů a jejich procentního zastoupení.

U **migmatitu 1**, který je základem výpočtu (má planimetrickou analýzu), leukosom převládá, (melanosom tvoří tenké šlíry a bloky v leukosomu, typ Drátenická skála) s pozvolným přibýváním leukosomu (**migmatit 2, migmatit 3**) až do **biotitických pararul**, ve kterých převládá K-živec nad plagioklasem. Hustoty "migmatitů 1" (Drátenická skála) jsou blízké obecně pojato granitoidům (ortorulám). Teoreticky vypočtená hustota pararul odpovídá hustotám pararul moldanubika. V podmínkách prostorů PVP Bukov jde v podstatě při migmatitizaci hornin o podobný proces, jen místo slíd je přítomen ve větší míře amfibol. Tím by se v našem modelu navýšila i mineralogická hustota.

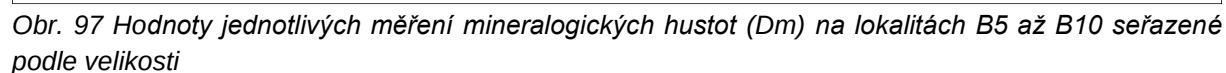
Tab. 23 Výpočet mineralogické hustoty Dm_{vyp} z modálního složení migmatitů lokality Drátenická skála a modelový výpočet mineralogické hustoty s měnícím se poměrem horninotvorných minerálů

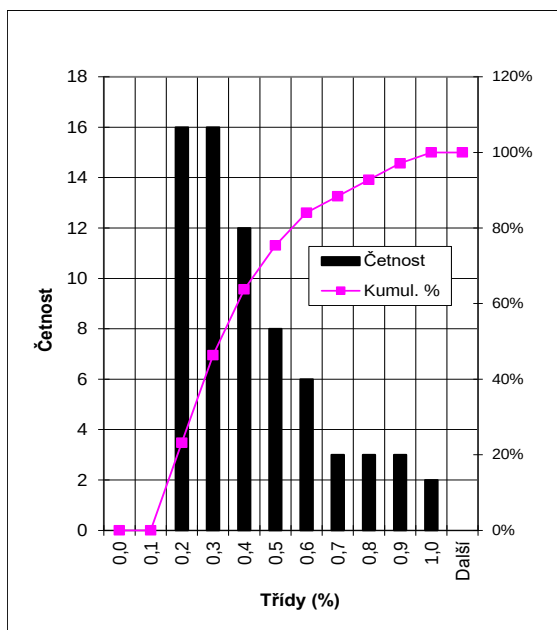
Migmatit 1 až ortorula planimetrická analýza Melichar ed. (2004)	křemen	K- živec	oligoklas plagioklas	muskovit	biotit	akcesorie	součet %
obsah minerálů v %	42,6	20,1	29,3	4,3	3,5	0,2	100
hustota minerálů (g.cm ⁻³)	2,65	2,56	2,62	2,90	3,00	3,50	Dm_{vyp} (g.cm⁻³) 2,648
migmatit 2 – model							
obsah minerálů v %	42,4	17,1	24,3	1	15	0,2	100
hustota minerálů (g.cm ⁻³)	2,65	2,56	2,62	2,90	3,00	3,50	Dm_{vyp} (g.cm⁻³) 2,684
migmatit 3 – model							
obsah minerálů v %	42,4	17,1	19,3	1	20	0,2	100
hustota minerálů (g.cm ⁻³)	2,65	2,56	2,62	2,90	3,00	3,50	Dm_{vyp} (g.cm⁻³) 2,703
pararula - model							
obsah minerálů v %	42,4	17,1	9,3	1	30	0,2	100
hustota minerálů (g.cm ⁻³)	2,65	2,56	2,62	2,90	3,00	3,50	Dm_{vyp} (g.cm⁻³) 2,741

Hodnocení pórovitosti u specializované série vzorků z vrtů B5 až B10

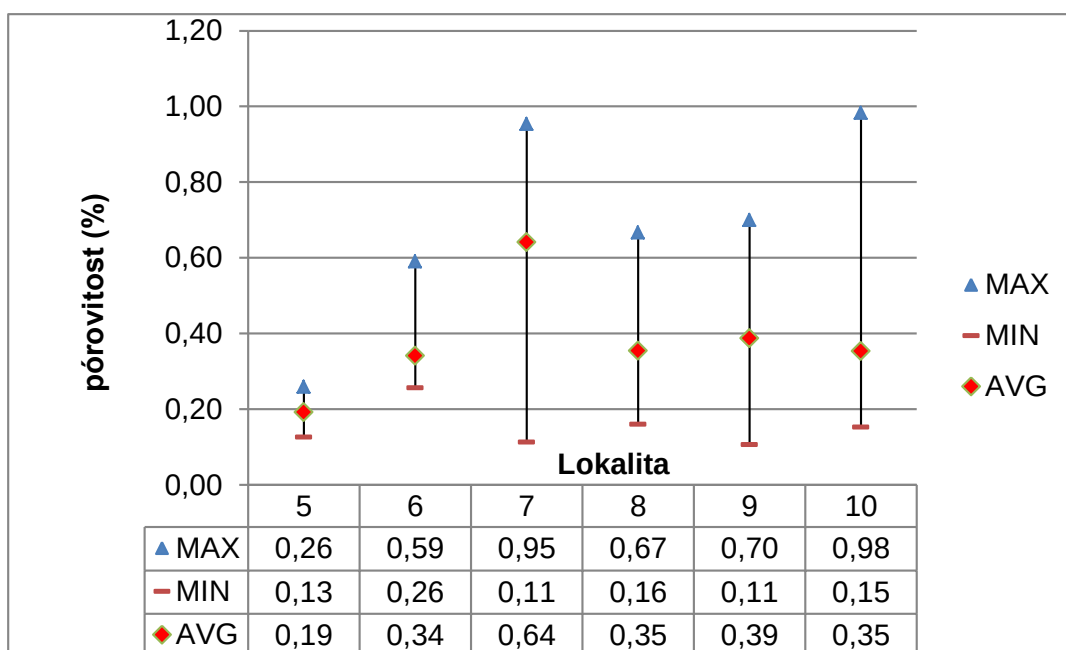
Histogram pórovitosti (Obr. 98) u lokalit B5 až B10 ukazuje, že hodnoty jsou u studovaných vzorků vždy <1 %. Lze soudit, že narušení těchto hornin endogenními (?) činiteli je relativně nízké. Rozdělení hodnot je asymetrické, kladná šikmost $k_3=0,96$ nasvědčuje na pravostrannou asymetrii. 84 % z celkového počtu měřených vzorků má $Por < 0,6$ %.

Na Obr. 99 jsou znázorněny rozsahy pórovitostí stanovené na vzorcích jednotlivých lokalit B5 až B10. Je zřejmé, že pórovitost je u všech sledovaných lokalit nízká, relativně nejvyšší pórovitosti byly stanoveny na lokalitě B7 (0,95 %) a B10 (0,98 %). Většina naměřených hodnot pórovitostí je však nízká, nejnižší hodnoty (0,11 a 0,13 %) jsou již na hranici citlivosti metody. Pórovitosti jsou velmi blízké i hodnotám naměřeným na sérii vzorků z mělkých vrtů řady B1 až B4.





Obr. 98 Histogram pórovitosti (Por) – lokality B5 až B10

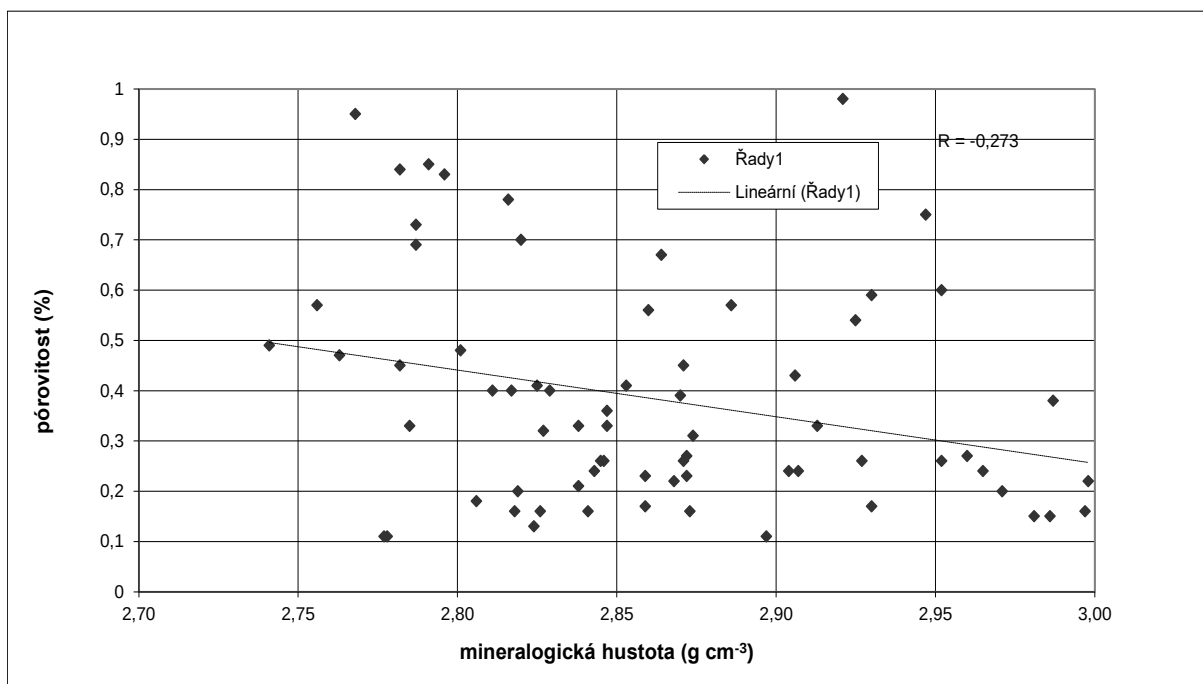


Obr. 99 Rozsah hodnot pórovitostí (%) na jednotlivých lokalitách B5 – B10, kde (MAX) je maximum hodnot, (MIN) minimum a (AVG) aritmetický průměr

Vztah mineralogické hustoty (Dm) a pórovitosti (Por) u specializované série vzorků z vrtů B5 až B10

Závislost těchto parametrů u lokality B5 až B10 je znázorněna na Obr. 100. Pórovitost a mineralogická hustota (Dm) vykazují statisticky významnou zápornou korelaci $R=-0,272$ při počtu měření $N=69$. Skutečnost nelze uspokojivě vysvětlit. Jedním z důvodů může být, že s klesající Dm stoupá obsah živců (ať už v amfibolitech, amfibolických rulách, nebo vlivem migmatizace – tedy zastoupením metatektu). Degradací živců stoupá pórovitost horniny. Živce v hornině jsou do jisté míry rozloženy téměř vždy. V případě našich vzorků je sice

pórovitost relativně nízká, přesto se záporná statistická závislost naměřených hodnot projevuje. Obecně lze konstatovat, že pokud dochází k „destrukci“ živců, tak ty jsou následně nahrazovány sericitem, chloritem, příp. sauritissovány. Tyto minerály mají relativně vysokou hustotu, proto Dm horniny jako celku roste. Tato obecná závislost platí ovšem pouze statisticky při zpracování řádově desítek vzorků. Diskutovaná závislost by tedy mohla indikovat jistou degradaci části živcové složky.

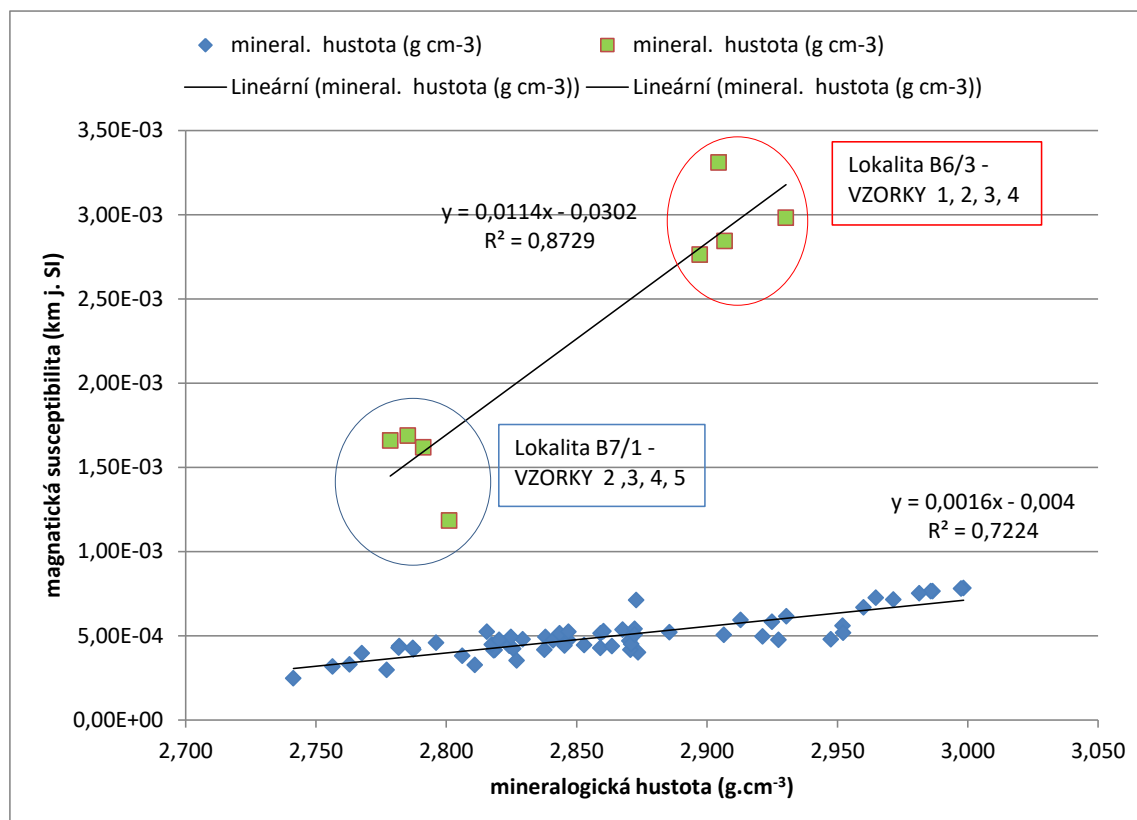


Obr. 100 Vztah mineralogické hustoty (Dm) a pórovitosti (Por) – lokality B5 až B10

Vztah mineralogické hustoty (Dm) a magnetické susceptibility (SUSC) u specializované série vzorků z vrtů B5 až B10

Vztahy těchto parametrů jsou znázorněny na Obr. 101. Měřené vzorky jsou zde podle velikosti susceptibility rozděleny do dvou souborů: $<1000 \cdot 10^{-6}$ a $>1000 \cdot 10^{-6}$ J. SI. Soubor s vyššími hodnotami byl odebrán z lokalit B6 a B7. Podle vztahu k velikosti Dm se lze domnívat, že z hlediska statistického rozdělení hodnot zde jde o soubory dva (tak jsou zde rozděleny). Upřesnění této zákonitosti by vyžadovalo podrobnější petrografické studium – eventuelně termomagnetickou analýzu pro určení nositele magnetizace.

Vztah mineralogické hustoty (Dm) a střední magnetické susceptibility (Km) je velice těsný a potvrzuje závislost magnetické susceptibility především na obsazích amfibolu a biotitu – s narůstající Dm se zvyšuje hodnota magnetické susceptibility. Koeficienty korelace pro soubor 61 vzorků $r=0,849$ při hranici spolehlivosti 0,254 a $r=0,934$ (kritická hranice 0,677) pro 8 vzorků, naznačují vysokou závislost obou sledovaných parametrů (více jak 95 %).



Obr. 101 Závislost mineralogické hustoty (D_m) a střední magnetické susceptibilitu u vzorků řady B5 až B10 z lokality PVP Bukov

Rychlosti elastických vln a elektrická konduktivita

Z výsledků stanovení těchto směrových parametrů vyplývá, že rychlosti P-vln se pohybují mezi 5,7 až 7,1 km.s⁻¹. Rychlosti S-vln jsou mezi 3,2 až 4,0 km.s⁻¹. Tomu odpovídá dynamický Youngův modul v rozmezí 72,9 GPa až 118,9 GPa, dynamický střížný modul 28,7 GPa až 47,0 GPa a dynamické Poissonovo číslo 0,21 až 0,29. Relativně nejvyšší hodnoty byly naměřeny u dvou vzorků amfibolitů (více jak 7 km.s⁻¹), nízké naopak u migmatitů (5,7 až 5,8 km.s⁻¹). Nízké hodnoty migmatitů jsou patrně zapříčiněny přítomností žilek leukosomu. V případě rul jsou dvě z nejnižších hodnot zřejmě způsobeny orientací měřeného vzorku ve směru kolmém na foliaci (6,0 až 6,2 km.s⁻¹), ve směru rovnoběžném s foliací jsou rychlosti výrazně vyšší a to 6,5 až 6,6 km.s⁻¹.

Z výsledků měření elektrické konduktivity je zapotřebí upozornit na vysoké hodnoty vodivosti stanovené na vzorcích z čel orientovaných jader B1, B2 a B3 (viz. Obr. 90). Tyto vodivosti nelze uspokojivě vysvětlit, zvláště když ostatní fyzikální parametry jsou tzv. v normálu. Důvodem může být kontaminace stěn rozrážky důlními vodami. Maximální hodnoty konduktivity dosahují až 85,11 $\mu\text{S m}^{-1}$ u amfibolitů, minimální pak u rul (0,68 $\mu\text{S m}^{-1}$) při frekvenci 1 kHz. Je doložena vyšší vodivost ve směru rovnoběžném s foliací a nižší ve směru kolmém, což je i v souladu s měřením rychlostí elastických vln.

Relace rychlostí elastických vln a elektrické konduktivity

Rychlost elastických vln a konduktivita ve významněji nenarušených a nealterovaných intruzívech a krystalických břidlicích je v určitém směru významně ovlivněna stupněm

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

přednostní orientace fylosilikátů (vrstevních silikátů) v hornině, resp. uspořádáním agregátů v ploše foliace. Pokud je posuzována anizotropie parametrů, pak stupeň přednostní krystalografické orientace horninotvorných minerálů (tj. orientace podle tvaru) v měřeném vzorku má v daném směru podstatný vliv jak na konduktivitu, tak i rychlosti elastických vln P a S.

Elektrickou konduktivitu v určitém směru zvyšuje počet paralelně orientovaných bazálních ploch minerálních zrn horninotvorných fylosilikátů přítomných ve vzorku. Je to způsobeno přítomností elektrické dvojvrstvy (v literatuře zavedený termín electrical double layer) na povrchu bází, je-li vzorek alespoň částečně nasycen vodou (elektrolytem), což odpovídá stavu námi měřených vzorků (laboratorní vlhkost). Plošky jednosměrně orientovaných bází zvyšují též rychlosti elastických vln (kmity „prokluzují“ po těchto ploškách).

Tyto víceméně teoretické předpoklady se uplatňují i na našich vzorcích. Lze je doložit prostředky jednoduché statistiky, a to s vyčíslením procentní pravděpodobnosti platnosti těchto zákonitostí.

K tomu účelu byla vyčíslena matice korelačních koeficientů naměřených hodnot konduktivit (při každé z použitých frekvencí) rychlostí P a S vln. Tabulka Tab. 24 uvádí tyto koeficienty párové korelace (r) mezi jednotlivými naměřenými hodnotami, a to jen v případech kladné významné korelace. Koeficienty r se teoreticky mohou pohybovat v rozmezí $+1;0;-1$. Čím je r bližší jedničce, tím těsněji oba srovnávané parametry souvisejí, ať již v kladném, či záporném smyslu. Procento pravděpodobnosti souvislosti, které je vyvozeno z velikosti R též závisí na počtu srovnávaných dvojic hodnot (zde počet dvojic $N=15$). Při $N=15$ vzorků je „kritická hodnota“ $r=0,592$. Tyto hodnoty r jsou hraniční, pokud je dosaženo pravděpodobnosti 95, 98 a 99%. Pravděpodobnost 95% bývá považována za tak vysokou, že může sloužit jako doklad vzájemné závislosti dvou párových hodnot naměřených na souboru vzorků. Zároveň dokladuje správnost provedení měření a použitých metodik. Z uvedených hodnot v tabulce tedy vyplývá statisticky významná kladná souvislost rychlostí elastických vln (P, S) s konduktivitou při všech měřených frekvencích (pravděpodobnost existence vztahu je 98–99 %). Očekávaná kladná závislost rychlostí elastických vln a pórovitosti nebyla prokázána. To zřejmě souvisí s velice nízkou pórovitostí hornin, kdy „kostra“ horniny a uspořádání minerálů je jak rychlostmi elastických vln, tak i elektrickou vodivostí upřednostňována.

Tab. 24 Tabulka významných koeficientů korelace petrofyzikálních parametrů – elektrická vodivost a měřicí frekvence, rychlost P- a S-vln

Tabulka významných koeficientů korelace petrofyzikálních parametrů									
	Vodivost při frekvenci Hz								
	20	50	100	200	500	1000	2000	5000	10000
rychlost P vln	0,690	0,688	0,678	0,663	0,673	0,665	0,657	0,668	0,684
rychlost S vln	0,736	0,728	0,724	0,713	0,719	0,718	0,717	0,729	0,745

Zároveň byla prokázána očekávaná, velmi těsná kladná souvislost konduktivit naměřených při různých frekvencích ($R>0,96$) a neexistující vztah mezi konduktivitou a pórovitostí v rozsahu $Por=0,0-1,0$ %.

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

Obsahy radioaktivních prvků.

Obsahy radioaktivních prvků byly stanoveny na souboru vzorků postihujících tři základní typy hornin na lokalitě PVP Bukov a to ruly, migmatity a amfibolity. Výsledky měření z řady vrtů S-1 až S-4 a B1 až B4 byly porovnány se vzorky z povrchu z archivních dat (viz Tab. 17). Platí zde stejně jako u hustotních parametrů, že obsahy radioaktivních prvků proti vzorkům z povrchu mohou být dosti odlišné, zejména když na lokalitě Bukov jsou charakterizovány převážně horniny s větším či menším obsahem amfibolu. Radioaktivita roste s obsahem biotitu, který je nositelem radionuklidů. To se projevuje především v obsazích U i Th, které jsou obecně nižší než u ekvivalentních hornin z povrchu.

Obsahy eTh, eU a K posuzované na lokalitách B5 až B10 (viz Tab. 19) u vzorků, které lze na základě fyzikálních parametrů zařadit k amfibolitům, jsou relativně nízké, u migmatitů až mnohonásobně vyšší. V tomto smyslu lze za "nízké" považovat obsahy Th ve vzorcích B6/2, B6/3, B8/1, B8/2. Naopak poměrně vysoké jsou ve vzorcích B5, B7, B9. Obsahy mohou reflektovat poměr substrát - metatekt. Obsahy K převážně závisejí na zastoupení K-živců, a to jak v primárním materiálu rul, tak i v leukosomu, tedy na poměru ortoklas - albit (oligoklas). Obsahy K méně ovlivňují obsahy fylosilikátů. Uran je v parametru eU(Ra) stanovován za předpokladu rovnováhy obou prvků jako Ra a U. Velikost rozdílu závisí na sekundární alteraci horniny, která bývá často způsobena exogenními vlivy recentního až subrecentního stáří. Poměr parametrů eU(Ra) a U u sledovaných horninových typů není významně narušen. S nízkými obsahy zejména uranu souvisí i hodnoty vypočtené tepelné produkce. U sledovaných hornin z PVU Bukov je tepelná produkce nízká, pohybuje se mezi 0,41 až 2,83 $\mu\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$.

Anizotropie magnetické susceptibility (AMS) je detailně hodnocena v kapitole 2.1.6.

2.2.5 Závěry petrofyzikálních analýz

Skupina studovaných vzorků z prostorů PVP Bukov představuje z petrofyzikálního hlediska málo homogenní soubor různých petrografických typů, jejichž klasifikace a další zpracování je tím pádem ztížena. Horniny lze zařadit jako ruly – migmatity – amfibolity s různou mírou migmatitizace. Úzký vztah mineralogických hustot a magnetické susceptibility ukazuje na významnou závislost těchto parametrů na minerálním složení horninových typů a oba tyto látkové parametry lze využít k dobré identifikaci horninového typu. S nárůstem obsahů tmavých minerálů narůstají hodnoty mineralogické hustoty a i magnetické susceptibility, opačně s vyšším obsahem metatektu tyto parametry klesají. Pórovitosti jsou u některých hornin velmi nízké, až na hranici citlivosti metody a jistě ovlivňují významným způsobem další zkoušky (propustnosti, transportní kapacity apod). S tím může souviset i stanovená kladná korelace pórovitosti a mineralogické hustoty, kterou bez hlubšího studia nelze objektivně objasnit. Obsahy eTh, eU a K jsou relativně nízké zejména u hornin klasifikovaných jako amfibolity, s narůstající migmatitizací, eventuelně s rostoucími obsahy biotitu až několikrát vyšší. Vztah U a eU (matematický poměr) naznačuje, že v recentní a subrecentní době nedocházelo k migraci uranu, jak by v této oblasti bylo možné očekávat. S nízkými obsahy zejména uranu souvisí i nízké hodnoty vypočtené tepelné produkce. Směrové parametry, jako jsou rychlosti elastických vln a elektrická konduktivita, indikují předpokládanou závislost – anizotropii měřených vzorků vůči směrům „foliací“, zároveň prokazují vzájemné korelace.

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

Docílené výsledky představují měření všech parametrů tzv. „metodou jednoho vzorku“ a nejsou tedy ovlivněny různorodostí horninového materiálu. O to více je zřejmé, že mezi jednotlivými lokalitami a i v hloubkových profilech jednotlivých jader je patrná výrazná látková variabilita. Fyzikální parametry mezi sebou vzájemně souvisí a lze je v podstatě rozdělit na látkové (hustoty, magnetická susceptibilita, radioaktivita) a „směrové“ (anizotropie magnetické susceptibility, rychlosti elastických vln a elektrická konduktivita). Jak lze z tohoto konstatování odvodit, látkové parametry citlivě reagují na minerální a chemické složení horniny, směrové parametry jsou mimo to i ovlivněny strukturními a texturními znaky. Navazující metody, jako jsou např. tepelné vodivosti, propustnosti, sorpční kapacity apod., s těmito parametry úzce souvisí. Je zřejmé, že při přípravě vzorků pro výzkumné postupy je nutné výběru vzorků věnovat mimořádnou pozornost, tak aby komplex metod byl prováděn pokud možno na petrograficky i fyzikálně homogenním vzorku. Jinak docílené výsledky mohou být do jisté míry zavádějící.

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

2.3 Spektrální analýza vrtného jádra

2.3.1 Úvod

Účelem spektrální analýzy vrtného jádra je demonstrovat možnosti identifikace základních horninotvorných minerálů, zón zvýšené alterace a struktur křehkého porušení hornin s využitím hyperspektrálních dat. Optimální předúpravou, jako u ostatních analytických metod, je nařezání jádra. Poté se však jedná o neinvazivní metodu, kdy nedochází k další destrukci vzorků jader. Hlavním záměrem bylo otestovat a navrhnout metodiku, která by umožnila rychlé „zmapování“ a vyhodnocení vrtných jader na kvalitativní či semikvantitativní úrovni. Toto vyhodnocení je postaveno na fyzikálním základu, měření fyzikální veličiny „reflektance“. Reflektanční záznam (spektrální křivka) každého povrchu přímo odráží jeho fyzikální a chemické vlastnosti. Spektrální analýza tak představuje úlohu, kdy pomocí aplikace matematických či statistických metod kvantifikujících trend spektrální křivky lze modelovat fyzikální a chemické parametry snímaného povrchu. Optickým spektrometrem může být buďto přístroj pořizující spektrální záznam měřeného bodu či obrazový skener pořizující kontinuální obrazovou matici (x, z) s další spektrální dimenzí.

V níže řešené úloze byla analyzována hyperspektrální (HS) obrazová data snímaná v celém optickém rozsahu (0,4-2,5 μm) elektromagnetického spektra (EMS). V rámci optické části EMS lze přímo identifikovat např. sekundární minerály (produkty oxidace a zvětrávání), jednotlivé jílové minerály a karbonáty. Silikátové minerály nevykazují přímé absorpční příznaky v optické části elektromagnetického spektra. Lze je však detekovat nepřímo, jelikož i tak ovlivňují celkový průběh spektrální křivky.

2.3.2 Úvod do obrazové spektroskopie

Obrazová spektroskopie (Imaging spectroscopy) je vědní obor zabývající se vztahem mezi elektromagnetickým zářením a povrchem, se kterým toto záření interaguje. Podoba této interakce je ovlivněna různými vlastnostmi dané látky/materiálu. V případě minerálů se jedná o chemické složení (např. přítomnost chemických skupin jako – OH, CO_3^{2-} , Fe^{3+} , biochemické vlastnosti listoví apod.), popřípadě o fyzikální vlastnosti (např. velikost zrnitostní frakce či obsah vody). Tyto vlastnosti jsou pro zkoumané minerály charakteristické, a lze je využít k jejich identifikaci, jelikož ovlivňují průběh a tvar měřené spektrální křivky. Mezi nejvýraznější projevy patří tzv. selektivní absorpce na specifických vlnových délkách. Podle těchto charakteristických „otisků“ (tzv. absorpčních maxim), které jsou přítomné na daných vlnových délkách, lze látku/materiál identifikovat, přičemž intenzita absorpce (tzv. absorpční hloubka) umožňuje přesnější určení jejího množství či koncentrace ve zkoumaném objektu. V obrazové spektroskopii čerpáme spektrální informaci ze záření, které je od zkoumané látky odraženo (tzv. reflektance) nebo je touto látkou vyzařováno (tzv. emitance). V případě odraženého záření pracujeme s oborem viditelného, blízkého a krátkovlnného infračerveného záření, tedy vlnové délky 0,4 až 2,5 μm .

Začátky obrazové spektroskopie sahají do 70. let 20. století, kdy vědci z NASA začali provádět první podpurná měření pro satelitní misi LANDSAT-1 využívající přitom pozemní spektrometr (Goetz 2009). První obor, v němž na začátku 80. let obrazová spektroskopie našla své uplatnění, byla geologie, kdy byla HS obrazová data s úspěchem použita pro mapování cílových minerálů (Goetz et al. 1982). Tato disciplína se díky své univerzálnosti

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

pak velmi rychle rozšířila do oblasti pedologie, biologie i do dalších oborů. V současné době jsou tyto metody využívány např. i v oblasti medicíny či potravinářství.

Obrazové skenery jsou umísťovány na letadla, ve fázi před vypuštěním je několik hyperspektrálních družic (např. EnMap <http://www.enmap.org/>). Hyperspektrální kamery pořizující data v menším rozsahu optického spektra jsou vyráběny i pro bezpilotní letadla. Vedle těchto aplikací existují speciální skenovací boxy s integrovanými HS senzory konstruované přímo pro systematické skenování a vyhodnocení vrtných jader (např. SisuROCK, SPECIM <http://www.specim.fi/products/sisurock-hyperspectral-core-imaging-station/>). Dále existují obrazové skenery (sisuCHEMA <http://www.meteo-tech.co.il/ImagesDownloadFiles/Sisuchema.pdf>, SPECIM) umožňující analýzu relativně malých vzorků/objektů (šířka: 10-100 mm, tloušťka do 40 mm).

2.3.3 Metodika zpracování vrtného jádra

Výběr vzorků

Výběr vhodných vzorků vrtných jader byl prvním krokem řešené úlohy. Vlastnímu výběru však předcházelo seznámení se s rešeršním popisem vrtů a vytipování zajímavých poloh z pohledu mineralogie. Vlastní výběr jader pak proběhl v září 2015, kdy bylo vybráno 22 vzorků z různých poloh vrtných jader S-1 (v rámci metráže 0-50 m) a S-2 (v rámci metráže 0-120 m), tak aby byla postihnuta celková minerální variabilita. Vybrané vzorky byly dovezeny do ČGS a následně nařezány (říjen 2015, ARCADIS). V listopadu 2015 byl vytvořen návrh designu pořizování vlastního měření.

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

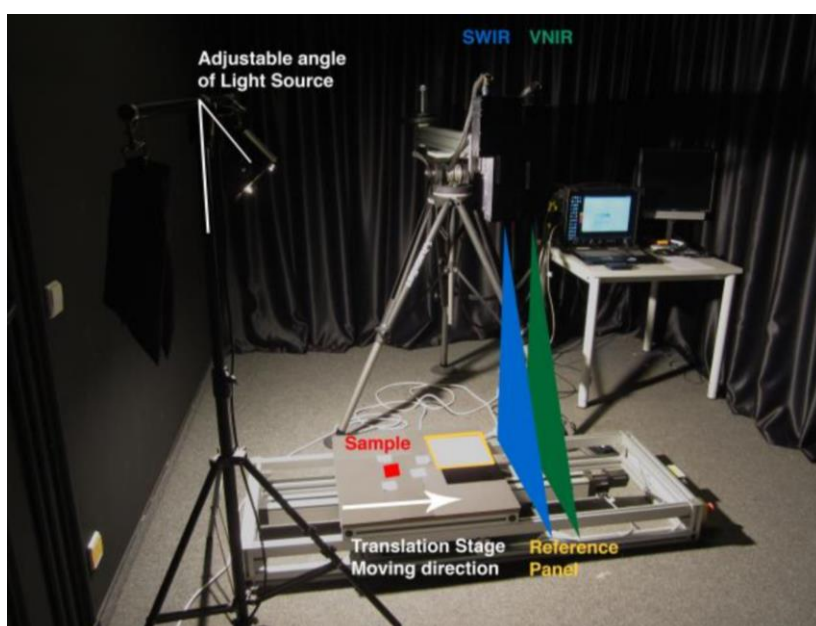
Tab. 25 Přehled vybraných vzorků vrtných jader S-1 a S-2 pro spektrální analýzu, dále je uvedeno, zda byl dělán k danému vrtnému jádru výbrus a jeho následná mineralogická identifikace

číslo	jádro	metráž [m]	výbrus	název horniny
1	S1	13,4–13,55	01	Amfibolická rula s granátem
2	S1	30,6	03	Leukokráttní granit s žilkami vyplněnými laumontitem
3	S1	29,4		
4	S1	37,8–37,9	4 A, 4 B	4 A: amfibolická migmatizovaná rula 4 B: migmatizovaný amfibolit s biotitem, křemennými žilkami a vytavenými křemen-živc. pásy
5	S1	42,7–42,8		
6	S1	37,1–37,2		
7	S1	47,3–47,4	07	Amfibolit s biotitem, křemennými žilkami a žilkou vyplněnou prehnitem
8	S1	49,9		
9	S2	118,4–118,5		
10	S2	109,4	10 A, 10 B	Amfibolický chloritizovaný granit
11	S2	104,5		
12	S2	80,9		Amfibolit s granátem a biotitem, s křemen-kalcitovými žilkami
13	S2	78,5		
14	S2	50,7		
15	S2	18,7		
16	S2	36,4–36,5		
17	S2	36,7		
18	S2	26,5–26,6	18	Muskovit-biotitický granit
19	S2	24,8		
20	S2	7,9	20 A, B	20 A: amfibolická migmatizovaná rula, hydrotermálně alterovaná 20 B: migmatizovaný amfibolit se silnou sericitizací živců
21	S2	96,3–96,4	21	Zvrásněná migmatizovaná amfibolická rula s biotitem a taveninovými kapsami
22	S2	99,8		

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

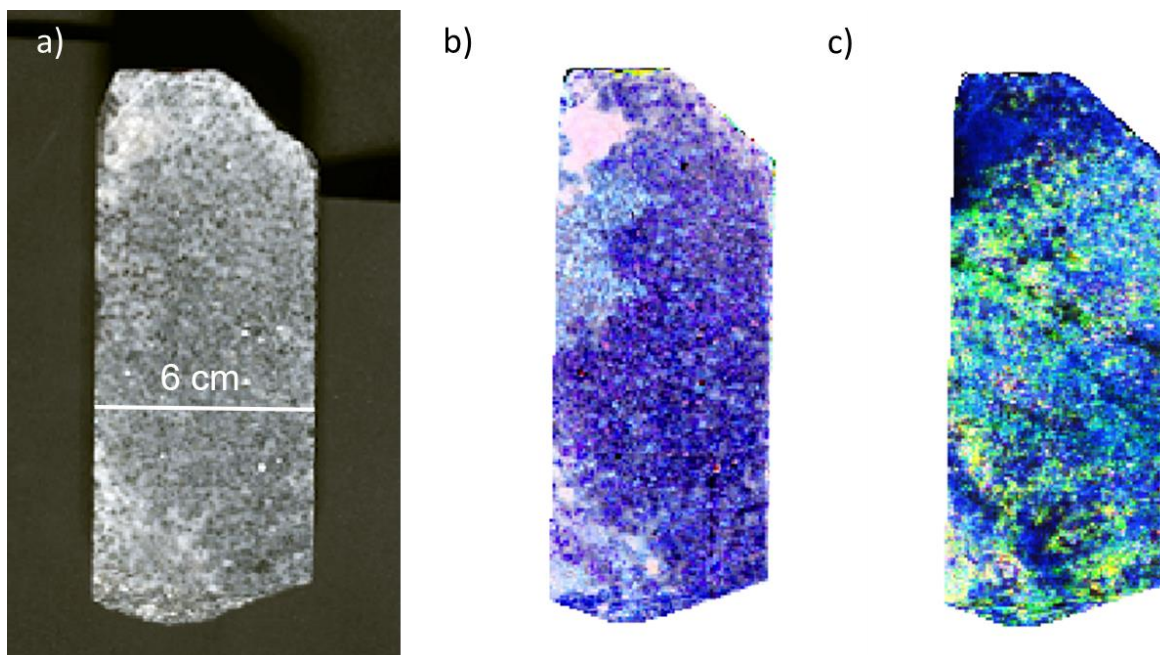
Pořízení obrazových hyperspektrálních dat

V rámci ČR neexistuje žádný subjekt disponující potřebným technologickým vybavením pro hyperspektrální skenování vzorků v laboratorních podmínkách. Vzorky vrtných jader tak byly převezeny na pracoviště GFZ (Helmholtz Centre Potsdam: German Research Centre For Geosciences, Potsdam), kde byly skenovány pod vedením Dr. Christiana Rogasse v místní laboratoři pomocí 2 obrazových spektrometrů HySpex (Obr. 102; High Resolution, High Speed, Hyperspectral Cameras for Laboratory, Industrial and Airborne Applications, SPECIM, HySpex VNIR 1600/SWIR320 m-e). První senzor měří v rozsahu 400-1000 nm (HySpex VNIR), přičemž druhý pokrývá rozsah 1000-2500 nm (HySpex SWIR). Spektrální rozlišení senzoru je 4 nm (HySpex VNIR), respektive 6 nm HySpex (HySpex SWIR). Při skenování byl aplikován protokol místní laboratoře (Koerting et al. 2015).



Obr. 102 Schématické znázornění geometrie snímání (převzato z Koerting et al. 2015)

Obrazová data vrtných jader byla před vlastní analýzou dále upravena. Data z obou senzorů byla převedena do jedné obrazové matice se spektrálním rozsahem od 400 do 2500 nm (tzv. ko-registrace, Rogass et al. 2013) a převzorkování na vyšší prostorové rozlišení metodou „Nearest Neighbour“. Dále byla zavedena transformace radiance (původní digitální hodnoty pixelů) na reflektanci (fyzikální veličina) se zavedením korekce na bílou referenci (bílý terč se standardizovanou reflektancí 99,9%). V dalším kroku byl aplikován filtr vyhlazující šum spektrálních křivek.



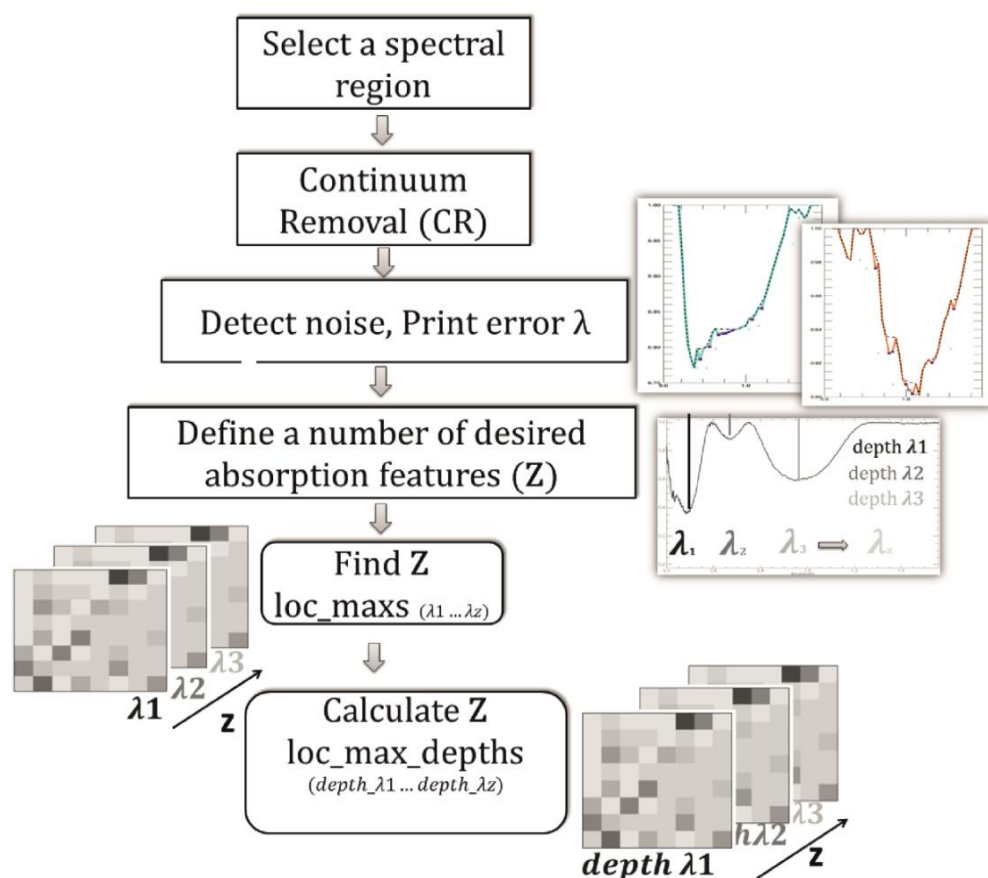
Obr. 103 Ukázka obrazových HS dat: (a) vzorek vrtného jádra v pravých barvách, jak ho vidí lidské oči, (b) stejný vzorek s použitím kombinace RGB pásem v oblasti VNIR (R: 858 nm, G: 651 nm, B: 549 nm), (c) stejný vzorek s použitím kombinace RGB pásem v oblasti SWIR (R: 1885 nm, G: 2204 nm, B: 2240 nm)

Analýza hyperspektrálního obrazu vrtných jader

Obrazová data byla analyzována s využitím nového toolboxu vyvíjeného pracovištěm DPZ na ČGS (Kopačková a Koucká 2014; Van der Meer et al. v recenzním řízení). Jedná se o nástroj, který prochází jednotlivé pixely a automaticky identifikuje uživatelem zvolený počet lokálních absorpčních maxim. Jak již bylo vysvětleno, v závislosti na chemickém složení studované látky/povrchu dochází na specifických vlnových délkách k absorpci, tato místa vykazují nižší reflektanci (odrazivost). Zjednodušeně lze říci, že vlnová délka, na které dochází k této specifické absorpci, určuje, o jakou látku se jedná, přičemž hloubka absorpce pak odráží množství dané látky. U směsných materiálů, které se nejčastěji vyskytují v přírodním prostředí, pak spektrální křivka vykazuje vícečetná absorpční maxima. Přesnou identifikaci vlnových délek specifických absorpcí přítomných ve spektrálním záznamu lze definovat složení (a relativně i množství) heterogenního materiálu v daném pixelu.

Problém určení přesné vlnové délky absorpčního maxima je doposud řešen pomocí interpolací (např. lineární interpolace: Van der Meer 2004, aplikace kvadratické funkce: Rodger et al. 2012). Tyto metody mají však limitované využití, lze je použít pouze pro krátkovlnnou část infračerveného spektra (SWIR) a pro detekci pouze jednoho absolutního maxima. Pro detekci tzv. vícečetných absorpčních maxim neexistují doposud žádné softwarové nástroje (ani jako součást běžně používaných software – ENVI, ERDAS). Proto se tým DPZ na ČGS zaměřil na vytvoření souboru nástrojů umožňující automaticky detekovat vícečetná absorpční maxima, respektive derivovat automaticky jejich parametry (absorpční vlnová délka a absorpční hloubka). Soubor nástrojů vyvíjený českým týmem byl pojmenován QUANTools a je určen pro software ENVI 5.0 (a vyšší), přičemž programování probíhá za pomoci programovacího jazyka IDL (8.2).

Princip detekce je postaven na analýze trendu spektrálního záznamu. Schéma jednotlivých procesních kroků je uvedeno na Obr. 104. Pokud je požadován počet Z absorpčních maxim, výstupem je nový rastr, který má Z pásem. V prvním pásmu každý pixel obsahuje informaci o vlnové délce, na které dochází k nevýraznější absorpci, v druhém pásmu každý pixel obsahuje informaci o vlnové délce, na které dochází ke druhé největší absorpci atd. Současně s tímto Z -pásemným rastrem se zapsanými vlnovými délkami, na kterých bylo detekováno Z absorpčních maxim, je vytvořen i další Z -pásemný rastr, který nese informaci o tzv. „hloubkách“ příslušných absorpčních maxim. Absorpční hloubka pak přímo koreluje s relativním obsahem příslušného materiálu, jenž je identifikován pomocí vlnové délky, na které dochází k absorpci.



Obr. 104 Schematické znázornění procesních kroků nově vytvořených nástrojů QUANTools

Na začátku uživatel volí spektrální region, který bude analyzován a počet absorpčních maxim, které chce detekovat. Poté může zvolit detekci šumu/chybových pásem (tato volba je doporučena pro region viditelné a blízké infračervené části elektromagnetického spektra - VNIR, podrobně dále rozebráno v části „Detekce šumu“). V posledním kroku uživatel volí název a umístění nových dat, Z -pásemný rastr s vlnovými délkami absorpčních maxim a Z -pásemný rastr s hloubkami příslušných absorpčních maxim. V současné době toolbox umožňuje automatizovanou analýzu jak obrazových HS dat, tak i spektrálních knihoven (tabulární data).

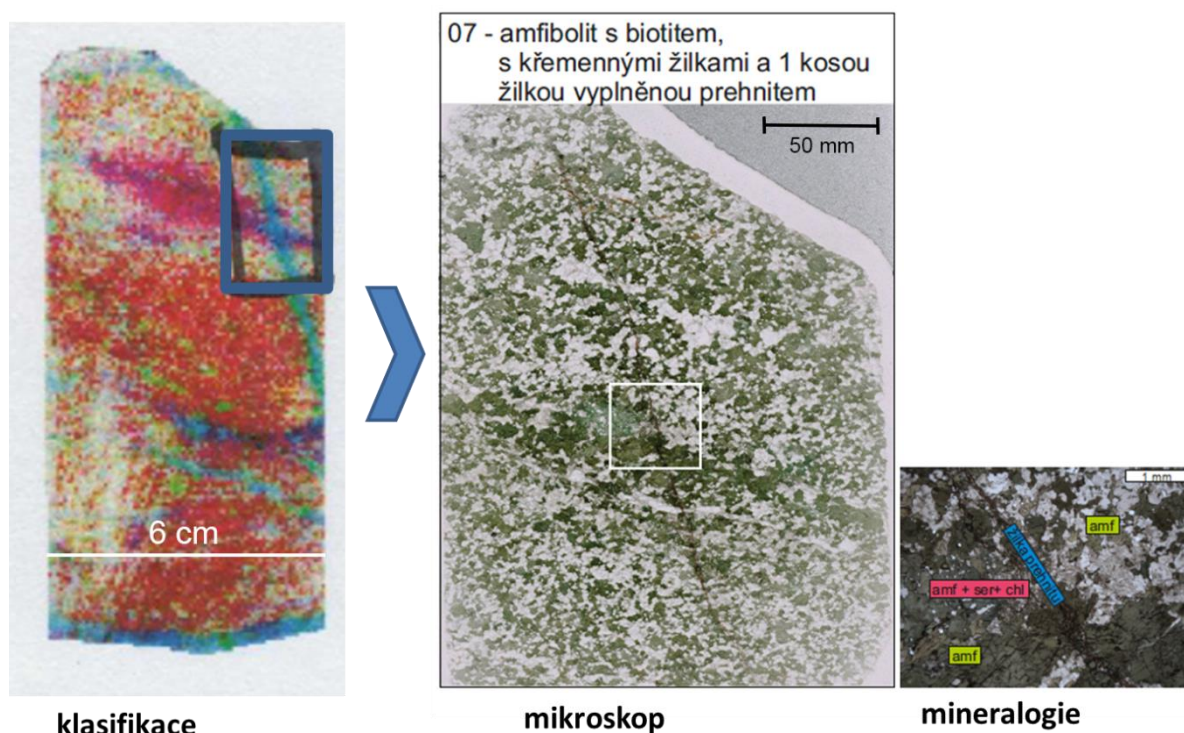
Výsledný produkt/výstup těchto nástrojů pak lze jednoduše upravit do výsledné formy/klasifikace pomocí standartních nástrojů, v našem případě byl pro finální rozdělení

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

klastrů-tříd použit klasifikátor K-mean, maximální počet tříd byl nastaven na 20, obrazová data byla dále filtrována mediánovým filtrem v nadefinovaném okně 3x3 pixely.

Geologická validace automatické klasifikace

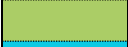
Třídy klasifikované na podkladě HS obrazových dat byly konfrontovány s expertním posouzením petrologa (dr. Radmila Nahodilová) a s výsledky 11 výbrusů (viz Tab. 25), které byly na vybraných analyzovaných vzorcích vrtných jader provedeny. Tato integrace umožnila nadefinování 14 společných tříd (Tab. 26), jimž bylo možné přiřadit petrologický/mineralogický význam. Výsledky klasifikace obrazových dat HySpex byly v posledním kroku reklasifikovány do těchto 14 mineralogických tříd.



Obr. 105 Obrazová HS obrazová data HySpex byla normalizována, pro zvýraznění minerální variability vzorků vrtných jader byly použity různé kombinace pásem v oblasti infračervené části EMS. Na jejich podkladě byly vymezeny mineralogicky zajímavé oblasti, pro které byl posléze dělán výbrus a mineralogická identifikace

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

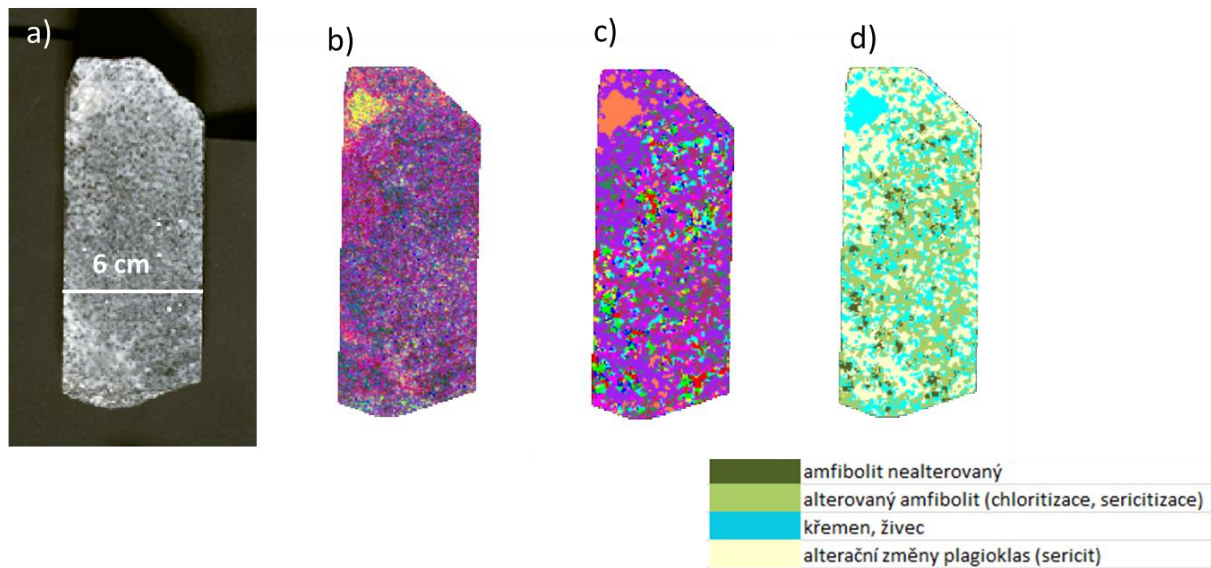
Tab. 26 Nadefinované minerální třídy na podkladě výsledků petrologického studia výbrusů. Výsledky automatické klasifikace obrazových dat HySpex byly v posledním kroku reklasifikovány do těchto 14 mineralogicko-petrografických tříd

	amfibolit nealterovaný
	alterovaný amfibolit (chloritizace, sericitizace)
	křemen, živec
	křemen, živec, alterovaná slída (biotit, chlorit)
	alterační změny plagioklas (sericit)
	biotitický amfibolit (příp. amfibolit s biotitem)
	alterovaná slída (chlorit, biotit)
	prehnit
	sericit
	biotit
	granát
	křemen
	laumontit
	kalcit

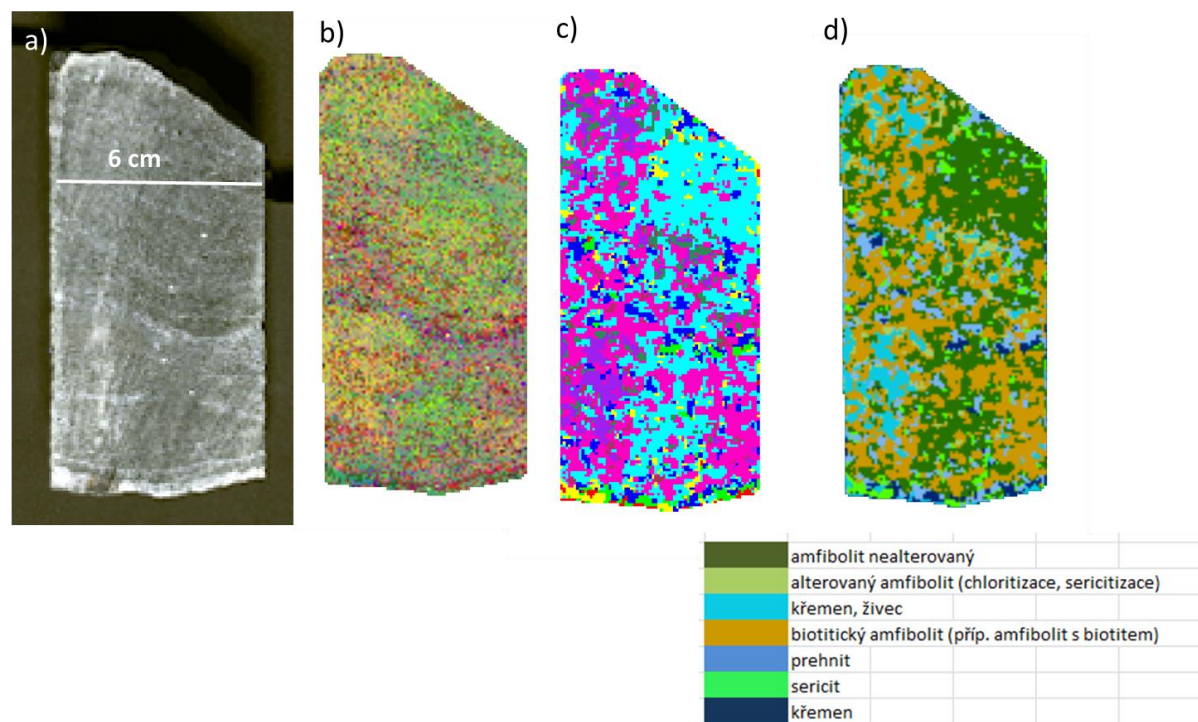
2.3.4 Výsledky

Obr. 106 - Obr. 111 demonstrují na různých vzorcích vrtných jader výsledky klasifikace hyperspektrálních obrazových dat HySpex. Pomocí výše popsané metody, bylo možno provést rychlou automatickou klasifikaci těchto dat. Hlavní výhodou námi testovaného postupu/metody je fakt, že není potřeba před vlastní klasifikací nadefinovat trénovací množiny či spektra známých minerálů (tzv. koncové členy), což je základní podmínka běžně používaných metod klasifikace HS dat. Naše metoda je vhodná pro vyhodnocení a klasifikaci i velkého počtu skenů/vzorků, čímž by mohla být metoda velmi dobrým způsobem, jak „petrograficky“ kvantifikovat složení vrtných jader ve velmi krátkém čase.

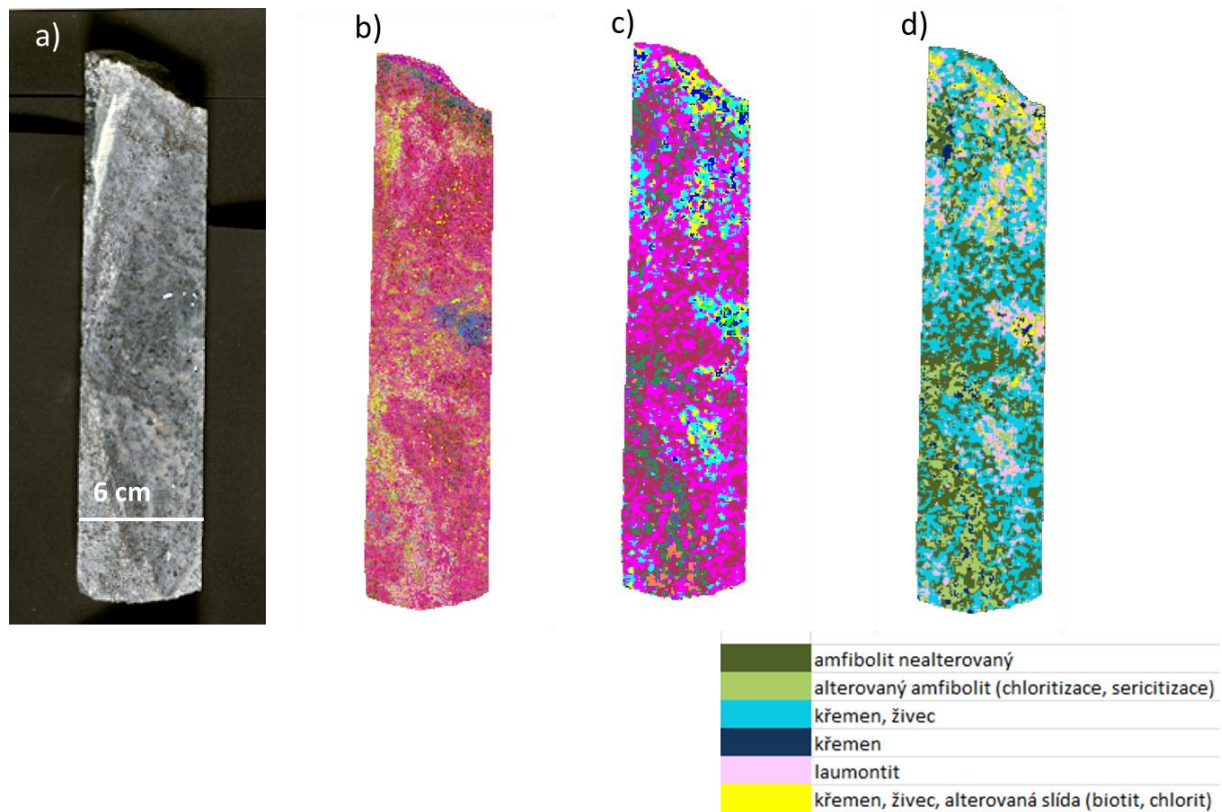
Těžištěm finální reklasifikace byla spolupráce s petrology, kdy třídy klasifikované automaticky byly konfrontovány s expertním posouzením a s výsledky studia výbrusů. Tato integrace umožnila nadefinování 14 společných tříd s přiřazeným petrologického/mineralogického významu. Bylo možné identifikovat jak minerály, které mají přímé spektrální projevy v optické části EMS (0,4-2,5 μm), tak i např. křemen, který nemá specifické absorpce v této části EMS. Vedle vlastních minerálů (amfibolit, křemen, živec, kalcit, laumontit, granát, prehnit) bylo možné úspěšně identifikovat i jejich alterační změny s výskytem minerálů - chlorit, biotit a sericit.



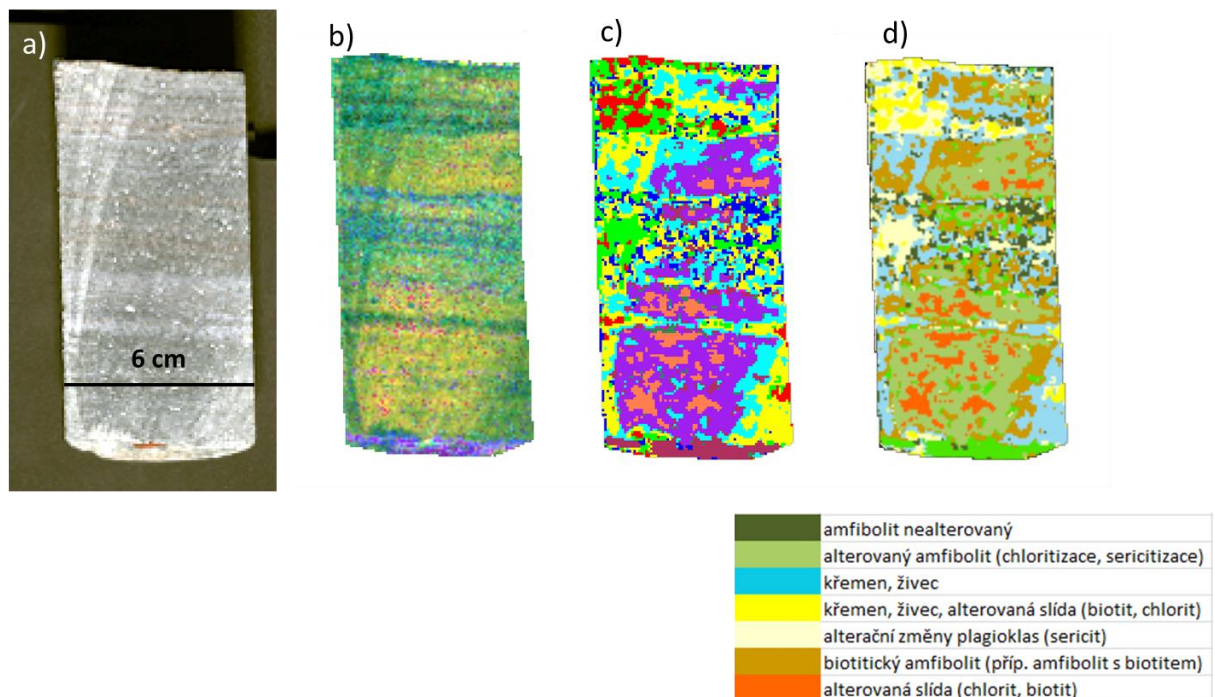
Obr. 106 Výsledky klasifikace obrazových dat HySpex: (a) vzorek vrtného jádra (č. vzorku 19, S-2) v pravých barvách, jak ho vidí lidské oči, (b) rastr ukazující variabilitu detekovaných vlnových délek absorpčních maxim (produkt derivovaný s využitím nástrojů QUANTools); tento produkt/výstup byl následně automaticky klasifikován s využitím klasifikátoru K-mean (c) a v posledním kroku reklasifikován do mineralogicko-petrografických tříd nadefinovaných na podkladě analýzy výbrusů (d)



Obr. 107 Výsledky klasifikace obrazových dat HySpex: (a) vzorek vrtného jádra (č. vzorku 7, S-1, amfibolit s biotitem, křemennými žilkami a žilkou vyplněnou prehnitem) v pravých barvách, jak ho vidí lidské oči, (b) rastr ukazující variabilitu detekovaných vlnových délek absorpčních maxim (produkt derivovaný s využitím nástrojů QUANTools); tento produkt/výstup byl následně automaticky klasifikován s využitím klasifikátoru K-mean (c) a v posledním kroku reklasifikován do mineralogicko-petrografických tříd nadefinovaných na podkladě analýzy výbrusů (d)

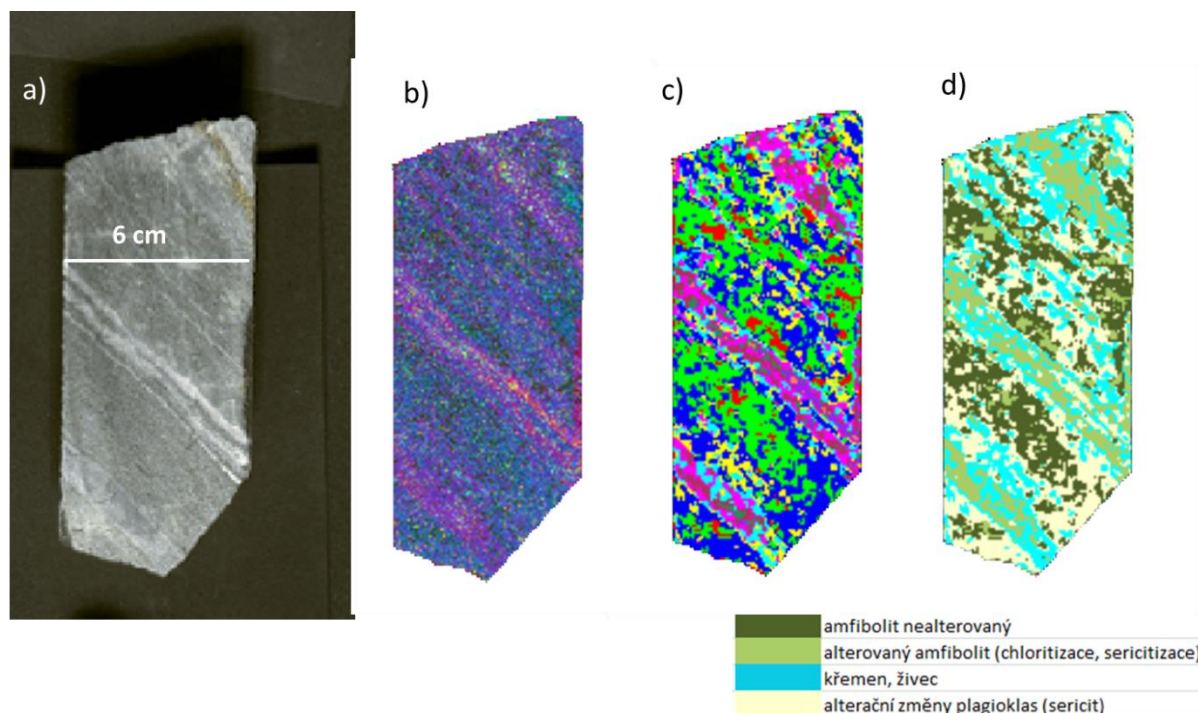


Obr. 108 Výsledky klasifikace obrazových dat HySpex: (a) vzorek vrtného jádra (č. vzorku 16, S-2) v pravých barvách, jak ho vidí lidské oči, (b) rastr ukazující variabilitu detekovaných vlnových délek absorpčních maxim (produkt derivovaný s využitím nástrojů QUANTools); tento produkt/výstup byl následně automaticky klasifikován s využitím klasifikátoru K-mean (c) a v posledním kroku reklasifikován do mineralogicko-petrografických tříd nadefinovaných na podkladě analýzy výbrusů (d)

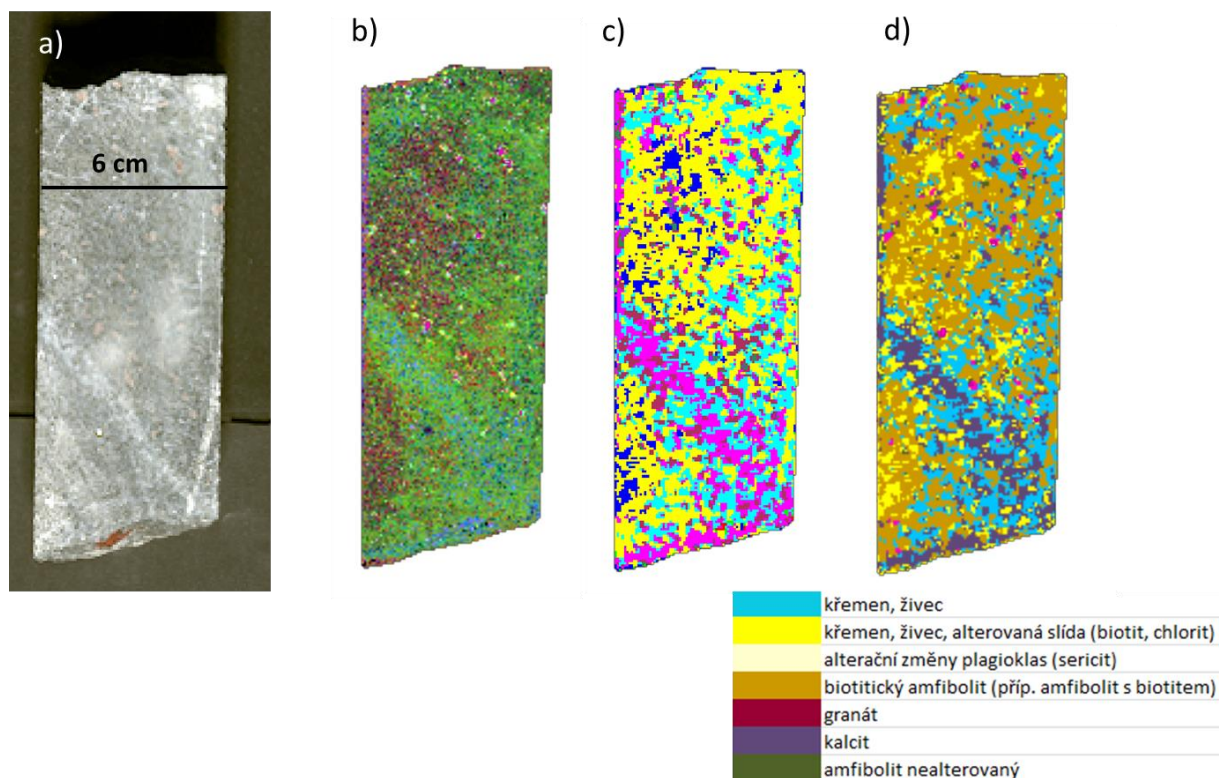


Obr. 109 Výsledky klasifikace obrazových dat HySpex: (a) vzorek vrtného jádra (č. vzorku 4, S-1, migmatizovaný amfibolit) v pravých barvách, jak ho vidí lidské oči, (b) rastr ukazující variabilitu detekovaných vlnových délek absorpčních maxim (produkt derivovaný s využitím nástrojů QUANTools); tento produkt/výstup byl následně automaticky klasifikován s využitím klasifikátoru K-

mean (c) a v posledním kroku reklasifikován do mineralogicko-petrografických tříd nadefinovaných na podkladě analýzy výbrusů (d)



Obr. 110 Výsledky klasifikace obrazových dat HySpex: (a) vzorek vrtného jádra (č. vzorku 10, S-2, chloritizovaná amfibolická rula) v pravých barvách, jak ho vidí lidské oči, (b) rastr ukazující variabilitu detekovaných vlnových délek absorpčních maxim (produkt derivovaný s využitím nástrojů QUANTools); tento produkt/výstup byl následně automaticky klasifikován s využitím klasifikátoru K-mean (c) a v posledním kroku reklasifikován do mineralogicko-petrografických tříd nadefinovaných na podkladě analýzy výbrusů (d)



 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

Obr. 111 Výsledky klasifikace obrazových dat HySpex: (a) vzorek vrtného jádra (č. vzorku 9, S-2, amfibolit s granátem a biotitem, s křemen-kalcitovými žilkami) v pravých barvách, jak ho vidí lidské oči, (b) rastr ukazující variabilitu detekovaných vlnových délek absorpčních maxim (produkt derivovaný s využitím nástrojů QUANTools); tento produkt/výstup byl následně automaticky klasifikován s využitím klasifikátoru K-mean (c) a v posledním kroku reklasifikován do mineralogicko-petrografických tříd nadefinovaných na podkladě analýzy výbrusů (d)

2.3.5 Závěr

V rámci této části projektu byla provedena minerální klasifikace vybraných vzorků vrtných jader vrtů S-1 a S-2 s využitím obrazových hyperspektrálních dat. Vzhledem k faktu, že v ČR není doposud žádné centrum disponující hyperspektrálními senzory/kamerami uzpůsobenými pro skenování vzorků v laboratorních podmínkách, byly vzorky vrtných jader převezeny na pracoviště GFZ (Helmholtz Centre Potsdam: German Research Centre For Geosciences). Zde byly pořízeny obrazové skeny (radiance a reflektance) s využitím senzoru HySpex, který pořizuje obrazový záznam v optické části elektromagnetického spektra (0,4-2,5 μm).

Obrazová data byla analyzována s využitím nového toolboxu vyvíjeného pracovištěm DPZ na ČGS. Jedná se o nástroj, který prochází jednotlivé pixely a automaticky identifikuje vlnové délky specifických absorpcí přítomných ve spektrálním záznamu, jež umožňují přímou identifikaci minerálů. Pomocí této nové metody bylo možno provést rychlou automatickou klasifikaci hyperspektrálních obrazových dat. Její hlavní výhodou je fakt, že před vlastní klasifikací není potřeba nadefinovat trénovací množiny či spektra známých minerálů (tzv. koncové členy), což je základní podmínka běžně používaných metod pro klasifikaci HS dat.

Závěrem lze shrnout, že byla demonstrována účinnost analýzy obrazu jako klasifikační a identifikační metody, která automatickým způsobem a pomocí moderní technologie dokáže mapovat minerály ve vrtném jádru. Navržené nové postupy jsou poměrně inovativní a dosažené výsledky mají vysoký publikační potenciál. Zároveň se jedná o metodu, s jejímž využitím je možné v poměrně krátkém čase (na rozdíl od přípravy materiálu na mikroskopii) identifikovat přinejmenším kvalitativně minerální složení daných vzorků na poměrně větší ploše než v případě mikroskopických popisů. Na druhé straně je však nutné zmínit i limity této metody. Především se jedná o to, že v optické části elektromagnetického spektra (0,4-2,5 μm) nelze přímo identifikovat minerály jako je křemen či živec, s tímto faktem je tedy nutné přistupovat i k výsledkům klasifikace. Pro jejich přesné rozlišení je nutné použít sensor snímající v termální části EMS, tyto senzory jsou však ještě méně běžné než optické, jelikož náklady na jejich pořízení jsou několikanásobně vyšší. Klasifikace je vždy nutné interpretovat s petrografickými výsledky popř. dalšími mineralogickými analýzami.

Veškerá primární data, výsledky předzpracování a klasifikace obrazu jsou poskytnuty zadavateli ve formě elektronické přílohy.

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

2.4 Hydrogeologické mapování

2.4.1 Úvod

Cílem hydrogeologického výzkumu v PVP Bukov a jeho širším okolí je získání relevantních informací o charakteru proudění a chemickém složení mělkých i hlubokých podzemních vod a změnách hydrogeologických poměrů v prostoru a v čase. Hydrogeologický výzkum je zaměřen také na hodnocení vazby oběhu podzemních vod na poruchová pásma, zlomy a pukliny.

Práce v PVP Bukov a jeho širším okolí zahrnovaly dokumentaci přítoků podzemní vody do podzemního díla, postupné budování monitorovací sítě v podzemí i na povrchu lokality a následný monitoring. Současně probíhaly odběry vzorků podzemních vod pro stanovení doby jejich zdržení v horninovém prostředí a jejich původu. Pro získání informací o vývoji chemického složení podzemních vod s hloubkou byly odebírány vzorky i z dalších dostupných pater dolu Rožná a dolu Jasan.

2.4.2 Hydrogeologické poměry v PVP Bukov a v jeho širším okolí

Přehled provedených prací a metodika měření

Hydrogeologický výzkum a hydrogeologický monitoring probíhal ve třech základních oblastech:

1. v povrchové části lokality a to v části ležící bezprostředně nad PVP Bukov a dále také v širším okolí těžní jámy Bukov, kde byla povrchová měření směřována na jih k lokalitě Kraví hora;
2. v prostoru PVP Bukov a jeho nejbližším okolí na 12. patře dolu Rožná;
3. v prostoru celého dolu Rožná od 3. po 24. patro.

V povrchové části lokality proběhlo na začátku roku 2015 účelové hydrogeologické mapování, jehož součástí byla dokumentace drenáží podzemních vod (prameny, výtoky z drenáží), terénní měření fyzikálně-chemických parametrů podzemních vod a odběry vzorků podzemních vod pro stanovení obsahů základních kationtů a aniontů ve vodách. V rámci mapování bylo zdokumentováno celkem 39 objektů (Obr. 112). Následně bylo vybráno 6 pramenů pro povrchovou monitorovací síť. Vybrány byly soustředěné vývěry podzemních vod v blízkém okolí jámy Bukov tak, aby reprezentovaly různé hloubky oběhu podzemních vod. Výběr byl proveden na základě teplotních měření v zimních měsících, výsledků chemických analýz a měření vydatnosti pramenů. Veškerá data z terénních měření byla uložena do databáze Hydrogeologické terénní dokumentace ČGS. Data z hydrogeologického mapování obsahuje Elektronická příloha 14.

Po konzultacích s pracovníky s. p. DIAMO byly vybrány 3 vrty pro monitoring hladiny podzemní vody v okolí Bukova (vrty PV5, PV6, PV8). Vrty byly osazeny hladinoměry Levellogger Gold a Junior firmy Solinst, interval odečtu dat je 30 minut. Současně je na povrchu monitorován atmosférický tlak pro následnou kompenzaci měření. U těžní jámy Bukov byla nainstalována automatická meteorologická stanice DAVIS Vantage pro 2, data jsou přístupná online na adrese: <http://www.wunderground.com/personal-weather-station/dashboard?ID=IKRAJVYS9>.

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

V průběhu ražby překopu BZ-XIIJ, BZ₁-XII a okolních rozrážek probíhala dokumentace všech vodivých struktur (přítoků) do překopu BZ-XIIJ. V rámci dokumentace byl popsán typ výtoku, jeho intenzita, charakter výtoku, rozměr, typ horniny v okolí výtoku a její případná alterace, typ struktury, na který je výtok vázán, její orientace a výplň. Pokud to technické podmínky a vydatnost přítoku umožňovaly, bylo součástí dokumentace také terénní měření fyzikálně-chemických vlastností podzemních vod (pH, měrná elektrická vodivost, obsah rozpuštěného kyslíku a Eh) a odběr vzorku podzemní vody. U většiny přítoků do překopu byly fyzikálně-chemické vlastnosti podzemních vod sledovány opakovaně. Zdokumentováno bylo také 7 přítoků v blízkém okolí PVP na 12. patře dolu. Celkem bylo v podzemí v prostoru PVP zdokumentováno 43 přítoků včetně přítoků z výzkumných vrtů. Přehled zdokumentovaných přítoků je uveden na Obr. 114. Vybrané přítoky byly zahrnuty do monitorovací sítě (viz kapitola 2.4.3).

Pro určení stáří a původu podzemních vod v podzemní laboratoři byly odebrány čtyři vzorky pro stanovení obsahu tritia ve vodách 2 vzorky pro stanovení obsahu freonů (CFC-12, CFC-11, CFC-113, SF₆) a 4 vzorky pro stanovení radioaktivního izotopu uhlíku ¹⁴C. Vzorky pro stanovení ¹⁴C byly odeslány do Radicarbon laboratory v Poznani, stanovení stáří radiokarbonovou metodou zde provedl profesor Tomasz Goslar.

V prostoru celého dolu Rožná byl hydrogeologický výzkum zaměřen zejména na vývoj chemického složení podzemních vod s hloubkou, byly odebírány vzorky podzemních vod z přítoků podzemní vody do jednotlivých pater. Jednalo se o přítoky a drobné průsaky z puklin, poruchových zón a průzkumných vrtů. Součástí odběrů vzorků byla dokumentace struktur, ze kterých podzemní voda prosakovala a v případě dostatečné vydatnosti přítoku i terénní měření fyzikálně-chemických parametrů podzemních vod. Celkem bylo zdokumentováno 60 přítoků podzemní vody do dolu Rožná a odebráno 54 vzorků podzemních vod.

Metodika prací včetně rozsahu analýz byla podrobně popsána v etapové zprávě projektu za rok 2015 (Verner a Bukovská et al. 2015).

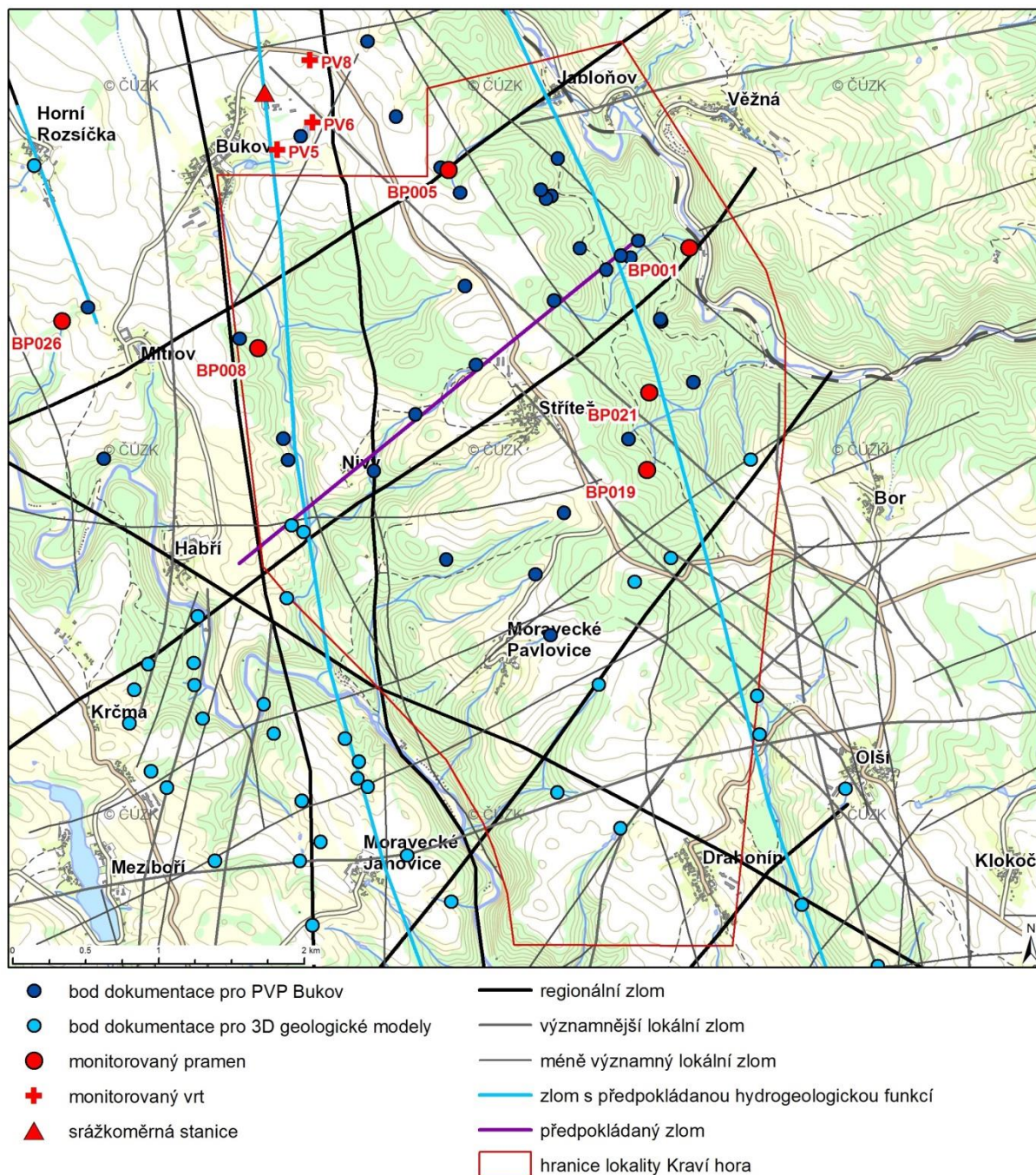
Hydrogeologické poměry v povrchové části lokality

Pro proudění podzemních vod v přípovrchové části lokality je významná morfologie oblasti, která určuje hodnotu hydraulického gradientu. V širším okolí Bukova dosahuje nejvyšší nadmořské výšky 611 m vrchol Kraví hory, nejnižší nadmořské výšky (350–400 m n. m) jsou v poměrně hluboce zaříznutých údolích říček Loučky a Nedvědičky. Oba hlavní vodní toky představují současně hlavní erozní báze oblasti a drénují mělký a částečně i hlubší oběh podzemních vod. Průměrné roční úhrny srážek se pohybují od 600 do 680 mm, vyšší srážkové úhrny jsou od května do srpna. Nejvyšší srážkové úhrny zaznamenané ve srážkoměrné stanici Bukov (měří od května 2015) byly v srpnu a listopadu 2015 a v květnu roku 2016 (50 až 60 mm za měsíc), naopak velmi suchý byl srpen a září 2016 (do 15 mm za měsíc).

Pro ložiskovou oblast Rožná je charakteristický střední specifický odtok podzemních vod v hodnotách 2–3 l.s⁻¹.km⁻². Směrem k JV klesá specifický odtok podzemních vod na nízký s hodnotou 1–2 l.s⁻¹.km⁻² (Krásný et al. 1982).

Území spadá do hydrogeologického rajonu 65601 Krystalinikum v povodí Svratky – střední část (vyhláška č. 5/2011 Sb.). Ložisko Rožná tvoří hydrogeologický masiv s převážující puklinovou propustností pevných hornin.

Charakter propustnosti závisí na petrologickém složení a typu zvětvávání hornin, míře tektonického postižení, hloubce hornin pod terénem, morfologických a klimatických podmínkách. U mramorů a erlánů v pestré skupině dochází často ke zkrasování hornin, propustnost je zde puklinově-krasová nebo krasová. Ve svrchních částech krystalinika tvořených zvětralinovým pláštěm (eluvium), svahovými a fluvialními sedimenty se jedná o propustnost průlinovou.



Obr. 112 Přehledná mapa dokumentovaných pramenů a bodů hydrogeologické monitorovací sítě na povrchu lokality, červená linie - hranice PÚ Kraví hora

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

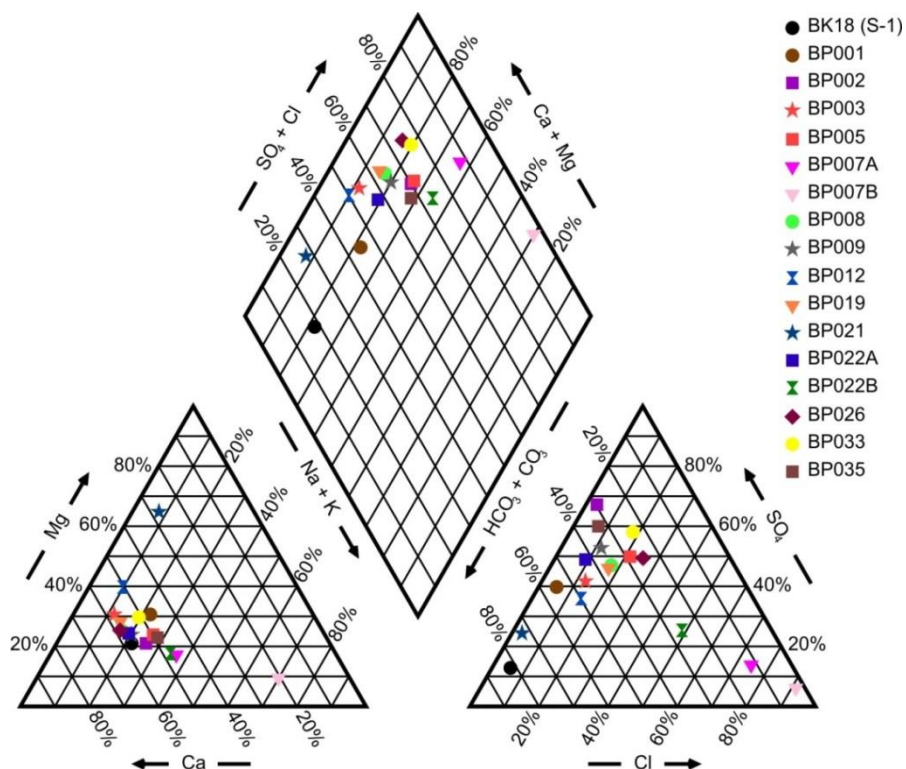
Svahové a fluviální sedimenty jsou v těsné hydraulické spojitosti se svým podložím a společně tvoří hlavní kolektor krystalinika. Hloubkový dosah přípovrchové zóny rozvolnění puklin s aktivním oběhem podzemních vod se pohybuje v rozmezí 40–100 m. V hlubších částech krystalinika dochází k postupnému svírání puklin tíhou nadložních hornin, hydraulická vodivost se snižuje a proudění podzemních vod se soustředí téměř výhradně na zlomy a puklinové zóny.

K infiltraci srážkových vod a následnému doplňování zásob podzemních vod dochází prakticky na celém studovaném území v rámci prací PVP Bukov. Přirozené odvodnění mělkých zvodní probíhá skrytě v úrovni místní erozní báze do fluviálních sedimentů, na kontaktu hornin s různou hydraulickou vodivostí nebo v místě výskytu zlomů a tektonických zón s drenážní nebo naopak izolační funkcí. Pozice dokumentovaných pramenů vůči regionálním a lokálním zlomům je vyznačena v mapě na Obr. 112. Mapa znázorňuje zlomy získané z archivních materiálů hodnocené v rámci projektu „3D strukturně-geologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště“. Z mapy je zřejmé, že drenáže podzemních vod jsou v oblasti velmi často spojeny s výskytem zlomů, časté jsou také pozice pramenů na křížení zlomů různých systémů. Linie pramenů mohou indikovat existenci propustné puklinové zóny nebo zlomu.

Z povrchového hydrogeologického výzkumu vyplývá, že pro oběh podzemních vod jsou významné regionální zlomy směru SSZ–JJV. Tyto zlomy jsou lemovány řadou pramenů. Na jednom z těchto zlomů leží i monitorovaný pramen BP021, který prokazatelně drénuje podzemní vody hlubšího oběhu (viz dále). Tento poznatek je v rozporu s tvrzením Kříbka et al. (1997), že kataklazitové střížné zóny směru SSZ–JJV jsou vyplněné tektonickou brekciovou výplní omezující výrazný pohyb podzemních vod a pro proudění podzemních vod mají malý význam. Pokud jsou zóny směru SSZ–JJV vyplněné nepropustným materiálem, k proudění podzemních vod může docházet v jejich krajích, kde míra deformace nebyla tak výrazná a vyskytuje se zde systém otevřených, nevyplněných puklin. Zároveň nepropustná centrální část tektonické zóny působí jako izolátor a dochází ke vzdouvání podzemních vod nad touto zónou (vzhledem ke směru proudění podzemních vod), které se projevuje výskytem pramenů.

Druhým směrem vodivých struktur je směr SV–JV (Obr. 112). Tento směr odpovídá diagonálním dislokacím směru 55–70°, které jsou uváděny ve starších pracích (Kříbek et al. 1997; Říčka 2010) jako otevřené, s průběžností desítky až stovky metrů a s drenážní funkcí.

Režim mělké zvodně v eluvii krystalinika a kvartérních sedimentech je přímo ovlivněn množstvím srážek. Vydutnosti pramenů vázaných pouze na mělký oběh podzemních vod se poměrně rychle mění a mezi obdobími s minimy a maximy srážek může být až řádový rozdíl. To je příklad monitorovaného pramen BP026, u kterého vydutnost kolísala v letech 2015 až 2017 od 0,08 po 1,4 l.s⁻¹. Prameny drénující hlubší oběh s vazbou na zlomy mají vydutnosti stabilní, vydutnost pramene BP021 se s výjimkou extrému v době jarního tání (viz kapitola 2.4.3) pohybovala v rozmezí od 0,2 po 0,3 l.s⁻¹. Hladina podzemní vody je v převládajícím počtu případů volná a sleduje konformně morfologii terénu.



Obr. 113 Piperův diagram složení podzemních vod v povrchové části lokality (prameny a drenáže)

Výsledky chemických analýz podzemních vod z pramenů jsou znázorněny v Piperově diagramu na Obr. 113 a na Obr. 121, v tabulkové formě je obsahuje Elektronická příloha 15. Do diagramu na Obr. 113 byla pro srovnání přidána i analýza z vrtu S-1 (BK18) představující typické složení podzemních vod z PVP Bukov. U podzemních vod na lokalitě převažuje chemický typ Ca-SO₄ typický pro mělký oběh podzemních vod v oxidační zóně krystalinika. Odlišné složení mají znečištěné podzemní vody se zvýšeným podílem Na a Cl (BP007A, BP007B a BP022B). Obsah chloridů se u těchto vod pohybuje v rozmezí od 90 do 350 mg.l⁻¹ a sodíku v rozmezí 40 až 185. Běžné obsahy u pramenů nezasazených znečištěním jsou u chloridů do 20 mg.l⁻¹ a do 10 až 15 mg.l⁻¹ u sodíku. Odlišné složení má také pramen BP021 s převahou Mg a HCO₃. U tohoto pramene předpokládáme drenáž hlubšího oběhu podzemních vod. Vyšší podíl HCO₃ byl zaznamenán také u pramenů BP001 a menší míře u BP012. Všechny tyto prameny leží na zlomech směru SSZ–JJV nebo SV–JZ.

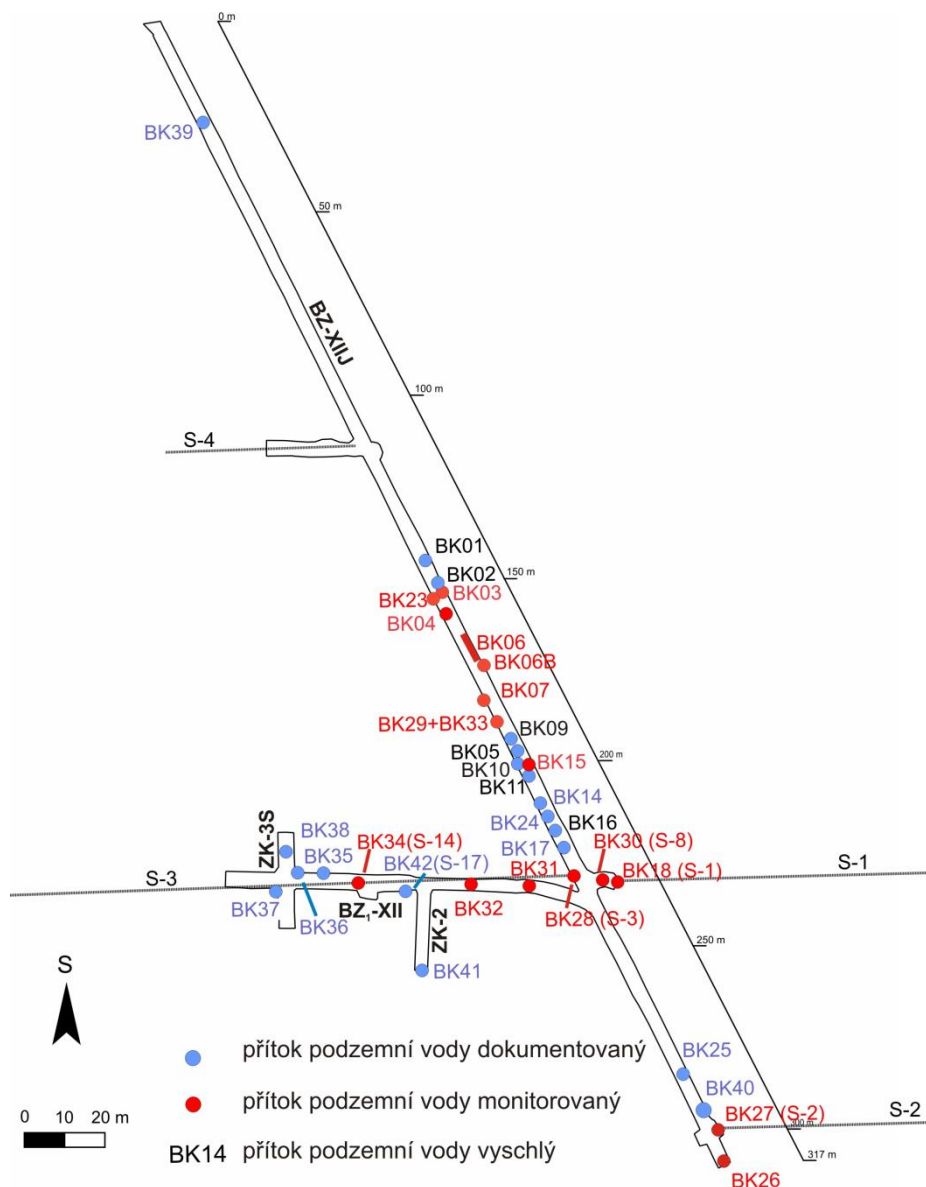
Celkový obsah rozpuštěných látek se u neznečištěných vod pohybuje v rozmezí 190 až 500 mg.l⁻¹, pH (terénní měření) od 5 do 7,8. Vydatnosti pramenů byly nejčastěji v setinách až prvních desetínách l.s⁻¹.

Charakteristika přítoků do PVP Bukov

Iniciální hydrogeologická a strukturně geologická dokumentace přítoků do PVP Bukov byla prováděna v návaznosti na postup ražby. Při následném monitoringu byla dokumentace doplňována a byly zaznamenávány změny na dokumentačních bodech. Celkem bylo zaznamenáno 36 dokumentačních bodů s přítoky podzemní vody do prostoru chodeb. Dvacet šest přítoků/průsaků se vyskytovalo v chodbě BZ-XIIJ, osm v chodbě BZ₁- XII, po jednom v rozrážkách ZK-2 a ZK-3S. Prostorová distribuce přítoků je vyznačena na schématu PVP Bukov na Obr. 114, podrobný popis všech přítoků obsahuje Elektronická příloha 16.

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

Většina přítoků byla vázaná na průnik tělesa chodby či návrtů pro kotevní svorníky a křehkých struktur (tj. puklin a zlomů), 6 přítoků bylo vázáno na průzkumné vrty S-1, S-2, S-3, S-8, S-14 a S-17. Vrt S-1 (horizontální) a S-8 (vertikální) byly vybudovány ve vrtné komoře (VRK-1) u dnešního křížení chodeb BZ-XIIJ a BZ₁- XII. Horizontální průzkumný vrt S-3 byl následně odtěžen ražbou chodby BZ₁-XII. Horizontální vrt S-2 se nachází ve vrtné komoře VRK-2 na čelbě chodby BZ-XIIJ v blízkosti výrazné poruchové zóny, horizontální vrty S-14 a S-17 jsou situovány v chodbě BZ₁- XII.



Obr. 114 Přehledná mapa dokumentovaných a monitorovaných přítoků podzemních vod do PVP Bukov

Přítoky mají podle vydatnosti podobu výtoku z pukliny (Obr. 115, Obr. 116), kapek skapávajících z masivu či vlhnutí stěn. Monitoringem byly podchyceny nejvydatnější přítoky. V době tvorby zprávy bylo monitorováno 12 nejvydatnějších přítoků z celkového počtu 26 aktivních přítoků. Ostatní přítoky buď zanikly samovolně, nebo byly zabetonovány či jinak znehodnoceny při stabilizaci stěn díla. Nejvydatnější přítoky jsou BK27 z vrtu S-2 (Obr. 117 a Obr. 118, průměrná vydatnost 1,1 l.s⁻¹), BK18 z vrtu S-1 a BK06 (oba o průměrné vydatnosti

0,3 l.s⁻¹), a BK28 z vrtu S-3 (průměrná vydatnost 0,2 l.s⁻¹). U ostatních měřených přítoků se vydatnosti pohybují v řádu setin l.s⁻¹ (3 přítoky) a tisícín l.s⁻¹ (5 přítoků). Vydatnost nižší než ml.s⁻¹ byla zjištěna u tří přítoků.



Obr. 115 BK03 průsaky na intersekci puklinového systému (směr spádnice/sklon 102/60) s křemennou žílou (330/80)



Obr. 116 BK06B vydatný výtok na křížení 2 systémů puklin (299/62 a 118/58)



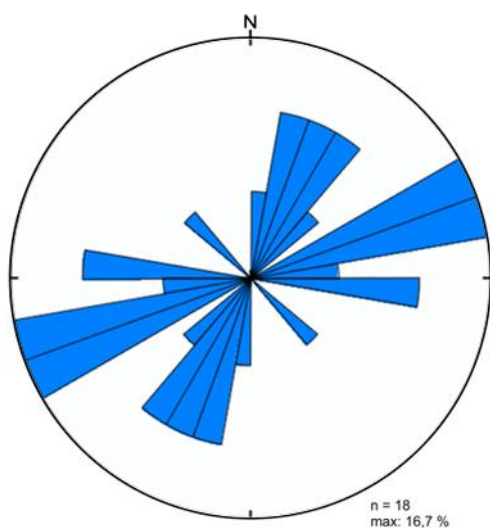
Obr. 117 BK27 Přítok z vrtu S-2 před instalací průtokoměru (vydatnost cca 1 l.s⁻¹)



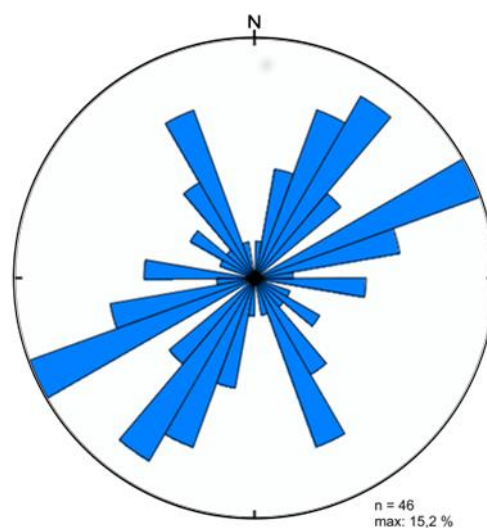
Obr. 118 BK27 Přítok z vrtu S-2 po instalaci průtokoměru. Na stěně napravo dochází k průsaku na nově otevřených puklinách

Strukturně jsou přítoky vázány na několik systémů puklin. Struktury byly měřeny ve dvou etapách. První měření bylo zaznamenáno při iniciální dokumentaci přítoku a druhé revizní měření bylo provedeno 24.1.2017 pro účely zaznamenání možných změn. Směry sklonů jsou znázorněny v růžicových diagramech na Obr. 119 a Obr. 120. Na rozdíl od strukturních měření v celém prostoru dolu Rožná, který vykazuje dva hlavní systémy puklin směru SV–JZ a SSZ–JJV, přičemž systém puklin SV–JZ vykazuje větší variabilitu směrů (foliace), má iniciální měření rozložení směrů systému puklin na PVP Bukov bimodální charakter vytvářející dvě maxima (SV–JZ a VSV–ZJZ, Obr. 119). Růžicový diagram měření na PVP Bukov doplněný o revizní měření naznačuje pozdější přesun přítoků do systému poruch ve směru SSZ–JJV. Při odlehčování masivu vlivem ražby pravděpodobně došlo k otevírání puklin tohoto směru a podzemní voda začala využívat tento systém. Otevírání puklin je ilustrováno na případu nových průsaků kolem vrtu S-2 (BK18) vystrojeného průtokoměrem,

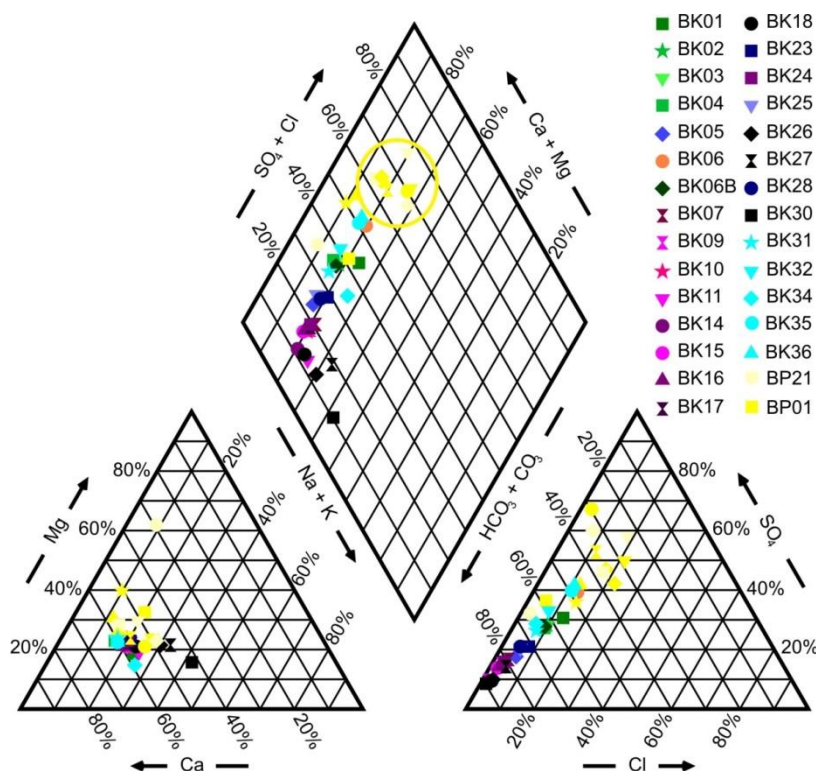
kde voda začala pak ve vrtu obtékat puklinami v čelbě rozrážky, které původně vodu nevedly (Obr. 117 a Obr. 118).



Obr. 119 Růžicový diagram směrů puklin, zlomů a poruchových zón, na které jsou vázány přítoky podzemní vody v PVP Bukov zaznamenaných při iniciální dokumentaci



Obr. 120 Růžicový diagram směrů puklin, zlomů a poruchových zón, na které jsou vázány přítoky podzemní vody v PVP Bukov doplněný o revizní měření



Obr. 121 Piperův diagram složení podzemních vod v povrchové části lokality a v PVP Bukov

Při hodnocení chemického složení podzemních vod vycházíme z prvních odběrů vzorků vod po zastížení přítoků ražbou (vrtáním), kdy je podzemní voda v nejmenší míře ovlivněna oxidačními podmínkami v okolí důlního díla. Graficky je chemické složení jednotlivých přítoků

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

znázorněno na Obr. 121, v tabulkové formě obsahuje všechny výsledky analýz včetně monitoringu Elektronická příloha 15.

Podzemní vody přitékající do podzemní laboratoře jsou převážně typu Ca-HCO_3 , s celkovou mineralizací v rozsahu 240 až 360 mg.l^{-1} a zásaditou reakcí (pH 7,7–8,6). Mezi kationty je mírně zvýšený podíl sodíku u přítoků z poruchové zóny na čelbě překopu BZ-XIIJ (BK26 a BK27).

Mírně odlišné chemické složení má podzemní voda, která byla odebrána z vrtu S-8 (BK30), jedná se o 50 m hluboký vrt v počvě sahající na úroveň 13. patra dolu. Podzemní voda z vrtu je smíšeného typu Ca-Na-HCO_3 , obsahuje podíl vod typu Na-HCO_3 reprezentující hlubší části dolu.

Zvýšený podíl síranů mezi anionty byl zaznamenán u přítoku z poruchové zóny na metrži 167 až 175 m (BK06, překop BZ-XIIJ), který spadá do hydrochemického typu $\text{Ca-HCO}_3\text{-SO}_4$. Obdobné složení mají i přítoky BK35 a BK36 ze zlomové zóny v rozrážce BZ₁-XII. Zvýšený podíl síranů u poruchové zóny BK06 je pravděpodobně dán zdrojem podzemních vod ve vyšších patrech dolu (Rukavičková et al. 2016). Tento přítok obsahoval také několikanásobně vyšší obsahy uranu ve srovnání s ostatními přítoky. Koncentrace tritia ve vodách BK06 byla 0,3 TU (zkratka Tritium Units, koncentrace 1 TU odpovídá 1 atomu ^3H na 10^{18} atomů H). Koncentrace tritia u ostatních vzorků byly pod limitem detekce. Tato měření indikují větší podíl vod infiltrovaných před rokem 1950.

Přítoky BK35 a BK36 leží na zlomové zóně směru VSV–ZJZ (směr spádnice/sklon 162/41), je pro ně typický vysoký obsah rozpuštěných látek a velmi obdobné chemické složení jako je aktuálně (viz kapitola 2.4.3) u přítoku BK07 z obdobně orientované zlomové zóny (150/45). Je tedy možné předpokládat, že se tyto přítoky nacházejí na jedné poruchové zóně.

Vzájemný podíl uhličitánů a síranů u prvních odběrů vzorků odráží míru ovlivnění horninového prostředí a podzemních vod prostorem dolu. Při relativně souvislé postupné ražbě překopu BZ-XIIJ klesal podíl síranů ve vodách se vzdáleností od prostoru dolu Rožná z 30 meq % v úvodní části překopu na 10 meq % v části koncové. Překop BZ-XIIJ byl dokončen v září 2014, rozrážky ve vlastním prostoru laboratoře byly raženy až do srpna 2016 (např. BZ₁-XII, ZK-3S). Prostor BZ₁-XII a okolních rozrážek byl proto vystaven po delší dobu vlivu blízkého otevřeného prostoru překopu BZ-XIIJ. Vzorkované přítoky (např. BK31, BK32, BK34) zde mají vyšší podíl síranů, který odpovídá úvodním částem překopu BZ-XIIJ (Obr. 121).

Doba zdržení podzemních vod v PVP

Pro stanovení doby zdržení podzemních vod vyvěrajících v PVP byly použity metody studia rozpadu tritia, degradace freonů CFC-11, CFC-12, CFC-113 a SF_6 a datování radiouhlíkovou metodou (^{14}C).

Odběry vod pro analýzu freonů je nutné provádět za přísných podmínek bez kontaktu vzorku s atmosférou z důvodu kontaminace freony z atmosféry. Tuto podmínku bylo možné splnit pouze u vrtů S1 (BK18) a S3 (BK28). Vrtly byly u ústí na výtoku zatěsněny pakrem po dobu několika týdnů před vlastním odběrem a koncentrace freonů v oblasti za pakrem se za tuto dobu ustálila do rovnováhy s koncentrací freonů ve vytékající podzemní vodě.

Pro stanovení obsahu tritia v podzemní vodě byly odebrány vzorky z přítoků BK06, BK26+27 a z vrtů S1 (BK18) a S3 (BK28).

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

Měření tritia v odebraných vzorcích vykazují kromě vzorku z objektu BK6 koncentrace pod mezí detekce 0,2 TU. Ve vzorku BK06 je koncentrace tritia těsně nadlimitní 0,3 TU. Při takto nízkých koncentracích ^3H je možné výsledky interpretovat dle IAEA/WMO (2015) jako vody s výrazně převažujícím podílem vod infiltrovaných před rokem 1950 u všech sledovaných objektů. U výtoku z poruchové zóny BK06 je podíl mladších vod vyšší.

Modelování střední doby zdržení podzemní vody pomocí freonů (CFC) a SF_6 bylo provedeno na základě dat získaných z databáze NOAA (www.cmdl.noaa.gov). Hodnoty byly po přepočtech na nadmořskou výšku a teplotu infiltrace v oblasti Bukova (Bruthans 2006) využity jako vstupní data pro hydrologické modelování. Byl použit vstupní soubor pro nadmořskou výšku 500-700 m (nadmořská výška obce Bukov 550 m n.m.) a průměrnou teplotu infiltrace 6,5 °C. Byly aplikovány tři výrazně odlišné modely:

Exponenciální model, kde střední doba zdržení je jediným parametrem tohoto modelu (Maloszewski a Zuber 1996). Disperzní modely, kde je uvažováno jednorozměrné řešení disperzní rovnice pro polonekonečné prostředí (Maloszewski a Zuber 1996). U tohoto modelu složky oběhu s nejkratší dobou zdržení chybějí. Byly použity dva typy disperzního modelu: a) s velmi nízkou disperzí $D=0.05$, kdy se model blíží modelu píستového toku a b) s vysokou disperzí $D=0.5$, kde se model blíží exponenciálnímu modelu. Výrazná odlišnost modelů vede k výrazným rozdílům v interpretované době zdržení.

Výsledky modelování jsou uvedeny v následující Tab. 27, hodnoty jsou v letech (EXP-exponenciální model, D-disperzní modely s uvedeným koeficientem disperze):

Tab. 27: Modelové hodnoty střední doby zdržení v letech dle různých modelů míšení a stopovačů CFC a SF_6 .

stopovač	CFC-11	CFC-11	CFC-11	CFC-12	CFC-12	CFC-12
model	EXP	D0.05	D0.5	EXP	D0.05	D0.5
BK18 (S1)	>200	>70	>200	>200	70 až 80	200 - >200
BK28 (S3)	>200	>70	>200	160 - 180	55	110 - 120
stopovač	CFC-113	CFC-113	CFC-113	SF₆	SF₆	SF₆
model	EXP	D0.05	D0.5	EXP	D0.05	D0.5
BK18 (S1)	>200	>90	>200	13 - 25	12 - 18	15 - 23
BK28 (S3)	>200	>90	>200	80 - 100	32 - 34	60 - 65

Z výsledků za předpokladu platnosti exponenciálního modelu vyplývá že:

- na základě CFC-11 a CFC-113 je doba zdržení u obou vzorkovaných objektů přes 200 let.
- na základě freonu CFC-12 je střední doba zdržení u objektu BK18 rovněž přes 200 let a u BK28 to je 160-180 let.
- na základě SF_6 je doba zdržení BK28 80-100 let
- všechny tyto údaje jsou v souladu s výsledky aktivita tritia, které ukazují výraznou převahu vody infiltrované před rokem 1950.
- jediný nesouhlasný výsledek je u SF_6 ve vzorku z objektu BK18, který je v příkrém rozporu s výsledky jak tritia, tak tří sledovaných freonů. Příčinou je zřejmě kontaminace SF_6 , buď geogenního (přírodního) původu (opakovaně zjištěno v Sudetech, tj. Jizerské Hory, Krkonoše, Králický Sněžník), nebo lidskou činností.

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

Vzorky odebrané pro datování radiouhlíkovou metodou (^{14}C) byly zpracovány v Radiocarbon Laboratory v Polsku v Poznani. Stanovení stáří vod podle výsledků analýz provedl profesor Tomasz Goslar (Tab. 28). Podle těchto výsledků je doba zdržení vod v horninovém masivu u přítoků do PVP Bukov přibližně 7 tisíc let.

Tento poznatek je v dobrém souladu s předchozími výsledky stanovení stáří vody z vrtu S-1 radiouhlíkovou metodou na PřFUK v Praze (Bruthans 2014), kde bylo určeno stáří vody v závislosti na použité metodě vyhodnocení v rozsahu 6 až 9 tisíc let i v souladu s datováním pomocí freonů a tritia, které v převážné většině případů ukazuje stáří větší než je rozsah těchto metod. Je proto možné předpokládat, že podíl mladších (stáří desítky až první stovky let) vod je v PVP nízký.

Tab. 28: Výsledky datování vod radiouhlíkovou metodou (prof. Tomasz Goslar, Radiocarbon Laboratory, Poznaň)

přítok	^{14}C doba zdržení (roky)
BK06	6530 $\pm$ 40
BK18 (S-1)	7100 $\pm$ 50
BK27	6410 $\pm$ 40
BK31	6500 $\pm$ 40

Složení plynu v podzemní vodě z vrtu S-1

Vyhledem k tomu, že při karotáži vrtu S-1 (BK18) a při odběrech vzorků z tohoto vrtu bylo pozorováno uvolňování bublin plynu, byl z vrtu S-1 odebrán vzorek plynu pro chemickou analýzu. Výsledky analýzy provedené v laboratoři ČGS v Brně jsou uvedeny v Tab. 29. Mezi plyny ve složení vzorky zcela dominuje dusík s poměrným objemovým zastoupením 95 %, dalšími významnějšími složkami jsou kyslík a metan s poměrným zastoupením kolem 2 %.

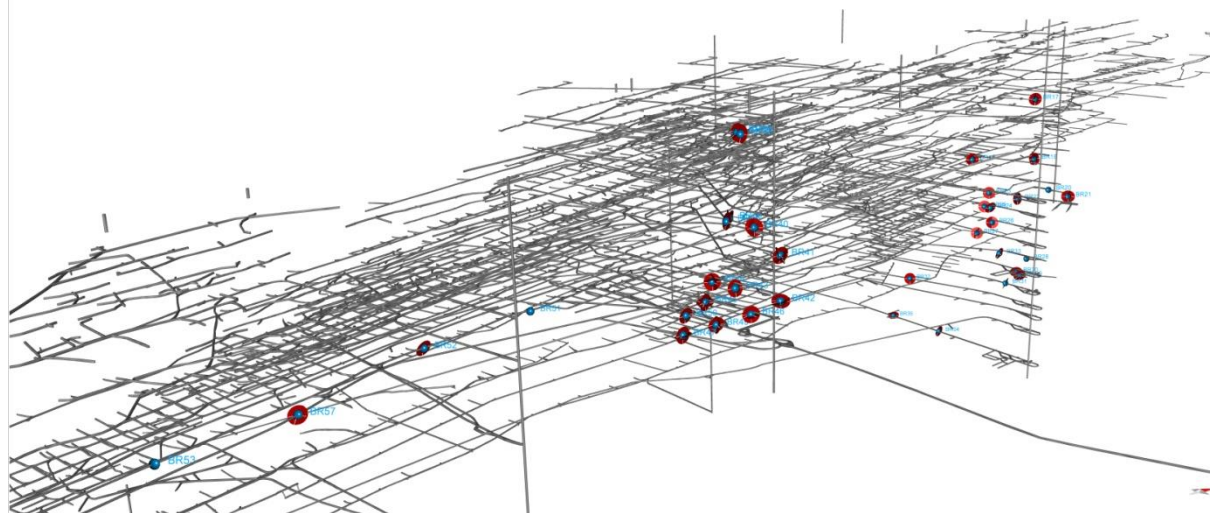
Tab. 29 Složení plynu odebraného z podzemní vody vytékající z vrtu S-1 (BK18)

složka	mez detekce (% objemu)	zastoupení jednotlivých složek (% objemu)
He	0.002	0.0048
H ₂	0.002	0.0023
CO ₂	0.005	0.1837
He	0.002	<0.002
Ar	0.004	0.7263
O ₂	0.002	2.0872
N₂	0.002	94.6194
metan	0.028	2.4135
CO	0.01	<0.01

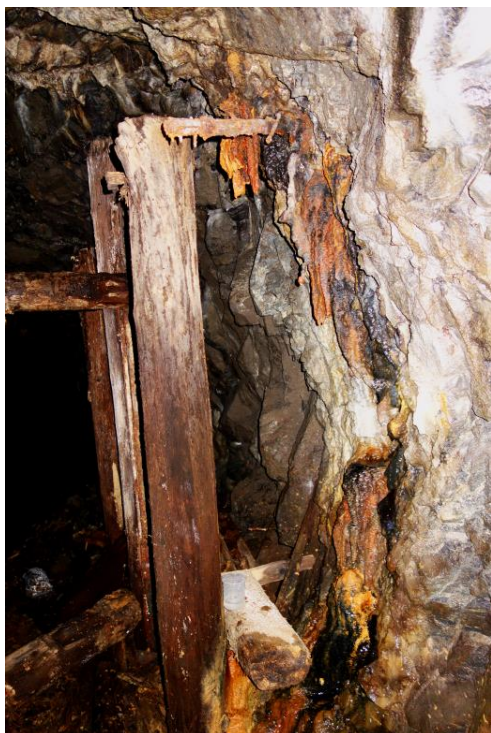
Charakteristika přítoků do dolu Rožná

V průběhu odběru vzorků podzemních vod v hloubkovém profilu dolu Rožná byla prováděna také hydrogeologická a strukturně geologická dokumentace přítoků. Celkem bylo zdokumentováno 67 přítoků včetně 7 přítoků na 12. patře v okolí PVP Bukov. Dokumentované přítoky jsou v hloubce od

150 m (3. patro) po 1200 m (24. patro). Největší množství zdokumentovaných přítoků se nachází na 12. patře (19 přítoků) a na 24. patře (12 přítoků) dolu. Na ostatních patrech bylo popsáno od jednoho do tří přítoků. Počet zdokumentovaných přítoků byl závislý zejména na přístupnosti jednotlivých pater dolu. Přehled zdokumentovaných přítoků a jejich popis zahrnuje Elektronická příloha 17. Na



Obr. 127 je náhled z 3D modelu pater dolu Rožná s rozmístěním míst odběrů vzorků.



Obr. 122 BR36 četné kapky z krápníků na struktuře o mocnosti 1 m křížící chodbu (směr spádnice/sklon 180/80), 3. patro, okolí jámy R1.



Obr. 123 BR25 drobné průsaky ve formě kapek z puklinového systému křížícího chodbu (140/75), 14. patro, Z-XIV, jáma R3.



Obr. 124 BR08 výtok podzemní vody z průzkumného vrtu, 24. patro, PŠ1-243, jáma R7.

V převážné většině se jednalo o přítoky z křehkých struktur (pukliny, zlomy - Obr. 122, Obr. 123), na 24. patře převažovaly výtoky z vrtů (8 z 12 přítoků, Obr. 124). Směry sklonů dokumentovaných struktur jsou znázorněny v růžicových diagramech na Obr. 125 a Obr.

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

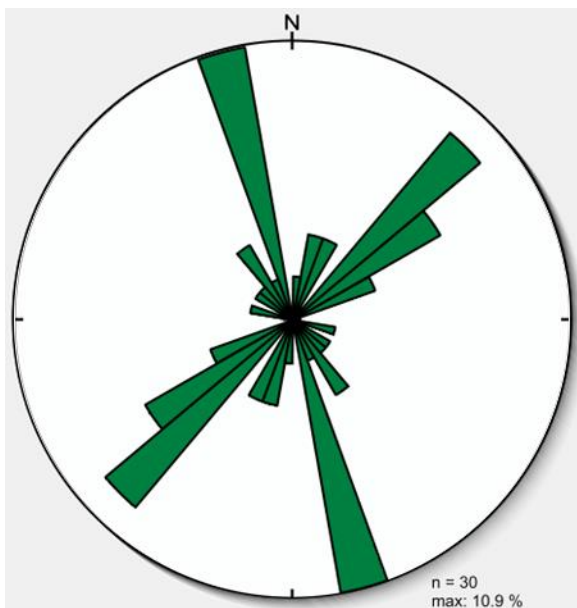
126. Na prvním z nich jsou směry sklonu vodivých puklin a poruch pouze z okolí jámy Jasan (severní část dolu Rožná), kde byly přítoky podzemních vod převážně na dobře přístupných, jasně definovatelných strukturách. V tomto datovém souboru jsou dominantní dvě skupiny směrů puklin:

- SSZ–JJV, která je tvořena systémem puklin ~250/60 (směr spádnice/sklon), které v řadě případů odpovídají orientaci puklin vzniklých na plochách metamorfní foliace;
- SV–JZ, kterou tvoří systém puklin ~300/70 respektive ~120/70.

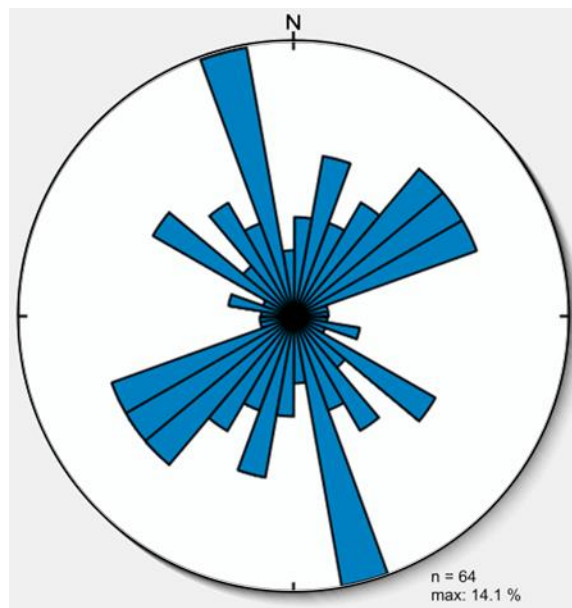
Tento poznatek velmi dobře koresponduje s výsledky povrchového hydrogeologického výzkumu na lokalitě (Obr. 112, kapitola 2.4.2). Dva dominantní směry vodivých struktur určené na základě hydrogeologického mapování na povrchu byly zaznamenány také při dokumentaci v dole Rožná.

Na Obr. 126 jsou vynesena strukturní měření vodivých poruch z celého dolu Rožná (mimo vlastní prostor PVP Bukov). Také zde jsou zřetelné dva hlavní směry vodivých struktur, pouze se projevila větší variabilita měření na strukturách směru SV–JZ.

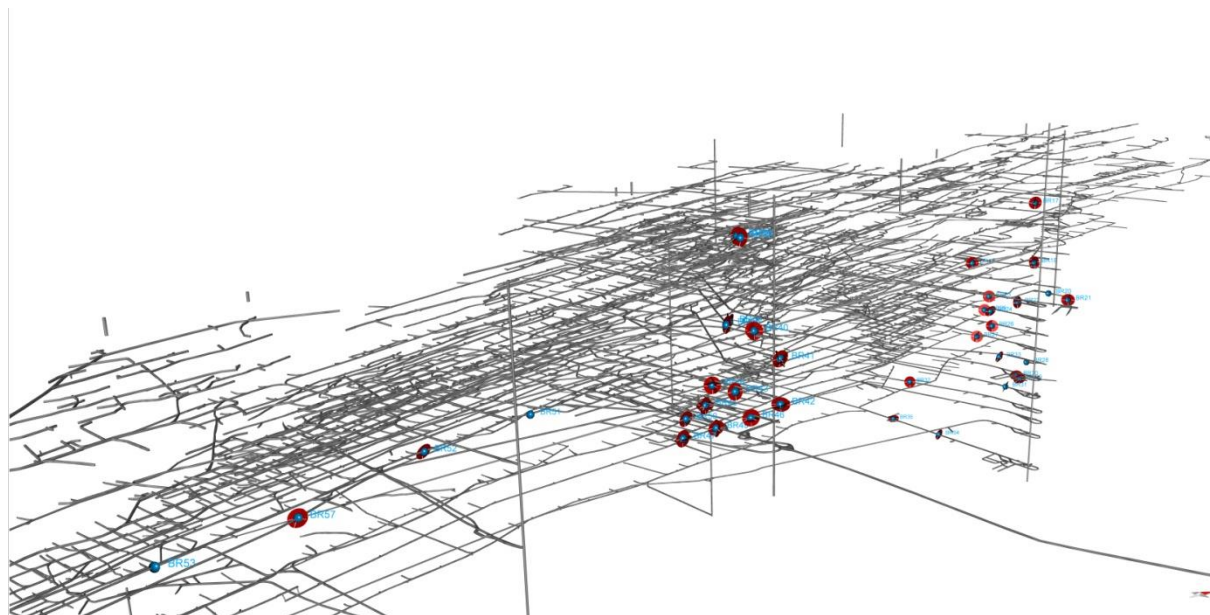
Časté byly přítoky na křížení dvou puklinových systémů, obvykle jeden z těchto puklinových systémů sledoval směr metamorfní foliace.



Obr. 125 Růžicový diagram směrů puklin, zlomů a poruchových zón, na které jsou vázány přítoky podzemní vody v dole Rožná v okolí jámy Jasan



Obr. 126 Růžicový diagram směrů puklin, zlomů a poruchových zón, na které jsou vázány přítoky podzemní vody v dole Rožná kompletní datový soubor



Obr. 127 Náhled na 3D model pater dolu Rožná s vyznačením míst odběrů vzorků podzemních vod

2.4.3 Režimní měření v PVP Bukov a na povrchu lokality

Metodika měření a přehled instalací monitorovacích bodů

V povrchové části lokality jsou monitorovány hladiny podzemní vody ve třech vrtech PV5, PV6 a PV8 (pozice vrtů na Obr. 112, foto na Obr. 128). Vrtý jsou osazeny levelloggery Solinst Junior s měřicím rozsahem 20 m, atmosférický tlak je zaznamenáván barologgerem Solinst Gold na vrátnici areálu Bukov. Interval odečtu dat je 30 minut, data jsou automaticky ukládána v záznamovém zařízení. Při zpracování dat je prováděna kompenzace měření hladin na atmosférický tlak.

Tab. 30 Souřadnice monitorovaných vrtů v souřadném systému S-JTSK

Vrt	x	y
PV5	-1128953	-622211.7
PV6	-1128823	-622128.9
PV8	-1128355	-622105.9

Vydatnosti šesti povrchových pramenů (monitorované prameny vyznačeny na Obr. 112) jsou sledovány na měrných V profilech v intervalu jednou za čtvrt roku, vydatnost pramenů je měřena kalibrovanými měrnými nádobami. Klimatické údaje na lokalitě (množství srážek, teplotu vzduchu, směr větru, vlhkost vzduchu, barometrický tlak) zaznamenává meteorologická stanice DAVIS Vantage Pro 2 v blízkosti jámy Bukov (Obr. 129).



Obr. 128 Monitorovaný vrt PV-5



Obr. 129 Meteorologická stanice u jámy Bukov

Vzorky podzemních vod jsou odebírány v intervalu jednou za čtvrt roku v povrchové části lokality i v PVP Bukov. Součástí odběru vzorků je terénní měření chemicko-fyzikálních parametrů podzemních vod (měrná elektrická vodivost, pH, Eh - oxidačně-redukční potenciál, obsah rozpuštěného kyslíku, teplota vody), která jsou prováděna digitálními multimetry firmy Hach-Lange a Eutech Instruments. Sondy jsou před vlastním měřením kalibrovány pomocí patřičných kalibračních roztoků.

Tab. 31 Rozsah chemických analýz

základní analýza vod	Na, K, Mg, Ca, Fe, Cl, F, HCO ₃ , NO ₃ , SO ₄ , SiO ₂ , NH ₄ , pH, vodivost
stopové prvky	Al, As, Ba, P, Pb, Zn, Mn, Rb, Sr, Li, Mo, Fe
radioaktivní látky	U, Rn
formy uhlíku	TOC

Chemické analýzy podzemních vod jsou prováděny v akreditovaných laboratořích České geologické služby a firmy AQUATEST a.s. Rozsah analýz prováděných v rámci posledního čtvrtletního odběru vzorků u vod je uveden v Tab. 31. U stopových prvků a radiologie byly z analýz postupně vyřazeny prvky, jejichž obsahy byly pod hranicí citlivosti příslušné analytické metody. U vzorků z povrchové části lokality není stanovován celkový obsah organického uhlíku ve vodách (TOC).



Obr. 130 Osazení monitorovaného přítoku BK06



Obr. 131 Osazení monitorovaného přítoku BK23



Obr. 132 Osazení přítoku BK31 sběrnou plachtou a žlabem



Obr. 133 Osazení přítoku BK32 měrnými válci

Přehled monitorovaných přítoků podzemní vody do PVP Bukov je uveden v Tab. 32, jejich pozici znázorňuje Obr. 114. Významnější aktivní přítoky byly osazeny svodnými žlaby a plachtami, které přítok z širších zón a puklin koncentrují do jednoho místa, což umožňuje pravidelné měření vydatnosti jednotlivých přítoků. Všechny osazené přítoky s vydatností větší než $0,1 \text{ ml.s}^{-1}$ jsou manuálně měřeny 1x za týden pracovníky s. p. DIAMO. Vydatnost přítoků BK18 a BK31 je kontinuálně měřena průtokoměry Commacal (Obr. 118), vydatnost přítoku BK06 je měřena pomocí měrného V profilu a snímače tlaku BD Sensors. Na přítocích BK07, BK 15, BK23 a BK33, které jsou svedeny žlaby nízce nad počvou, je testováno měření průtoků pomocí záznamu času potřebného k naplnění kalibrovaných nádob. Vydatnost přítoku BK31 je sledována pomocí měrných válců s automatickým vypouštěním.

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

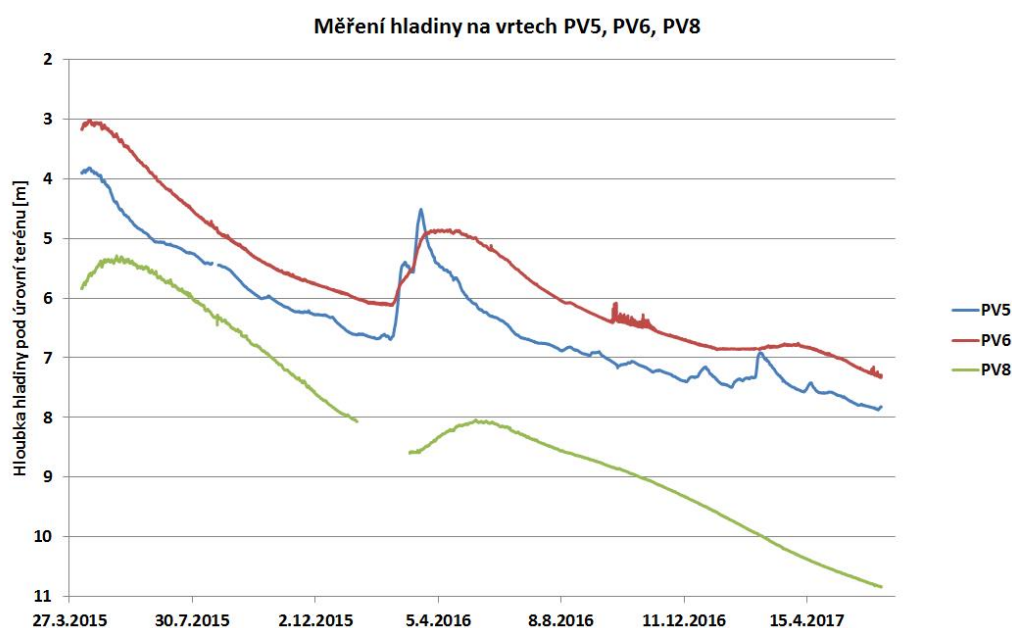
Tab. 32 Přehled monitorovaných a osazených hydrogeologických bodů s typem měření (A – ano)

č. DB	rozrážka	Metráž		pozice	typ průsaku	vydatnost	typ měření průtoku	čtvrtletní odběr vzorků
		od	Do	pozice (světové strany, ST strop)				
BK03	BZ-XIIJ	153,3	153,5	SV	z puklinové zóny	vlhkost, kapky	manuální	
BK04	BZ-XIIJ	159,8	160	SV, ST	z pukliny	kapky	manuální	
BK06	BZ-XIIJ	167	172	SV, ST	z pukliny, z puklinové zóny	výtok	přepad, tlakový snímač	A
BK06B	BZ-XIIJ	174,4	175	SV	z pukliny	výtok	manuální	
BK07	BZ-XIIJ	183	185	JZ	z puklinové zóny	výtok	měrná nádoba s automatickým vyprazdňováním	A
BK15	BZ-XIIJ	205	208	SV	ze svorníku	kapky	měrná nádoba s automatickým vyprazdňováním	A
BK18 (S-1)	BZ-XIIJ (VRK-1)	240		SV	z pukliny, výtok z vrtu	výtok	průtokoměr, teplota	A
BK23	BZ-XIIJ	155		JZ	z pukliny, svorník, liniový, výtok ze svorníku	výtok	měrná nádoba s automatickým vyprazdňováním	A
BK26	BZ-XIIJ	311	316	SV, ST, ST	poruchová zóna	výtok	měření průtoku chemickou metodou, nepravidelně	
BK27 (S-2)	BZ-XIIJ	310		SV	vrt	výtok	manuální	A
BK28 (S-3)	BZ-XIIJ	239,1		JZ	vrt	výtok	manuální (do 8/2015)	
BK29	BZ-XIIJ	190		JZ	ze svorníku	kapky	spojeno s BK33	
BK30 (S-8)	BZ-XIIJ (VRK-1)	240		SV	vrt	kapky	manuální, monitoring hladiny pomocí tlakového snímače	
BK31	BZ1-XII	13,5	18,5	S	zlom, pukliny	výtok	průtokoměr	A
BK32	BZ1-XII	30	32,5	J, S, ST	z pukliny	kapky	měrné válce	
BK33	BZ-XIIJ	189	192	JZ	z pukliny, z puklinové zóny	výtok	měrná nádoba s automatickým vyprazdňováním	
BK34 (S-14)	BZ1-XII	55,7		ST	vrt	výtok	manuální	
BK35	BZ1-XII	66,5	69	S	z pukliny, z puklinové zóny	kapky, výtok		A
BK38	ZK3-S	5	6	ST	pukliny	kapky		A

Povrchová část lokality

Režim hladin podzemní vody a vydatností pramenů

Výšky hladin podzemní vody v mělké části krystalinika monitorované ve vrtech PV5, PV6 a PV8 vykazovaly v monitorovaném období 2015 až 2017 poklesový trend (Obr. 134) způsobený dlouhodobým deficitem srážek, zejména sněhových. Absolutní pokles hladiny se u vrtů pohyboval mezi 3,5 a 5 m. Nejvýraznější pokles byl u vrtu PV8 ležícím na elevaci nad skládkou Bukov. U všech vrtů byl zaznamenán dočasný nárůst výšky hladiny v průběhu jara 2016, nárůst hladin v jarních měsících roku 2017 byl minimální. V grafu na Obr. 134 je patrný rozdílný režim jednotlivých vrtů. Vrt PV5 postihuje velmi mělkou část masivu s rychlou reakcí na lokálně zvýšené srážkové úhrny nebo tání sněhu. Vrt PV8 odpovídá režimu podzemních vod v puklinovém prostředí, odezva na srážky není tak výrazná a nastává se s zpožděním (maxima PV5 v první polovině března 2016, PV8 v polovině května 2016).



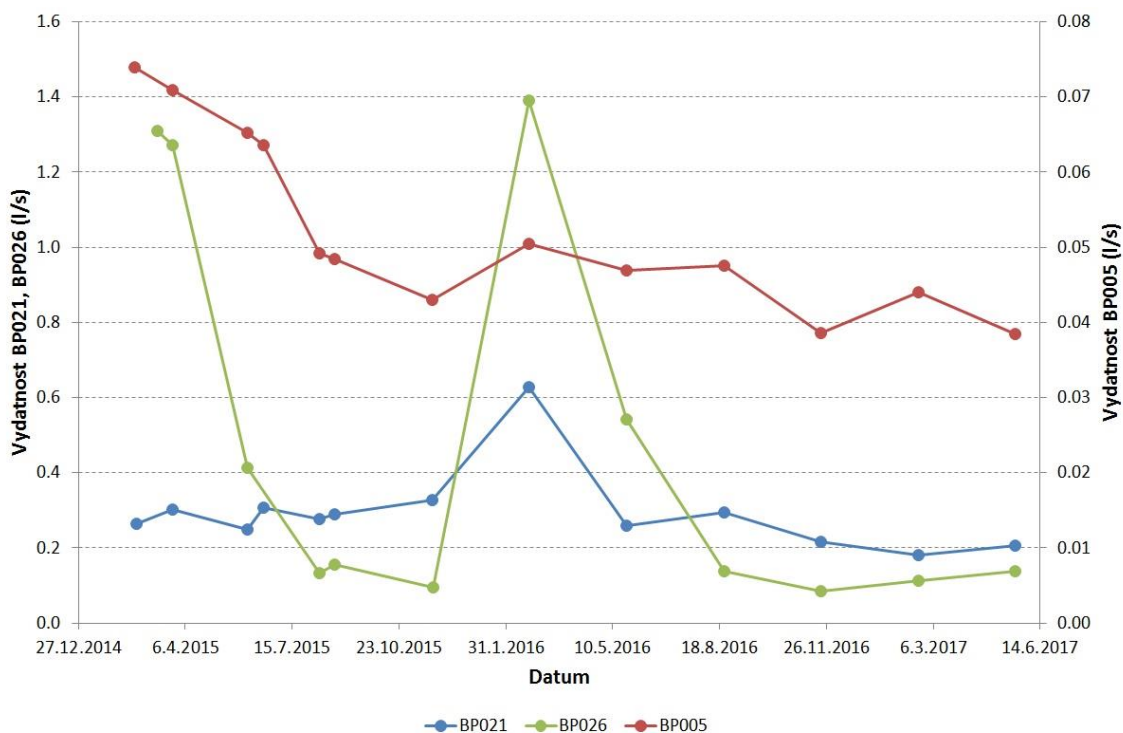
Obr. 134 Vývoj úrovně hladiny podzemní vody v monitorovaných vrtech v povrchové části lokality

Průměrné teploty podzemní vody se ve vrtech pohybovaly od 8,9 do 10,2 °C. Průběhy teplot ve vrtech PV5 (rozmezí 9–10,1 °C) a PV8 (rozmezí 8,6–9,1 °C) měly pozvolný charakter sinusové křivky bez výrazných oscilací. Nízká amplituda teploty u vrtu PV8 odráží menší vliv podnebí na teplotu vody v hlubším vrtu PV8 (17,51 m) v porovnání s PV5 (10,43 m). Teplota vody ve vrtu PV6 má méně pravidelný průběh s několika výraznými oscilacemi, teplota se pohybovala v rozmezí 9,3–11,3 °C.

Časový vývoj vydatnosti vybraných monitorovaných pramenů je znázorněn na Obr. 135. Vybrané prameny charakterizují různé úrovně oběhu podzemních vod a jejich režim. Pramen BP021 reprezentuje drenáž hlubšího oběhu podzemních vod, nachází se poblíž výrazné regionální poruchy a svým chemickým složením je blízký vodám v PVP Bukov. Vydatnost tohoto pramene je v čase stabilní. S výjimkou měření v únoru 2016, kdy do prostoru prameniště pronikla voda z tajícího sněhu, jsou odchylky vydatnosti od průměrné hodnoty do 30 %.

Časový průběh vydatnosti pramene BP005 dobře koresponduje s vývojem výšky hladiny ve vrtech PV6 a PV8 (Obr. 134) a charakterizuje puklinové prostředí krystalinika v přípovrchové zóně rozvolnění puklin. Přímé reakce na srážky a tání sněhu nejsou výrazné.

Pramen BP026 reprezentuje mělký oběh podzemních vod především ve zvětralinovém plášti a svrchní části puklinového prostředí, rozdíly mezi maximálními a minimálními průtoky jsou vysoké. V jarním období vydatnosti dosahují až 250 % průměrné hodnoty, minimální průtoky dosahují pouze 20% průměrné hodnoty průtoků. Výsledky terénních měření u pramenů zahrnuje Elektronická příloha 14.



Obr. 135 Vývoj vydatnosti u vybraných pramenů v povrchové části lokality

Změny chemického složení podzemních vod

Obdobně jako výška hladiny podzemní vody a vydatnosti pramenů také chemické složení podzemních vod je proměnlivé s časem a jeho změna je závislá na řadě faktorů, jako jsou klimatické poměry (teplota, srážky, vlhkost vzduchu) a antropogenní vliv (hnojení polí, solení komunikací). Čím hlubší je oběh podzemních vod, tím je menší vliv těchto faktorů a složení podzemní vody je stabilnější.

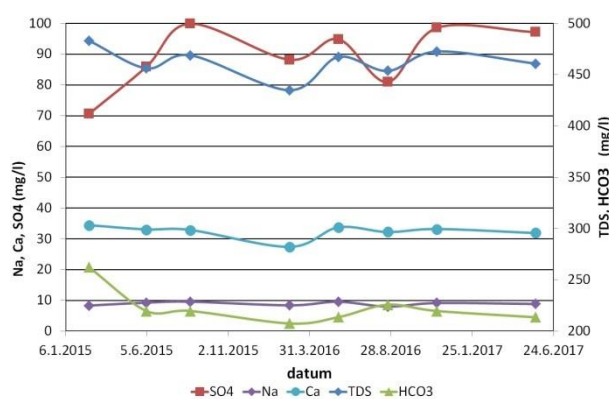
Na Obr. 135, Obr. 136, Obr. 137 a Obr. 138 je znázorněn časový vývoj obsahu dominantních kationtů (Ca, Na) a aniontů (HCO_3 a SO_4) v podzemních vodách z vybraných monitorovaných pramenů. Současně je v grafech zobrazena změna celkového obsahu rozpuštěných látek (TDS) jako indikátoru celkové změny chemického složení.

První dva grafy (Obr. 135 a Obr. 136) zobrazují vývoj chemického složení u pramene BP021 a BP005 reprezentující drenáž hlubšího oběhu podzemních vod v puklinovém prostředí krystalinika. Chemické složení podzemní vody z těchto pramenů je poměrně stabilní, maximální odchylky od průměrných obsahů jsou u hlavních kationtů a aniontů v naprosté

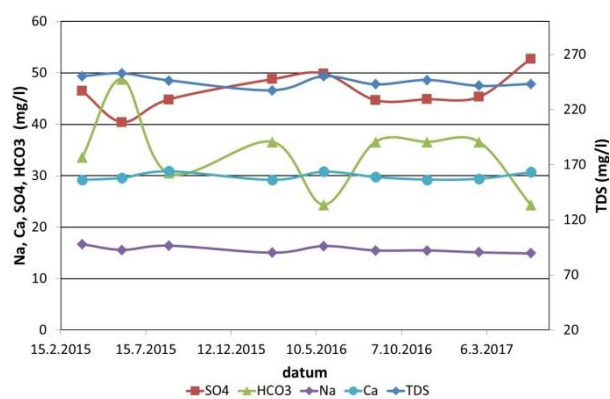
většině do 10 %, u obecně více rozkolísaných aniontů do 20 %, u pramene BP005 do 35 %. Složení podzemní vody není závislé na aktuální vydatnosti pramene.

Druhé dva grafy (Obr. 137 a Obr. 138) znázorňují změny chemického složení pramenů mělkého oběhu. Rozkolísanost obsahů jednotlivých iontů je zde výrazně vyšší, u stabilnějších prvků (hlavní kationty) je to do 20 % průměrného obsahu, u aniontů (HCO_3 , SO_4) do 50 až 80 %. U obou pramenů stoupal obsah síranů se snižující se vydatností, u pramene BP019 měl stejný trend i nárůst TDS a obsah vápníku.

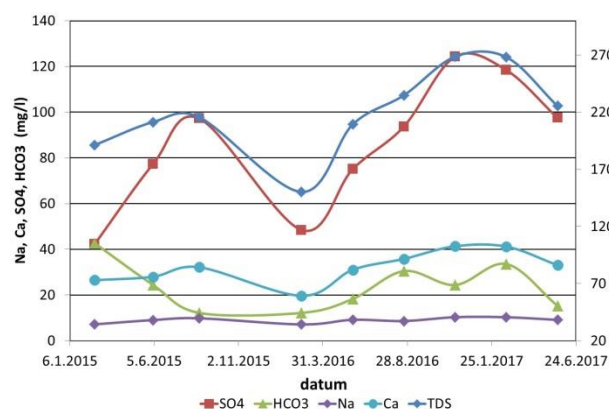
Další monitorované prameny BP001 i BP008 spadají do skupiny pramenů se stabilnějším chemickým složením, odchylky jsou obdobné jako u pramenů BP021 a BP005. Všechny tyto prameny leží v blízkosti zlomů (Obr. 112). Chemické analýzy podzemních vod ze vzorkovaných pramenů a přítoků do podzemí obsahuje Elektronická příloha 15.



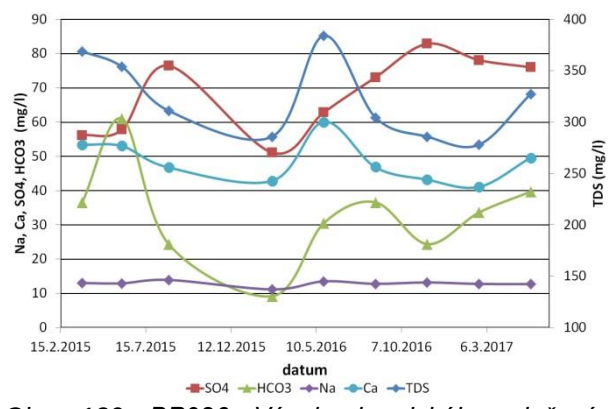
Obr. 136 Vývoj chemického složení podzemní vody u pramene BP021 – vybrané hlavní anionty a kationty



Obr. 137 Vývoj chemického složení podzemní vody u pramene BP005 – vybrané hlavní anionty a kationty



Obr. 138 Vývoj chemického složení podzemní vody u pramene BP019 – vybrané hlavní anionty a kationty



Obr. 139 BP026 Vývoj chemického složení podzemní vody u pramene BP026 – vybrané hlavní anionty a kationty

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

PVP Bukov

Režim vydatnosti přítoků

Vývoj vydatnosti jednotlivých přítoků podzemní vody do prostoru PVP zachycují grafy na Obr. 140 a Obr. 141. V grafech jsou znázorněny přítoky monitorované po delší dobu. Vzhledem k velkému rozptylu absolutních hodnot vydatností – od prvních litrů za sekundu po desetiny mililitrů za sekundu jsou hodnoty průtoků vyjádřeny v procentech první naměřené hodnoty.

První graf shrnuje vydatnější přítoky s vydatností v setinách l.s^{-1} a větší. Z těchto přítoků je nejstabilnější vydatnost u BK-18 (S-1), vydatnost tohoto výtoku od začátku pravidelného monitoringu v květnu 2015 trvale mírně klesá, celkový pokles je 20 % z počáteční hodnoty z 0,35 na 0,28 l.s^{-1} . Po dovržení vrtu, v květnu 2014 byla vydatnost výtoku 0,4 l.s^{-1} , celkový pokles je tedy 35 %.

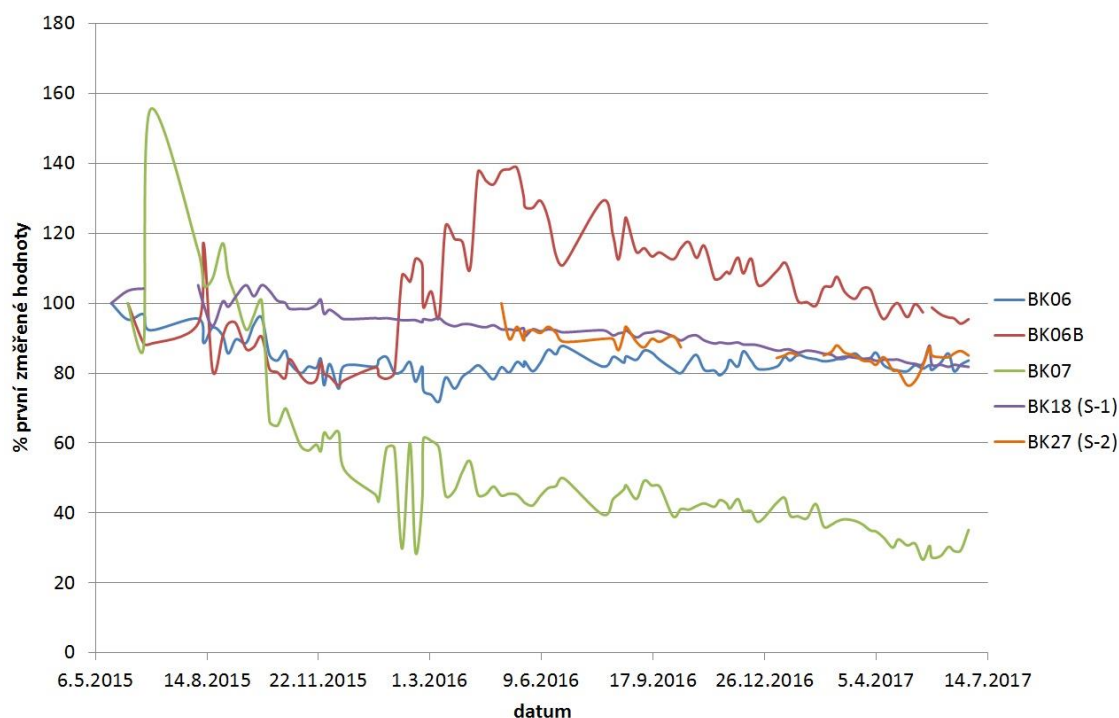
Obdobný trend mírného poklesu sleduje výtok z vrtu S-2 (BK27), technické podmínky na čelbě překopu BZ-XIIJ bohužel neumožňovaly jeho pravidelný monitoring. V září 2014 byla vydatnost vrtu 1,3 l.s^{-1} , v prosinci 2014 3 l.s^{-1} . Vysoká vydatnost vrtu v prosinci byla pravděpodobně spojena se změnami napjatosti v blízké poruchové zóně. Současná vydatnost výtoku je 1 l.s^{-1} , u tohoto přítoku poklesla celková vydatnost přibližně o 25 % v průběhu tří let.

Poměrně stabilní je také přítok z široké poruchové zóny BK06, k poklesu vydatnosti cca o 20 % došlo v prvním půlroce monitoringu, od října 2015 je vydatnost relativně stabilní, pouze mírně kolísá kolem hodnoty 0,27 l.s^{-1} .

Dynamický vývoj vydatnosti má naopak přítok BK06B, ležící poblíž poruchové zóny BK06, v prvních měsících měření byl zaznamenán pokles vydatnosti o 20 % původní hodnoty, poté byla vydatnost po dobu 4 měsíců stabilní a následoval prudký nárůst, nejvyšší vydatnost zjištěná v červnu 2016 byla 140 % první naměřené hodnoty. Od června 2016 do současnosti vydatnost opět klesá.

K výrazným změnám vydatnosti došlo i u přítoku BK07, v prvních deseti měsících byl zaznamenán pokles na 40 % původní hodnoty, následoval mírný pokles odpovídající výtokům z vrtů S-1 a S-2, v druhé polovině roku 2016 byly vydatnost poměrně stabilní (hodnota cca 0,013 l.s^{-1}), poté následoval opět pomalý pokles. V době prudkého poklesu vydatnosti přítoku BK07 se v jeho blízkosti objevil nový přítok BK33 s vydatností odpovídající přibližně 25 % první naměřené vydatnosti přítoku BK07. Je možné předpokládat, že podzemní voda z poruchové zóny BK07 začala částečně proudit jiným systémem puklin k BK33.

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

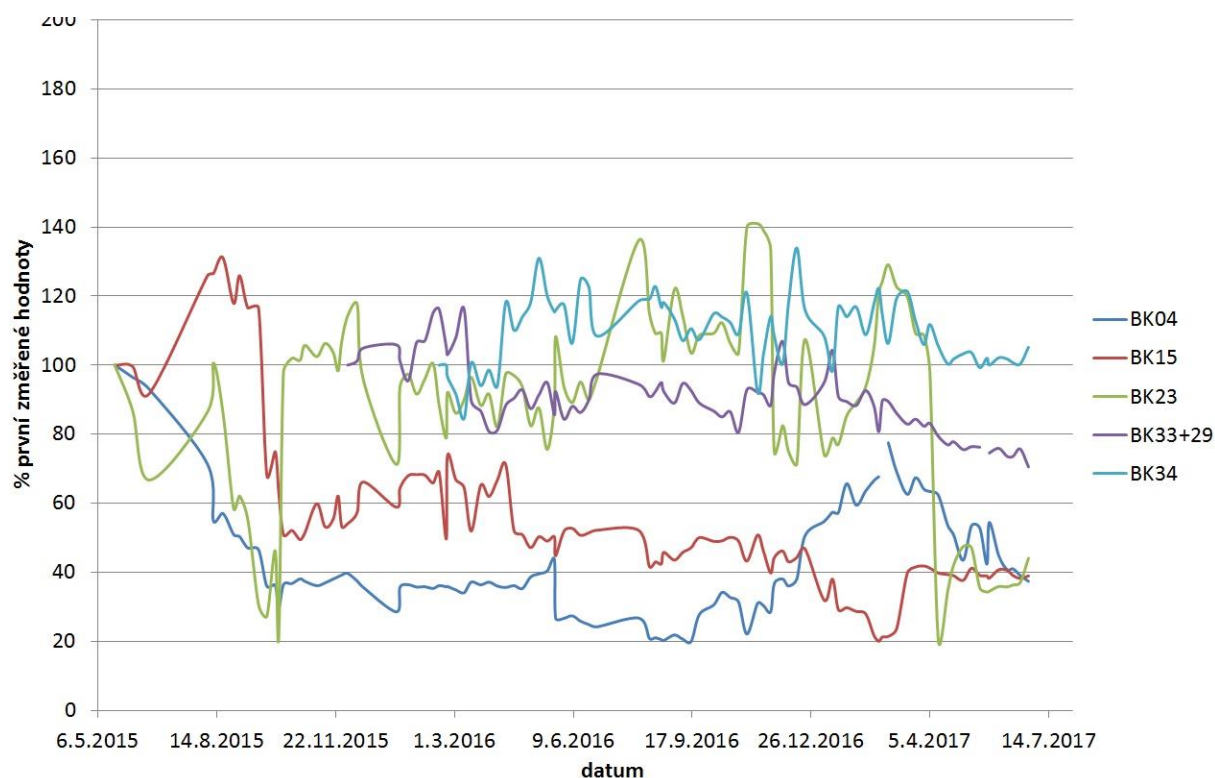


Obr. 140 Časový vývoj vydatnosti přítoků podzemní vody do PVP, přítoky s vydatností v setinách l.s^{-1} a větší

V grafu na Obr. 141 jsou znázorněny změny vydatnosti přítoků s malou vydatností (ml.s^{-1} a desetiny ml.s^{-1}). Rozkolísanost vydatnosti je zde mnohem vyšší než u vydatnějších přítoků, nejsou zde tak výrazné trendy celkového poklesu vydatnosti.

Například vydatnost průsaku BK04 postupně klesala až na 20 % ($0,0001 \text{ l.s}^{-1}$) původní hodnoty, které dosáhla v září 2016, poté začala vydatnost opět stoupat až do března 2017 a v současné době má opět klesající trend.

Vydatnost přítoku BK15 po počátečním výrazném nárůstu a poklesu zůstává vždy po několik měsíců poměrně stabilní a poté nárazově poklesne nebo vzroste. Největší variabilita vydatnosti byla zaznamenána u přítoku BK23, po počátečním prudkém poklesu následoval prudký nárůst a k dalším nárůstům i poklesům vydatnosti o desítky procent docházelo i v průběhu dalšího monitoringu.



Obr. 141 Časový vývoj vydatnosti přítoků podzemní vody do PVP, přítoky s vydatností v ml.s^{-1} a desetinách ml.s^{-1}

Z uvedených dat vyplývá, 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 jsou stabilnější, méně vydatné přítoky reagují 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 (viz Obr. 114). Na druhou stranu se objevilo několik průsaků nových a v několika případech došlo i k výraznému nárůstu vydatnosti v průběhu měření.

Vývoj chemického složení podzemních vod v průběhu výstavby

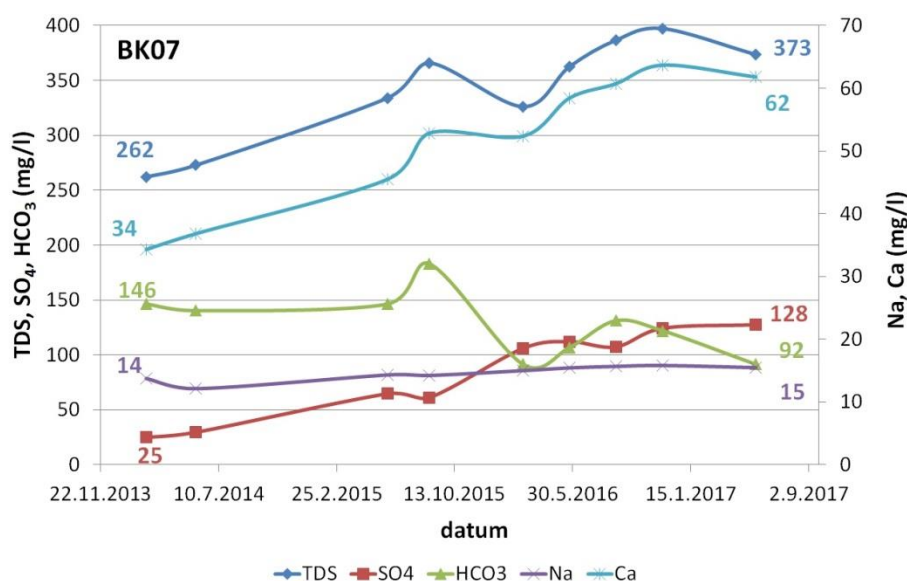
Časová změna chemického složení podzemních vod přítékajících do PVP Bukov je v následujícím textu prezentována na příkladu vybraných přítoků, které jsou v rámci monitorovacího programu pravidelně vzorkovány a současně k nim jsou k dispozici chemické analýzy z roku 2014 (odběry vzorků před zahájením projektu). To umožňuje hodnocení změn chemického složení v průběhu 3 let po vyražení prostoru PVP.

Na Obr. 142, Obr. 143, Obr. 145, Obr. 146 a Obr. 147 je znázorněn časový vývoj obsahu dominantních kationtů (Ca, Na) a aniontů (HCO_3 a SO_4) v podzemních vodách z vybraných přítoků do PVP. V grafech jsou číselně uvedeny obsahy jednotlivých iontů při prvním a posledním odběru. Současně je v grafech zobrazena změna celkového obsahu rozpuštěných látek (TDS) jako indikátoru celkové změny chemického složení.

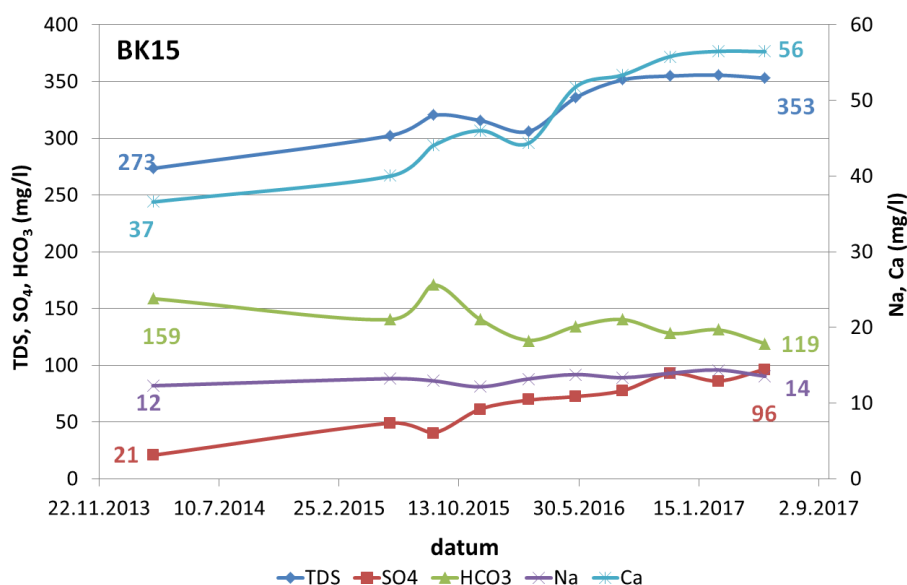
První dva grafy reprezentují přítoky BK07 a BK15 s nejvýraznější změnou chemického složení od prvního odběru vzorku do současnosti. Zaznamenaný vývoj obsahů hlavních rozpuštěných iontů ve vodě je u obou přítoků obdobný, v průběhu tří let došlo k výraznému

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

nárůstu obsahu síranů na čtyř až pětinasobek původní hodnoty, zatímco obsah hydrogenuhlíčanů se mírně snížil (Obr. 142, Obr. 143). Současně stoupl obsah vápníku u BK07 na dvojnásobek původní hodnoty a přibližně o třetinu u přítoku BK15 a obsah hořčíku u obou přítoků cca o polovinu původního obsahu. Výrazný nárůst byl u obou přítoků také u obsahů chloridů, původní obsahy 3 až 4 mg.l⁻¹ vzrostly na 17 mg.l⁻¹ (BK15), respektive 23 mg.l⁻¹ (BK07). Nárůst obsahu sodíku byl u obou přítoků minimální, obsah draslíku a fluoridů zůstává konstantní. Současně s nárůstem obsahu některých rozpuštěných iontů narůstal i celkový obsah rozpuštěných látek (TDS). Z průběhu grafů vyplývá, že ke konci roku 2016 došlo k relativní stabilizaci chemického složení u těchto přítoků, z některých složek byly v posledním pololetí monitoringu zaznamenány pouze minimální změny obsahů.



Obr. 142 Vývoj chemického složení podzemní vody u přítoku BK07 – vybrané hlavní anionty a kationty



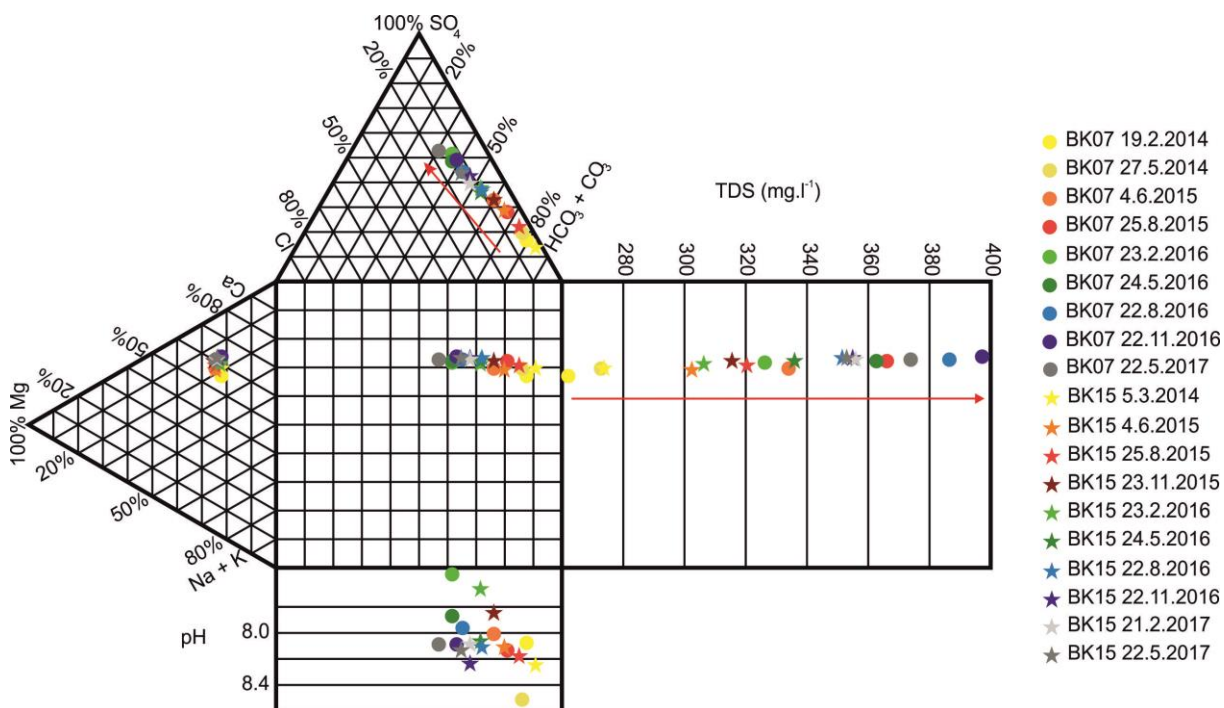
Obr. 143 Vývoj chemického složení podzemní vody u přítoku BK15 – vybrané hlavní anionty a kationty

Změny poměrného zastoupení hlavních iontů zobrazuje Durovův diagram na Obr. 144. Červenými šipkami je znázorněna postupná změna v TDS a poměrném zastoupení aniontů.

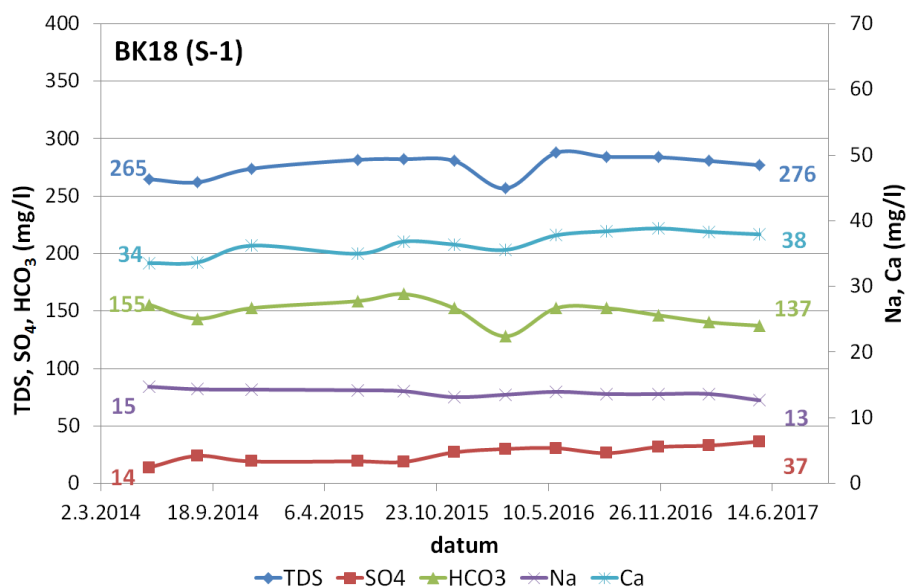
 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

Zatímco poměrné zastoupení kationtů se změnilo jen slabě – mírný posun k Ca, u aniontů je změna zásadní, z vod s obsahem HCO_3 nad 80 meq% se postupně stávají vody síranové, zastoupení HCO_3 klesá pod 40 meq%. Poměrné zastoupení chloridů stoupl na 10 meq%. Posun ve složení podzemní vody je u BK07 rychlejší než u BK15, linie posunu je stejná.

Zatímco u přítoků BK06 a BK15 došlo v průběhu tří let monitoringu k výrazné změně chemického složení podzemních vod (vysoké nárůsty obsahů síranů a vápníku, pokles hydrogenuhličitanů), jinde tato změna je jen nevýrazná nebo téměř zanedbatelná.



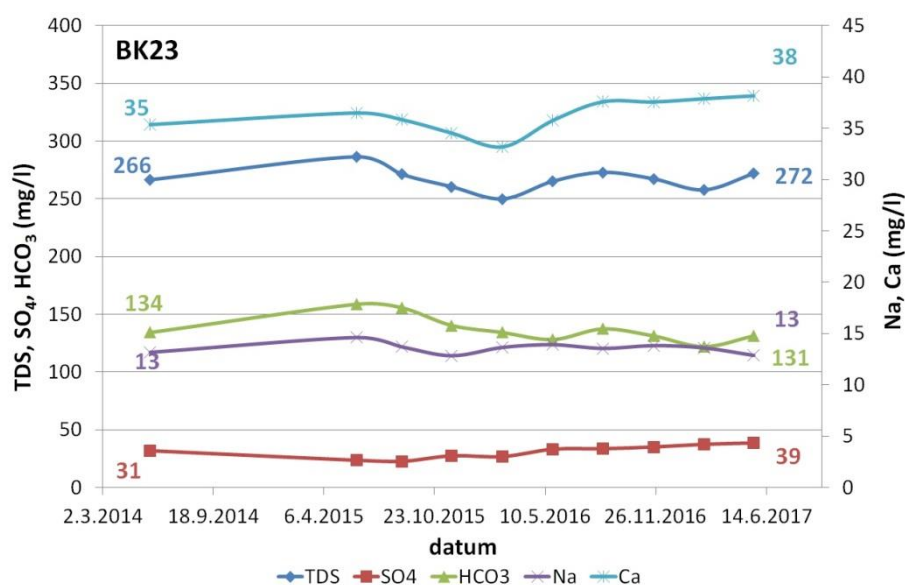
Obr. 144 Durovův diagram vývoje chemického složení přítoků BK07 a BK15



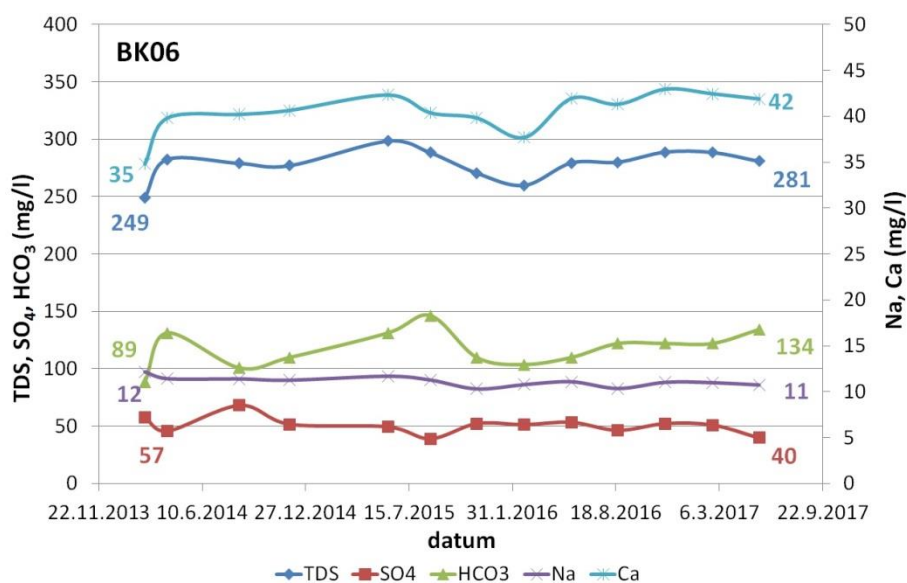
Obr. 145 Vývoj chemického složení podzemní vody u přítoku BK18 (vrt S-1) – vybrané hlavní anionty a kationty

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

Příkladem jen velmi mírné změny chemického složení je výtok z vrtu S-1 (BK18), u kterého je trend vývoje obdobný jako u předchozích dvou přítoků (nárůst obsahu síranů, vápníku a TDS, pokles hydrogenuhličitanů). Změny (nárůst, pokles) byly u většiny prvků do 10 % původní hodnoty, pouze u síranů se jednalo o nárůst o 25 %. U BK18 je odebírána vzorek ze zapakrovaného vrtu, vydatnost výtoku z vrtu je poměrně vysoká – cca 0,3 l.s⁻¹, možnost oxidace horninového prostředí a podzemní vody v profilu vrtu je proto malá, a tomu odpovídá i velmi pomalá změna chemického složení podzemních vod.



Obr. 146 Vývoj chemického složení podzemní vody u přítoku BK23 – vybrané hlavní anionty a kationty



Obr. 147 Vývoj chemického složení podzemní vody u přítoku BK06 – vybrané hlavní anionty a kationty

Přítok se stabilním chemickým složením je BK23, rozdíly v obsazích hlavních iontů se v průběhu monitoringu měnily minimálně (rozdíly do 15 % původních obsahů, 20 % u SO₄). Není zde možné pozorovat jasný trend, obsahy jednotlivých iontů v průběhu času velmi slabě kolísají. Důvod chemické stability výtoku BK23 není jasný. Jedná se o přítok

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

s poměrně malou vydatností v řádu ml.s^{-1} , výtok je vázán částečně na návrt pro svorník a částečně na systém puklin poblíž počvy, nedá se zde tedy předpokládat nízká míra oxidace prostředí. Přítok BK23 má současně poměrně netypický režim (Obr. 140) s nárůstem vydatnosti.

Posledním přítokem s relativně stabilním chemickým složením je poruchová zóna BK06. Obsahy sodíku a draslíku se s časem prakticky nemění, obsah síranů hydrogenuhličitánů, hořčíku, chlórů a TDS kolísá kolem střední hodnoty bez výrazného trendu. Pouze u vápníku je v grafu na Obr. 147 slabý náznak nárůstu obsahu. Podzemní voda prosakující poruchovou zónou měla od počátku odlišné složení ve srovnání s ostatními přítoky do PVP (Rukavičková et al. 2016). Vyšší obsahy síranů, uranu a tritia indikovaly zdroj ve vyšších patrech dolu. Je proto pravděpodobné že podzemní voda z přítoku BK06 již prodělala změnu vlivem oxidačních podmínek v prostoru dolu na své cestě do PVP a v současné době už k výrazným změnám nedochází.

Tab. 33 Příklady chemických analýz vybraných monitorovaných přítoků – první část

č. DB	typ výtoku	datum odběru	M	pH	Fe	Mn ²⁺	SiO ₂
			mg.l ⁻¹		mg.l ⁻¹	mg.l ⁻¹	mg.l ⁻¹
BK06	výtok z poruchové zóny	19.2.2014	249,17	7,82	0,07	34,0	31,30
BK06	výtok z poruchové zóny	22.11.2016	288,85	8,08	< 0,05	50,0	30,20
BK18	výtok z vrtu	27.5.2014	264,79	8,57	0,05	24,0	33,50
BK18	výtok z vrtu	22.11.2016	283,88	8,16	< 0,05	57,0	34,50
BK07	výtok z poruchové zóny	19.2.2014	262,13	8,07	0,21	26,0	27,40
BK07	výtok z poruchové zóny	22.11.2016	397,15	8,08	< 0,05	< 5,0	31,10
BK15	výtok z puklin	5.3.2014	273,43	8,25	0,06	14,0	31,60
BK15	výtok z puklin	22.11.2016	354,86	8,23	0,06	19,0	31,20

Tab. 34 Příklady chemických analýz vybraných monitorovaných přítoků – druhá část

č. DB	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	F ⁻
	mg.l ⁻¹	mg.l ⁻¹	mg.l ⁻¹	mg.l ⁻¹	mg.l ⁻¹	mg.l ⁻¹	mg.l ⁻¹	mg.l ⁻¹	mg.l ⁻¹
BK06	12,16	2,45	7,99	34,80	88,50	57,64	13,96	< 0,10	0,27
BK06	11,02	2,62	9,94	42,97	122,00	52,21	17,58	0,11	0,16
BK18	14,74	2,46	7,76	33,57	155,60	13,89	2,92	< 0,10	0,30
BK18	13,62	2,42	8,42	38,84	146,40	31,74	7,71	< 0,10	0,19
BK07	13,74	2,45	8,11	34,31	146,40	24,90	4,33	< 0,10	0,29
BK07	15,82	2,86	13,93	63,68	122,00	124,29	23,11	0,15	0,16
BK15	12,30	2,14	8,51	36,58	158,70	20,75	2,51	< 0,10	0,29
BK15	13,96	2,48	12,80	55,83	128,10	92,82	17,38	< 0,10	0,17

2.4.4 Chemické složení podzemních vod v dole Rožná a celková představa o vývoji chemického složení podzemních vod na lokalitě

Základní chemické složení podzemních vod

Chemické složení podzemních vod v prostoru dolu Rožná je ovlivněno dvěma základními faktory. Prvním z nich je hloubka průsaku podzemní vody do dolu a druhým z nich je

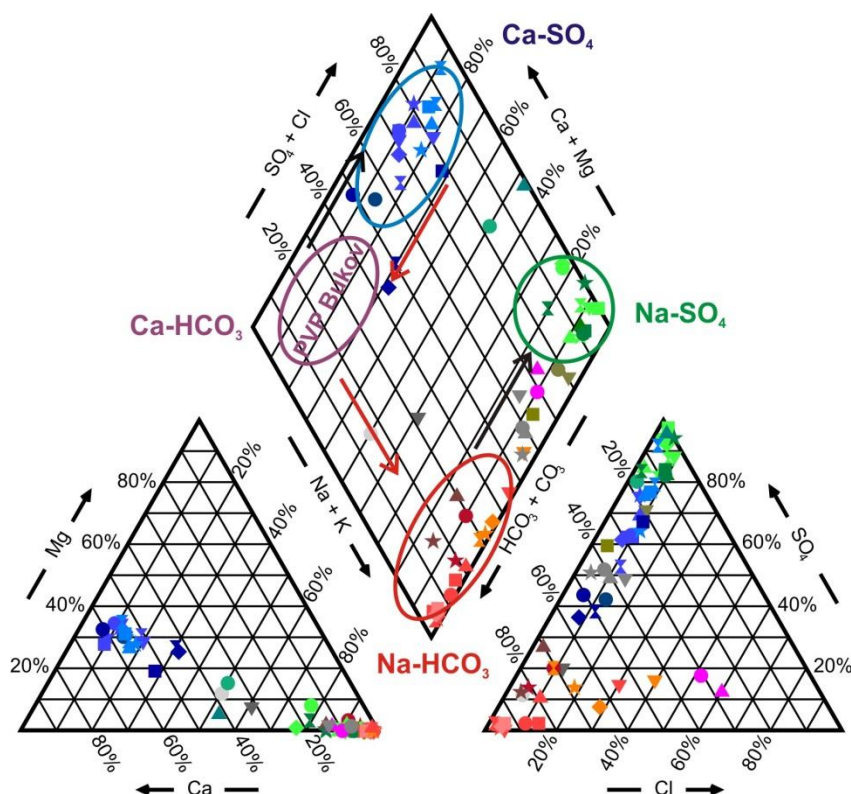
ovlivnění primárního chemického složení podzemních vod oxidačním prostředím v prostoru dolu.

Z hlediska zastoupení hlavních kationtů můžeme vody v dole Rožná rozdělit do dvou základních skupin:

1. vody s naprostou převahou sodíku nad 80 meq%, u většiny vzorků nad 90 meq% a s minoritním zastoupením ostatních kationtů;
2. vody s převahou vápníku s typickým poměrným zastoupením hlavních kationtů: Ca 55 meq%, Mg 30 meq% a Na 15 meq%, do tohoto typu spadají také podzemní vody v PVP Bukov (Obr. 121).

Obě skupiny jsou poměrně vyhraněné (viz Obr. 148), bylo odebráno jen minimum vzorků, které můžeme označit za přechodné mezi oběma typy (pouze 4 vzorky z celkově hodnocených 64).

Poměrné zastoupení aniontů takto vyhraněné není, existuje relativně plynulý přechod mezi vodami s převahou síranů a vodami s převahou hydrogenuhličitanů, v nejnižších patrech dolu pak přecházejí vody hydrogenuhličitanové do chloridových.



Obr. 148 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

V Piperově diagramu na Obr. 148 je možné podle poměrného zastoupení hlavních iontů vyčlenit tři hlavní hydrochemické typy vyskytující se v prostoru dolu Rožná mimo PVP Bukov:

- typ Ca-SO₄ je v diagramu vyznačen modrými barvami;
- typ Na-SO₄ reprezentuje zelená barva;
- typ Na-HCO₃ je vyznačen červenou barvou.

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

V malé míře se v hloubkách pod 1000 m pod zemským povrchem vyskytují vody typu Na-Cl. příklady reprezentativních chemických analýz pro jednotlivé typy jsou uvedeny v Tab. 35 a Tab. 36.

Tab. 35. Chemické složení podzemních vod v dole Rožná – vybrané typické analýzy pro jednotlivé hydrochemické typy, první část

č. DB	patro	typ výtoku	typ vody	datum odběru	M	pH	Fe	Mn ²⁺	SiO ₂
					mg.l ⁻¹		mg.l ⁻¹	μg.l ⁻¹	mg.l ⁻¹
BR41	8	výtok z pukliny	Ca-SO ₄	23.5.2016	714,80	8,08	0,06	14,0	21,40
BR44	10	kapky z puklinového pásma	Ca-SO ₄	23.5.2016	1137,20	8,05	0,06	6,0	22,00
BR01	24	výtok z pukliny	Na-HCO ₃	25.8.2015	414,76	9,06	< 0,05	< 5,0	13,80
BR29	18	kapky z puklin	Na-HCO ₃	22.3.2016	208,84	8,21	< 0,05	< 5,0	12,80
BR34	24	kapky ze zlomové zóny	Na-Cl	22.3.2016	364,71	8,63	< 0,05	12,0	38,50
BR35	24	kapky z kataklazitové zóny	Na-Cl	22.3.2016	387,44	9,07	< 0,05	< 5,0	39,60
BR24	14	výtok z pukliny	Na-SO ₄	22.2.2016	413,17	8,86	< 0,05	< 5,0	16,80
BR32	20	kapky z puklinového pásma	Na-SO ₄	22.3.2016	822,45	9,10	< 0,05	5,0	22,50

Tab. 36 Chemické složení podzemních vod v dole Rožná – vybrané typické analýzy pro jednotlivé hydrochemické typy, druhá část

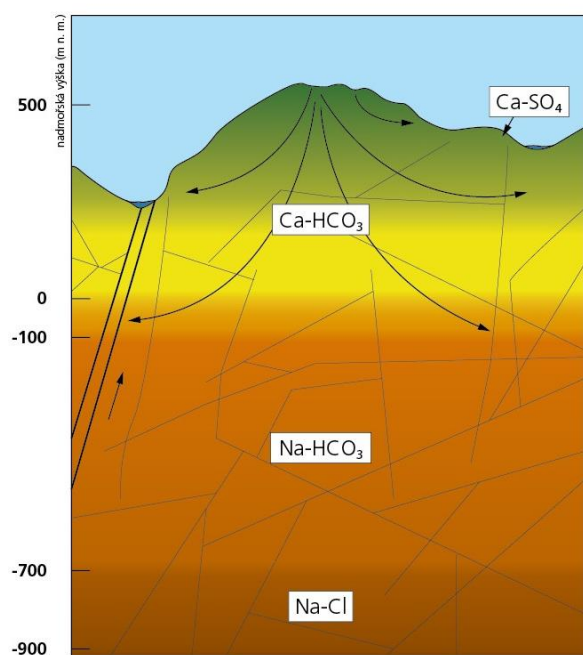
č. DB	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	F ⁻
	mg.l ⁻¹	mg.l ⁻¹	mg.l ⁻¹	mg.l ⁻¹	mg.l ⁻¹	mg.l ⁻¹	mg.l ⁻¹	mg.l ⁻¹	mg.l ⁻¹
BR41	28,03	3,63	38,79	109,81	189,2	296,94	26,76	< 0,10	0,133
BR44	49,03	5,05	64,05	186,07	152,6	612,28	45,83	< 0,10	0,189
BR01	116,53	0,91	0,14	1,03	265,4	2,05	6,64	< 0,10	8,246
BR29	57,47	0,19	0,01	1,66	122,0	2,25	3,22	< 0,10	9,204
BR34	97,43	0,78	1,00	11,92	79,3	29,20	103,88	0,16	2,489
BR35	105,53	0,40	0,02	10,13	91,5	43,85	95,17	< 0,10	1,191
BR24	118,41	0,92	0,04	7,08	24,4	228,26	16,80	< 0,10	0,441
BR32	216,45	1,13	0,03	31,80	< 0,5	526,38	22,55	< 0,10	1,565

Získané výsledky z PVP Bukov a z prostoru dolu Rožná umožňují sestavit přehled předpokládaného vývoje chemického složení podzemních vod na lokalitě, tento vývoj je schematicky znázorněn na Obr. 149, Obr. 150 a Obr. 151.

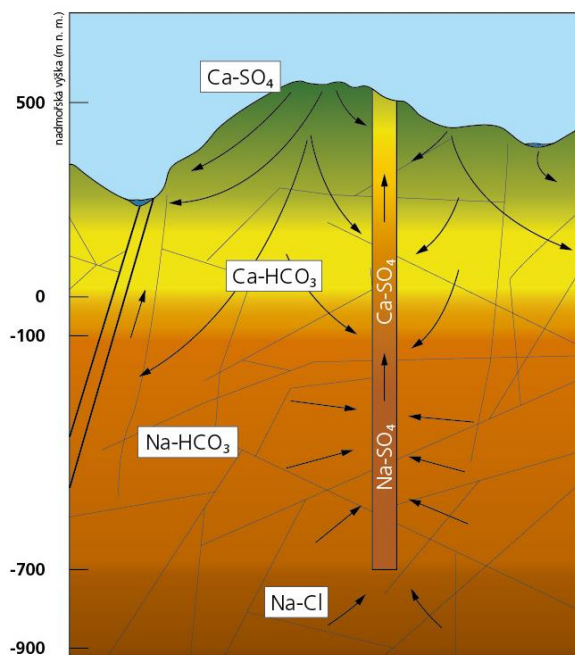
Vývoj chemického složení je zde možné rozdělit do dvou částí. První je přirozená změna chemického složení podzemní vody se vzrůstající hloubkou jejího výskytu v krystalických horninách. V antropogenně neporušeném horninovém prostředí se od zemského povrchu do hloubek vyšších než 1 km vyskytují tyto typy podzemních vod:

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 (Obr. 121). Tyto vody mají vyšší poměrné zastoupení síranů – nad 40 meqv% (HCO₃ vždy pod 40 meqv%). Zastoupení kationtů odpovídá výše popsané skupině s převahou vápníku 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-Cl** 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-Cl.



Obr. 149 Ideové schéma vývoje chemického složení a proudění podzemních vod s hloubkou v horninovém prostředí krystalinika bez antropogenního zásahu



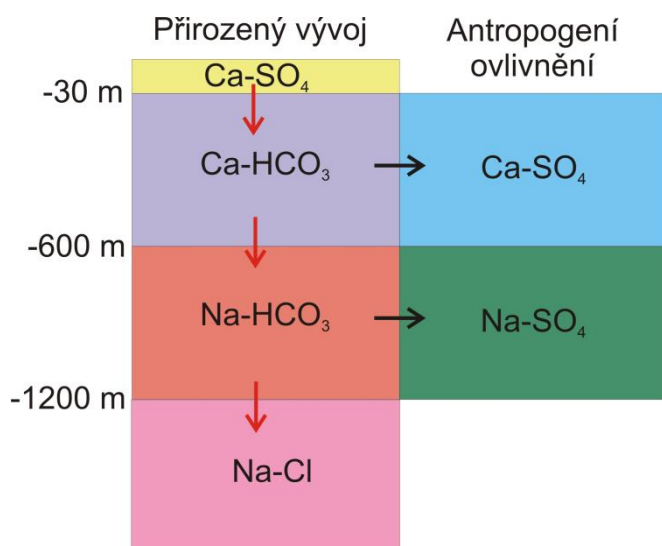
Obr. 150 Ideové schéma vývoje chemického složení a proudění podzemních vod s hloubkou v horninovém prostředí krystalinika při ovlivnění důlním dílem

Druhou částí vývoje chemického složení podzemních vod v oblasti je změna složení vlivem toku a stagnace podzemních vod v otevřených prostorech 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

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

dolu se projevuje zejména ve změně poměrného zastoupení aniontů, původně hydrogenuhlíčitanové vody se mění na síranové díky zvyšování obsahu rozpuštěných síranových iontů ve vodách. Tento proces v současné době probíhá v prostoru PVP Bukov (Obr. 144). Mezi antropogenně ovlivněné patří tyto typy vody v dole Rožná:

1. Vody typu **Ca-SO₄** (modrá barva na Obr. 148) 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. 148) 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. 151 Předpokládaný vývoj podzemních vod v prostoru dolu Rožná a v jeho okolí, barvy odpovídají barvám jednotlivých typů, které byly použity v diagramech na Obr. 121 a Obr. 148

Ze srovnání hodnot pH pro jednotlivé hydrochemické typy (Tab. 37) vyplývá, že s hloubkou oběhu (rostoucí dobou zdržení v horninovém masivu) střední hodnota pH stoupá z pH 7 v mělkých částech krystalinika až na pH 9 v hlubokých částech, kde se vyskytují vody s hodnotou pH až okolo 10. Vlivem setrvání vody v otevřeném prostoru důlního díla hodnota pH mírně klesá, vody typů Ca-SO₄ a Na-SO₄ mají nižší pH ve srovnání s jejich primárními zdroji.

Celkový obsah rozpuštěných látek (TDS) se v nenarušeném prostředí mění s hloubkou jen minimálně. Průměrná hodnota TDS je u typu Ca-SO₄ a Ca-HCO₃ obdobná v rozsahu 270 až 280 mg.l⁻¹, v hlubokých částech krystalinika u vod typu Na-HCO₃ a Na-Cl je střední hodnota TDS v rozsahu 350 až 380 mg.l⁻¹. Jedná se o vody slabě mineralizované s mírným nárůstem TDS směrem do hloubky.

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

Tab. 37 Přehled hodnot pH a celkového obsahu rozpuštěných látek (TDS) pro jednotlivé hydrochemické typy na lokalitě.

hydrochemický typ	pH			TDS (mg.l ⁻¹)		
	minimum	geometrický průměr	maximum	minimum	aritmetický průměr	maximum
přírodní vývoj						
Ca-SO ₄	6,07	7,18	8,42	186,4	271,7	493,6
Ca-HCO ₃	7,94	8,22	8,61	264,8	282,2	313,8
Na-HCO ₃	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

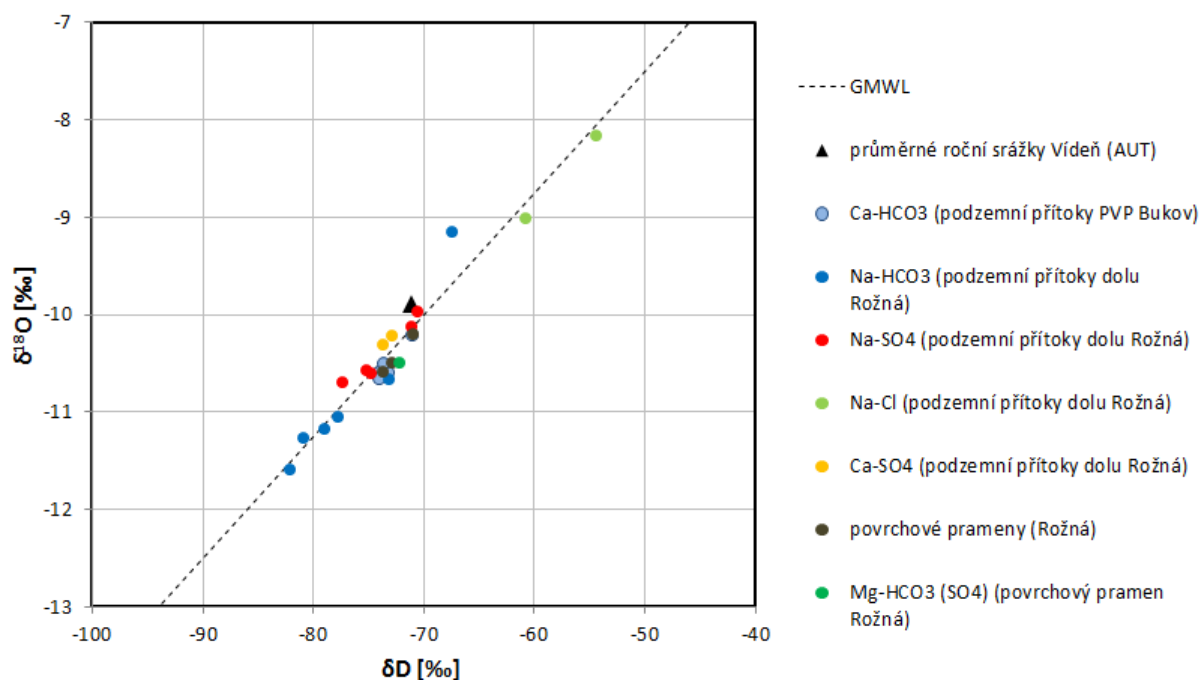
Výrazně odlišné průměrné hodnoty TDS byly zaznamenány u antropogenně ovlivněných vod typu Ca-SO₄ a Na-SO₄, kde je celkový obsah rozpuštěných látek několikanásobně vyšší, průměrné hodnoty jsou v rozmezí 750–970 mg.l⁻¹, jsou to vody středně mineralizované. U některých vod těchto typů dosáhly hodnoty TDS až 2000 mg.l⁻¹ (silně mineralizované vody).

Stabilní izotopy H, O a S

Stabilní izotopy vodíku, kyslíku a síry

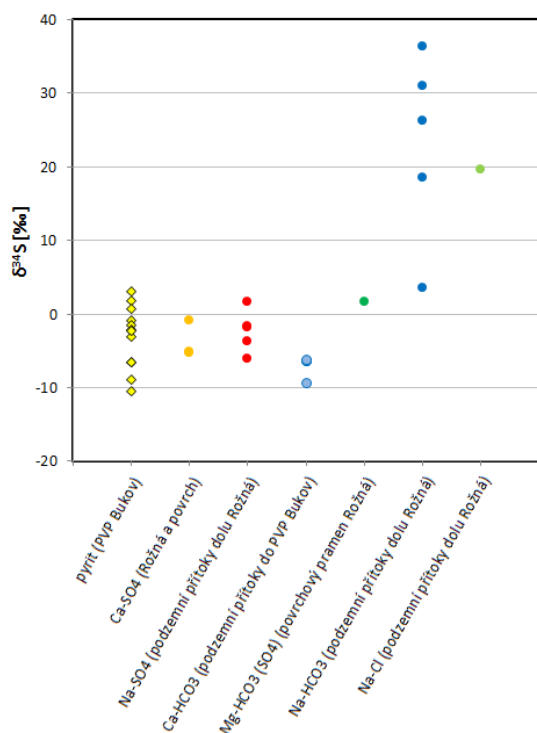
Analýzy izotopických poměrů stabilních izotopů kyslíku, vodíku a síry ve vodě se používají k určení původu zdroje. Na PVP Bukov byly sledovány parametry δ²H, δ¹⁸O a δ³⁴S na objektech BK06, BK18, BK26 (pouze δ²H a δ¹⁸O), BK27 a BK28 na dvanáctém patře důlního díla. Na objektech BK06, BK18, a BK28 byly prováděny odběry 18.6.2015 a 25.8.2015, zatímco na objektech BK26 a BK27 byly vzorky odebrány pouze jednou 25.8.2015, respektive 18.6.2015. U izotopického složení kyslíku a vodíku nebyly v případě opakovaných odběrů zjištěny významnější rozdíly hodnot. Zjištěné hodnoty byly porovnány s analýzami vod z povrchu (lokalita Rožná) a z důlního díla Rožná. Výsledky analýz obsahuje Elektronická příloha 15.

Hodnoty δ²H se pohybují v rozmezí od -74,2 ‰ do -71,1 ‰ s průměrem -73,2 ‰. Hodnoty δ¹⁸O se pohybují v rozmezí od -10,7 ‰ do -10,2 ‰ s průměrem -10,5 ‰. Zmíněné hodnoty izotopického složení leží na globální meteorické linii vody GMWL (Craig 1961) v blízkosti hodnot povrchových pramenů lokality Rožná a síranových vod z dolu Rožná mělkého oběhu. Uhličitánové vody z dolu Rožná vykazují naproti tomu silnější ochuzení o těžší izotopy, což by mohlo naznačovat mísení s vodou infiltrovanou v období nižší průměrné roční teploty, než jaká panuje v současnosti (Hanusová a Vencel 2013). Naproti tomu obohacení o těžší izotopy v případě chloridových vod hlubokého oběhu z dolu Rožná ukazuje na pravděpodobné mísení s fosilní mořskou vodou (Obr. 152).

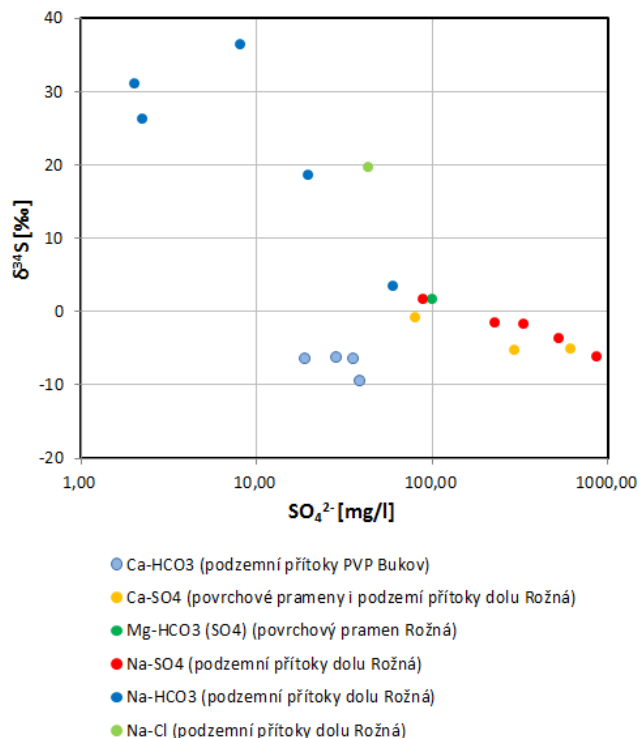


Obr. 152. Izotopické složení vodíku a kyslíku podzemních a povrchových vod z PVP Bukov a Rožné; GMWL podle Craiga (1961), izotopické složení průměrných ročních srážek podle Hagera a Foelscheho (2015)

Z hydrogenuhličitanových vod na PVP Bukov byly provedeny analýzy izotopického složení síry na 4 objektech. Objekty BK18, BK27 a BK28 vykazují téměř shodné hodnoty $\delta^{34}\text{S}$ - 6,4 ‰, -6,3 ‰ a -6,2 ‰, zatímco objekt BK06 vykazuje odlišnou hodnotu $\delta^{34}\text{S}$ -9,4 ‰, což naznačuje částečně odlišný původ vody. Průměrná hodnota $\delta^{34}\text{S}$ -7,1 ‰ na PVP Bukov je nejnižší ve srovnání s analýzami z povrchových pramenů a z podzemních přítoků dolu Rožná. V PVP Bukov bylo rovněž změřeno izotopické složení pyritu v rozsahu $\delta^{34}\text{S}$ -10,4 až 3,1 ‰. Síranové vody přítoků dolu Rožná a povrchové prameny také vykazují nízké hodnoty $\delta^{34}\text{S}$. Lze předpokládat, že izotopické složení síry ve vodě odpovídá izotopickému složení pyritu, ze kterého se zvětráváním sírany uvolňují. Odlišná situace platí v případě Na-HCO₃ a Na-Cl vod podzemních přítoků do dolu Rožná. Jejich $\delta^{34}\text{S}$ se pohybuje v kladných hodnotách mezi 20 a 40 ‰ (Obr. 153). Tuto situaci lze vysvětlit frakcionací těžšího izotopu ^{34}S do síranů v uzavřeném systému s nízkou měrou oxidace ve vodách hlubokého oběhu. Tomu odpovídá i negativní závislost mezi obsahem síranů a $\delta^{34}\text{S}$ analyzovaných vod (Obr. 154).



Obr. 153. Srovnání izotopického složení síry pyritu a podzemních přítoků do PVP Bukov, povrchových pramenů a podzemních přítoků v dole Rožná



Obr. 154. Závislost $\delta^{34}\text{S}$ na obsahu síranů ve vodách na povrchu a podzemních přítoků v dole Rožná a podzemních přítoků do PVP Bukov

2.4.5 Závěry

Hydrogeologický výzkum v PVP Bukov přinesl řadu důležitých informací o charakteru a časových změnách proudění a chemického složení podzemních vod v puklinovém prostředí pevných hornin v hloubkách odpovídajících plánovanému hlubinnému úložišti. Byla vybudována hydrogeologická monitorovací síť, která umožní dlouhodobé sledování režimu podzemních vod v okolí důlního díla.

Proudění podzemní vody v oblasti je vázáno na dva dominantní směry struktur a to SV–JZ a SSZ–JJV. Tyto dva systémy vodivých struktur se projevily při hydrogeologickém mapování v povrchové části lokality i při dokumentaci vodivých poloh v dole Rožná. U přítoků do PVP Bukov byl zaznamenán při primární dokumentaci pouze systém propustných puklin a zlomů SV–JZ a VSV–ZJZ, později došlo ke vzniku nových přítoků respektive k přesunu některých stávajících na systém poruch ve směru SSZ–JJV. K otevření puklin tohoto systému došlo sekundárně vlivem odlehčení masivu v okolí výrubu.

Režim podzemní vody v okolí důlního díla není stacionární, v průběhu času dochází k výrazným změnám. Obecně v průběhu ražby a úpravy prostoru PVP docházelo k poklesu vydatnosti přítoků podzemní vody, u některých přítoků byl tento pokles pozvolný (pokles vydatnosti o 25 % původní hodnoty v průběhu tří let), jinde výrazný (pokles o 80 % původní hodnoty). U několika přítoků se vydatnost v průběhu měření zvýšila nebo silně kolísala, měnila se také místa přítoků podzemní vody do PVP, docházelo k sekundárnímu otevírání puklin (viz výše).

V mělkých částech krystalinika se přirozeně vyskytuje podzemní voda typu Ca-HCO₃, v hlubších částech převažuje typ Na-HCO₃. V dole Rožná je hloubkové rozhraní mezi těmito

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

typy v hloubce cca 600 m (12. patro, úroveň PVP). Vlivem oxidace při ražbě se u vod mění poměr síranů a uhličitánů ve prospěch síranů, míra této změny závisí na geologických poměrech důlního díla (např. přítomnosti pyritu) a charakteru konkrétního přítoku. V geologicky pestrém, ložiskovém prostředí Rožné se v prostoru dolu vyskytují antropogenně ovlivněné důlní vody typu Ca-SO_4 a NaSO_4 .

Výsledky analýz podzemních vod odebíraných v tunelu vodárenského přivaděče mezi vodní nádrží Josefův důl a úpravnou vody v Bedřichově (Jizerské hory, liberecký granit) a ve štole Josef u Mokrska (tonalit) ukazují (Franěk et al. 2012), že v geologicky relativně homogenním prostředí granitoidů u podzemních vod dochází pouze k relativnímu zvýšení obsahu síranů, ale převaha uhličitánů zůstává.

U stabilních přítoků se odchylky obsahů jednotlivých hlavních kationtů a aniontů od průměrné hodnoty v převážné většině pohybují do 10 až 20 %, výjimečně do 50 % s výjimkou chloru, kde je variabilita vysoká. U přítoků ovlivněných oxidací může být změna až ve stovkách % během několika let.

Analýzy vzorků vod z drenážních systémů starých či aktivních, delší dobu otevřených důlních děl, která se nacházejí v geologicky pestrých, ložiskových územích, nelze pro simulace časových změn chemického složení podzemních vod v úložišti přímo využít. Jedná se často o vody s dlouhou dobou zdržení v drenážním systému dolu vzorkované na přítoku do čistící stanice a představují tak extrémní změny původního chemického složení podzemní vody. Pokud bude HÚ v geologicky homogenním prostředí – granitoid bez zrudnění a bez výrazných poruchových zón silně postižených alteracemi, budou pravděpodobně změny chemického složení vod v prostoru HÚ při jeho výstřebě malé.

Je nutné, aby monitorovací práce kontinuálně pokračovaly i po ukončení projektu v polovině roku 2017. V této zprávě shrnutá data a definované hypotézy vycházejí z velmi krátké časové řady měření (2 roky standardního monitoringu, pouze jednotlivé odběry před zahájením projektu v roce 2014), ke kvalitnímu vyhodnocení dat je nutná časová řada minimálně 5 let, optimálně 10 let měření.

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

2.5 Stanovení transportních charakteristik horninového prostředí PVP Bukov

2.5.1 Úvod

Tato část prací doplňuje laboratorními stanoveními přímý popis vlastností hornin *in situ*. Byly charakterizovány transportní vlastnosti hornin nacházející se v PVP Bukov. Byly stanoveny difúzní koeficienty na základě studia difúze ^3H , ^{36}Cl a ^{125}I a sorpční koeficienty s Cs, Sr, U a Se, které umožňují srovnání vybraných hornin PVP Bukov s horninami měřenými v předchozích letech. Získané poznatky by měly poskytnout data z hloubek odpovídajících hloubce úložiště potřebná pro předběžné bezpečnostní rozborů kandidátních lokalit. Je nutno zdůraznit, že řešitelský kolektiv ÚJV Řež, a.s. v tomto případě poprvé pracoval s horninami metamorfovanými, jejichž složení, charakter a struktura se mění i v rámci několikacentimetrového vzorku. Různý stupeň přeměny těchto typů hornin a nesnadný petrologický popis ovlivnil řešení prací a jejich závěry a otevřel nové možnosti navazujících prací.

Migrace látek v horninovém prostředí je ovlivněna celou řadou procesů a faktorů, např. dle Chapmana a McKinleyho (1987):

- Pomalé procesy: klimatické změny, změna hladiny moře, eroze (fluviální a glaciální), sedimentace, tektonické pohyby, intruze magmatu, vulkanismus, diapirismus, diagenese, metamorfóza, zvětrávání, mineralizace, změny ve složení podzemní vody.
- Rychlé události: zemětřesení, vulkanická erupce, dopad meteoritu, záplava spojená s extrémní erozí, hurikány, bouře, pohyby na zlomech, vznik nových zlomů apod.
- Procesy a události způsobené aktivitami v horninovém masivu: např. dekompresní zóna způsobená dolováním, chemické změny indukované termálním polem, vysušení a resaturace, mikrobiální procesy, vznik plynu, míra poškození masivu v důsledku razicích/střelných prací apod.
- Antropogenní procesy a události: přímá změna hydrogeologie, vrtání, produkce geotermální energie apod.

Obecně můžeme v horninovém prostředí vyvřelých a přeměněných hornin považovat za významné následující procesy:

- Advekci: advekce je přenos kontaminantů vlivem celkové rychlosti proudění nosiče (podzemní vody).
- Difúzi: difúzi je možno popsat jako transportní děj, v jehož průběhu na základě tepelného (Brownova) pohybu částic dochází k přenosu látky ve směru poklesu její koncentrace.
- Procesy zadržení látky v hornině (sorpce): v pórovém prostoru hornin může docházet k interakci migrující látky s povrchem horniny, a to buď s primárními minerály či se sekundárními fázemi, vytvořenými v důsledku precipitace z podzemní vody či degradací primárních minerálů.

Je třeba uvažovat také faktory ovlivňující migraci stopovačů v horninovém prostředí, především:

- Vlastnosti stopovače (velikost atomu/molekuly, náboj, chemické vlastnosti, redoxní chování, precipitace, tvorba komplexů, rozpustnost).

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

- Vlastnosti horniny (pórovitost a propojenost pórů, hustota horniny, hustota a délka puklin, transmisivita, distribuce napětí v hornině, minerální složení, přítomnost minerálů puklinových výplní, vlastnosti povrchu horniny, hydraulická konduktivita horniny a specifikace základních hydrochemických parametrů, které jsou specifické pro každou lokalitu).
- Složení podzemní vody (pH, redoxní potenciál, přítomnost komplexotvorných látek, chloridy, uhličitany/hydrogenuhličitany, fosfáty, sírany, sulfidy, fluoridy, přítomnost organické hmoty a mikroorganismů, přítomnost a koncentrace koloidů).
- Vlastnosti horninového masívu ve větším měřítku (vlastnosti zvodnělých struktur, tj. hydraulická konduktivita, kinematická pórovitost, regionální a lokální hydraulické gradienty, poruchové zóny, zlomy, nepropustné polohy apod., oecný koncept migrace látek v krystalických horninách).

V případě vzorků z PVP Bukov byly sledovány následující vlastnosti:

- minerální složení,
- porozita,
- propustnost,
- difuzivita,
- sorpční vlastnosti.

U části vzorků odebraných z jader z PVP Bukov byly popsány výše zmíněné vlastnosti vzorků, u části tzv. orientovaných vzorků však bylo navíc stanoveno prostorové uspořádání minerálů metodou anizotropie magnetické susceptibility (AMS). Metoda AMS umožňuje získání informací o míře usměrnění magnetických minerálů v hornině, o charakteru a intenzitě přítomných deformačních staveb (kapitola 2.1.6). Na začátku prací řešitelé předpokládali, že přednostní orientace zrn minerálů může výrazně ovlivnit vlastnosti, jakými jsou difuzivita či propustnost, vázané na konektivitu pórů.

2.5.2 Metodika měření

Kapalná fáze

Pro všechny experimenty a měření byla použita syntetická granitická voda SGW2. Koncentrace iontů v syntetické granitické vodě je založena na průměrném složení vod v hlubším oběhu podzemních vod v PVP Bukov v hloubce přibližného umístění HÚ (Červinka et al. 2016). Průměrné složení podzemních vod a složení syntetické granitické vody shrnuje Tab. 38.

Tab. 38 Složení podzemních vod v PVP Bukov a syntetické granitické vody SGW2

Specie		PVP Bukov 600 m		SGW2
			σ	
Li ⁺	μg l ⁻¹	23,18	3,02	
NH ₄ ⁺	mg l ⁻¹	0,08	0,07	
Na ⁺	mg l ⁻¹	16,53	4,60	16,5

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

Mg ²⁺	mg l ⁻¹	8,32	1,10	8,3
Al ³⁺	mg l ⁻¹	1,66	1,16	
K ⁺	mg l ⁻¹	2,14	0,34	2,1
Ca ²⁺	mg l ⁻¹	34,59	4,63	34,6
Mn ²⁺	µg l ⁻¹	30,60	26,26	
Fe	mg l ⁻¹	1,23	2,15	
Zn ²⁺	µg l ⁻¹	42,73	56,96	
HCO ₃ ⁻	mg l ⁻¹	168,66	18,84	168,7
NO ₃ ⁻	mg l ⁻¹	0,92	0,03	
F ⁻	mg l ⁻¹	0,28	0,05	
SiO ₂	mg l ⁻¹	31,15	4,81	
SO ₄ ²⁻	mg l ⁻¹	20,98	6,27	21,0
Cl ⁻	mg l ⁻¹	3,32	1,39	3,3
pH		8,23	0,19	8,2
vodivost	µS cm ⁻¹	291,00	17,68	
TDS	mg l ⁻¹	287,53	26,03	

Měření pórovitosti metodou nasycení vodou

Pórovitost (v procentech) je vyjádřena poměrem objemu pórů, který z celkového objemu látky (V_S) připadá na objem pórů (V_P), viz rovnice:

$$\varepsilon = \frac{V_P}{V_S} \cdot 100 \quad (1)$$

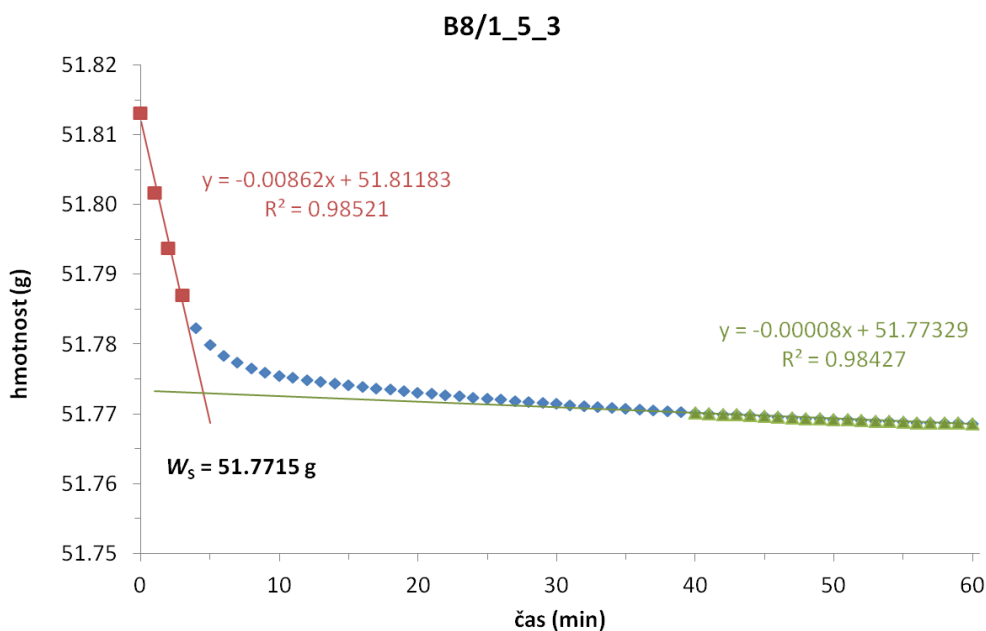
Stanovení celkové pórovitosti jednotlivých vzorků je nezbytné pro vyhodnocení efektivních difúzních koeficientů. Pórovitost hornin je možno studovat celou řadou metod. Jednou z nich je metodika stanovení pórovitosti metodou nasycení vodou a osychání. Tato metoda, popsaná v pracovním postupu PP 2402.03, vychází z metodiky Melnyk a Skeet (1986). Jedná se o poměrně jednoduchou metodu, kterou lze snadno aplikovat v laboratoři s běžným vybavením a která nám poskytne informace o pórovitosti vzorků. Tuto metodiku je možno využít jako srovnávací postup ke klasickému postupu měření metodou rtuťové porozimetrie. Postup stanovení lze rozdělit do čtyř kroků:

1. Zjištění hmotnosti suchého vzorku W_D opakovaným sušením v sušárně při teplotě 105 °C do konstantní hmotnosti. Tím je zajištěno, že veškerá voda obsažená v pórech vzorku z něj byla odstraněna.
2. Nasycení vzorku pod vakuem v exsikátoru syntetickou granitickou vodou (případně deionizovanou vodou). Nejprve je vzorek důkladně evakuován v exsikátoru. Poté je do evakuovaného exsikátoru pomalu, aby nedošlo k poškození vzorku, napouštěna odplyněná kapalina (granitická voda/deionizovaná voda), dokud není vzorek celým objemem ponořen pod hladinou. Vzorek se nechá určitou dobu pod vodní hladinou a

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

vakuum sytit. Poté je do exsikátoru pomalu napouštěn vzduch, aby došlo k vyrovnání vakua s okolním atmosférickým tlakem.

3. Zjištění hmotnosti nasyceného vzorku ponořeného pod kapalinou W_A . Vzorek je zavěšen na závěsné zařízení pod vahami a přitom je ponořen do nádoby s odplyněnou kapalinou. Pozornost musí být věnována tomu, aby na závěsném zařízení nebo vzorku neulpěly vzduchové bublinky a aby byl vzorek na závěsném zařízení či samotné závěsné zařízení ponořen do vody vždy na stejnou úroveň (označení ponoru).
4. Stanovení hmotnosti nasyceného, na povrchu suchého, vzorku W_S pomocí křivky vysoušení vzorku. Povrch nasyceného vzorku je po vyjmutí z kapaliny na povrchu otřen. Vzorek je poté kontinuálně vážen a je zaznamenávána hmotnost na povrchu osychajícího vzorku v čase. Na základě těchto údajů je vykreslena křivka vysoušení vzorku, dokud není vzorek vizuálně suchý a rychlost poklesu hmotnosti pomalá a ustálená. Požadovaná hmotnost W_S je vypočtena z průsečíku lineárního proložení počáteční a konečné části křivky vysoušení – příklad vyhodnocení viz Obr. 155.



Obr. 155 Příklad vyhodnocení křivky osychání horninového vzorku B8/1_5_3

Ze získaných hmotností se pak vypočte objem vzorku V_S a objem pórů V_P podle těchto rovnic:

$$V_S = (W_S - W_A) / \rho \quad (2)$$

$$V_P = (W_S - W_D) / \rho \quad (3)$$

kde ρ je hustota kapaliny, kterou byl vzorek syten. Výsledná pórovitost vzorku ε se pak vypočítá podle rovnice

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

$$\varepsilon = \frac{V_P}{V_S} = \frac{(W_S - W_D)}{(W_S - W_A)} \quad (4)$$

kde V_P je objem pórů a V_S je objem vzorku. Při použití této finální rovnice není potřeba znalost hustoty kapaliny.

Tuto metodu lze využít pro vzorky, které jsou dále použity pro průnikové difúzní experimenty. Je využito především nasycení vzorku vodou při měření pórovitosti, které je základním předpokladem pro relevantní průběh difúzních experimentů.

Rtuťová porozimetrie

Metoda vysokotlaké rtuťové porozimetrie je založena na jevu kapilární deprese rtuti, kdy úhel smáčení je $> 90^\circ$ a rtuť tak vniká do pórů teprve působením tlaku. Objem rtuti vtlačené do porézního systému je obecně interpretován jako celkový objem pórů v měřeném vzorku, přičemž vztah mezi aktuálním tlakem P a poloměrem válcového póru r je dán Washburnovým vztahem (5)

$$P = \frac{2\sigma \cos \varphi}{r} \quad (5)$$

kde je σ povrchové napětí rtuti a φ stykový úhel.

Nejmenší měřený poloměr je dán maximálním použitým tlakem a největší poloměr odpovídá zvolenému počátečnímu tlaku. Závislost vtlačeného objemu rtuti na stoupajícím tlaku P představuje porometrickou intruzní křivku. Přepočtem tlaku P na poloměr r podle Washburnovy rovnice se získá kumulativní křivka, jejíž derivací se vypočte distribuce pórů podle poloměrů.

Při použití tlakového intervalu 0,1 kPa až 200 MPa lze indikovat póry s poloměry od 3,7 nm do 58 μm , což vzhledem k standardnímu rozdělení pórů podle jejich poloměru na mikropóry ($r < 2$ nm), mezopóry ($r = 2\text{--}30$ nm), makropóry ($r = 30\text{--}7\,500$ nm) a hrubé póry ($r > 7\,500$ nm) představuje identifikaci mezo, makro a hrubých pórů.

Vysokotlaká rtuťová porozimetrie poskytuje stanovení celkového objemu pórů V_c v daném intervalu poloměrů pórů, jejich povrchu S_c pro zvolený modelový tvar pórů, nejčastěji zastoupeného poloměru pórů r , zdánlivé rtuťové hustoty dH_g a pórovitosti Por .

Metoda, ač na první pohled jednoduchá, má však z hlediska stanovení pórovitosti hornin s malou pórovitostí a mikropóry několik omezení. Molekuly rtuti, vystavené vysokému tlaku mohou proniknout i do pórů, které jinak nejsou přístupné molekulám vody a výsledky pak mohou být mnohem vyšší než u jiných metod stanovení pórovitosti. Dalším faktorem je faktor přístupu dané laboratoře: některé z laboratoří používají výhradně mleté vzorky krystalických hornin. Mletím dochází k porušení struktury pórů a změnám vlastností. Hodnota pórovitosti tak neodpovídá realitě v horninovém masivu.

Průnikové difúzní experimenty

Difúzi je možno popsat jako transportní děj, v jehož průběhu na základě tepelného (Brownova) pohybu částic dochází k přenosu látky ve směru poklesu její koncentrace (aktivity). Jestliže koncentrace (aktivita) v uvažovaném prvním objemu je větší než ve druhém, znamená to, že z prvního do druhého objemu přechází více částic, než

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

z druhého do prvního. Výsledkem tak může být přenos, neboli difúzní tok, rozpuštěné látky ve směru menší koncentrace (aktivity).

Difúzní tok J difundující látky v soustavě je pak definován jako množství uvažované látky procházející za jednotku času jednotkovou plochou kolmou ke směru difúze Gosman a Jech (1989).

Difúze do horninové matrice může působit jako významný retardační mechanismus, kdy látka proniká z pukliny do horniny díky existenci propojené sítě mikropórů a setrvává zde po dobu delší, než by v hornině zůstala v případě pouze advektivního transportu v puklině. V těchto pórech může docházet také k sorpci migrující látky na horninu.

K popisu procesu průniku difundující látky (stopovač, kontaminant) skrze pórový materiál lze použít Fickovy zákony. Přímá úměrnost mezi difúzním tokem a koncentračním gradientem při ustáleném stavu difúze je popsána I. Fickovým zákonem např. v práci Lever a Woodward (1990):

$$J = -D \cdot \text{grad}(c_i) \quad (6)$$

kde je J difúzní tok látky – tzv. hustota difúzního toku ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), D difúzní koeficient ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) a c_i koncentrace látky i . Pro jednorozměrný tok se pak rovnice zjednoduší na tvar

$$J = -D \cdot \frac{\partial c_i}{\partial x} \quad (7)$$

V případě nestacionární difúze je třeba použít k výpočtu II. Fickův zákon, který popisuje vývoj koncentrace difundující látky jako funkci času a prostoru. Pokud je difúzní koeficient D konstantní, tj. nezávisí na koncentraci, platí pro změnu koncentrace podél souřadnice x (1D tok) rovnice Gosman a Jech (1989):

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} = D_x \left(\frac{\partial^2 c_i}{\partial x^2} \right)_{y,z} \quad (8)$$

Jedinou transportní cestou pro difúzi v horninovém vzorku jsou póry. Pórovitost vzorku lze rozdělit na:

- kinematickou (efektivní) pórovitost ε_i , v níž dochází k advektivnímu proudění (*flow porosity*);
- transportní pórovitost (pórovou) ε_t , kdy jsou oba konce póru zapojeny do propojené sítě a póry jsou tak přístupné pro difúzi (*connected porosity*);
- reziduální pórovitost ε_r , označovanou také jako akumulární pórovitost slepých pórů (např. fluidní inkluze).

Platí přitom rovnice

$$\varepsilon = \varepsilon_f + \varepsilon_t + \varepsilon_r \quad (9)$$

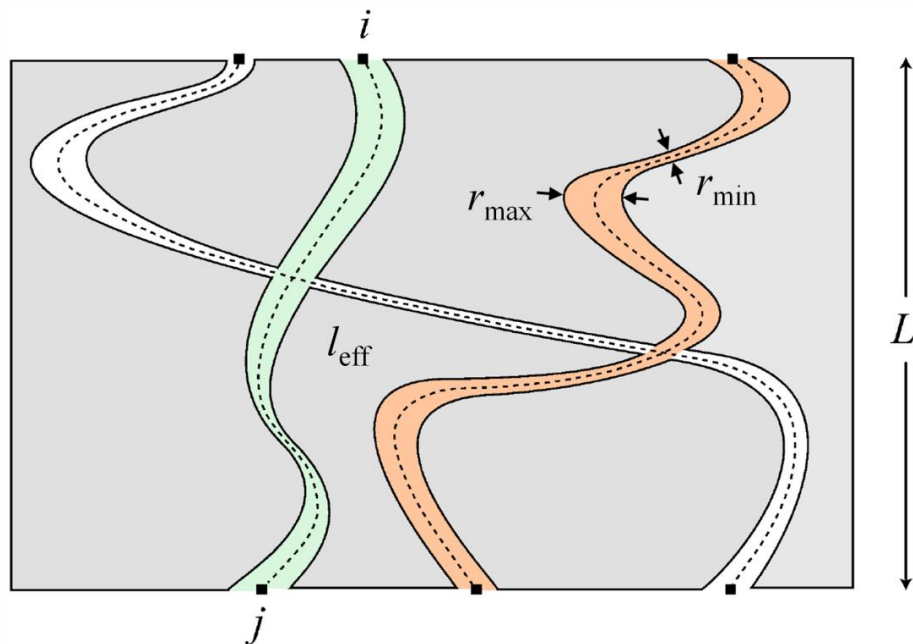
kde ε je celková pórovitost (*total porosity*), ε_f , ε_t , ε_r odpovídá pórovitostem popsaným výše. Za ustáleného stavu je možno transport, ovlivněný difúzí do horninové matrice, popsat rovnicí I. Fickova zákona (Neretnieks 1990):

$$J = -D_p \varepsilon_t \frac{\delta c}{\delta x} \quad (10)$$

kde ε_t je transportní (efektivní) pórovitost, D_p (D_i) je difúzní koeficient v pórové vodě.

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

Jednotlivé póry nemají jednoduchý geometrický tvar, ale jsou různě deformované a mohou být také propojené. To v důsledku znamená, že látky difundující z jednoho bodu (i) do druhého (j) skrz pórový prostor (Obr. 156) nemohou procházet nejkratší přímou cestou (L). Tento jev zakřivení transportní dráhy se nazývá tortuozita póru τ . Tortuozita je definována jako poměr délky transportní cesty pórem l_{eff} (čárkované čáry v Obr. 156) a celkové délky vzorku L ($\tau = l_{\text{eff}}/L$). Jiným faktorem, který ovlivňuje difúzní transport látky v pórech, je nesteromerná plocha průřezu póru (r_{min} a r_{max} v Obr. 156), neboli konstiktivita póru δ (Löfgren 2004; Wiedenmann et al. 2013).



Obr. 156 Tortuozita a konstiktivita póru (obrázek upraven z Wiedenmann et al. 2013)

Tortuozita (τ), čili zakřivení, a konstiktivita (δ), neboli zúžení, jsou hlavními vlastnostmi pórů, které ovlivňují rychlost migrace látek horninou. Pomocí těchto veličin je pak možno definovat difúzní koeficient v systému pórů horniny D_p jako (Ohlssons a Neretnieks 1995):

$$D_p = D_w \frac{\delta_D}{\tau^2} \quad (11)$$

kdy je δ_D je konstiktivita, τ tortuozita, D_w difúzní koeficient ve vodě, D_p difúzní koeficient v pórech. Poměr δ_D/τ^2 bývá označován jako geometrický faktor G .

Konstiktivitu, tortuozitu a transportní pórovitost ε (pokud efektivní pórovitost $\varepsilon = 0$) je možno zahrnout do veličiny nazvané formační faktor horninové matrice F_f (Byegard et al. 1998; Löfgren a Neretnieks 2002):

$$F_f = \varepsilon_t \frac{\delta_D}{\tau^2} \quad (12)$$

Tento parametr je zcela závislý na vlastnostech horninové matrice. Jeho účelem je popsat a určitým způsobem generalizovat vlastnosti horniny, jež ovlivňují difúzi. Pro stanovení formačního faktoru byly publikovány postupy využívající např. elektrochemické metody, a to jak v laboratoři, tak *in situ* (Löfgren a Neretnieks 2002).

Vlastnosti pórů jsou zohledněny v tzv. efektivním difúzním koeficientu D_e , který lze vyjádřit pomocí rovnice:

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

$$D_e = \varepsilon_t D_p = \varepsilon_t D_w \frac{\delta_D}{\tau^2} = F_f D_w \quad (13)$$

Kromě prostého pohybu sledované látky horninou může docházet i k interakci látek s horninou. Sorpce na povrch minerálů způsobuje retardaci stopovače v horninové matici a je ji možno vyjádřit pomocí distribučního koeficientu K_d ($\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$):

$$K_d = \frac{c_s}{c_l} \quad (14)$$

kde c_s je koncentrace stopovače v pevné fázi (mol kg^{-1}) a c_l koncentrace stopovače v kapalně fázi (mol m^{-3}).

Retardační koeficient R_f v horninové matici je pak možno vyjádřit jako:

$$R_f = 1 + \rho \frac{(1 - \varepsilon_t) K_d}{\varepsilon_t} \quad (15)$$

kde K_d je distribuční koeficient ($\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$), ρ je hustota horniny (kg m^{-3}).

Alternativním způsobem sledování difúze je použití zdánlivého difúzního koeficientu (D_a), který zahrnuje vliv sorpce a horninového kapacitního faktoru (α), např.:

$$D_a = \frac{D_p}{R_f} = \frac{D_e}{\alpha} = \frac{D_e}{\varepsilon_t + \rho K_d} \quad (16)$$

Horninový kapacitní faktor α je závislý na transportní pórovitosti, dostupném stopovači a na množství prvku nasorbovaného na vzorek horniny. Pro nesorbující se neutrální látky (^3H) je $\alpha = \varepsilon_t$, pro sorbující se kationty (např. ^{137}Cs) je $\alpha > \varepsilon_t$ a pro anionty platí $\alpha < \varepsilon_t$, kdy je aniontová exkluze formálně brána jako záporná sorpce.

V některých pracích je definována ještě tzv. povrchová difúze pro sorbující se látky (např. Ohlssons a Neretnieks 1995; Löfgren a Neretnieks 2002; Jakob 2004). Tato teorie předpokládá, že část adsorbovaných specií je mobilní a může difundovat podél pevného povrchu, čímž přispívá k celkovému difúznímu toku v horninové matici. Míra toku je popisována pomocí povrchového difúzního koeficientu D_s (Ohlssons a Neretnieks 1995):

$$D_e = \varepsilon_t D_p + D_s \rho K_d \quad (17)$$

Za rovnovážného stavu pak bude celková míra transportu rovna sumě difúze v pórech a povrchové difúze (Neretnieks 1990; Ohlssons a Neretnieks 1995). Vzhledem k tomu, že sorpce probíhá rychle, je předpokládána rovnováha mezi koncentrací stopovače na povrchu pevné fáze c_s a koncentrací v roztoku c .

Difúze do horninové matrice může mít významný vliv na retardaci jak sorbujících se, tak nesorbujících se látek, čímž dojde ke snížení jejich koncentrace v procházející vodě. Bylo prokázáno, že horninový objem, který je přístupný pro difúzi po stovky let, může mít výrazně větší retardační efekt než povrchová sorpce na puklinách (Neretnieks 1990). Zejména to platí pro prvky, jejichž cesta do biosféry je kratší než poločas jejich přeměny. Přístupný objem horniny bude záviset na sorpčních a difúzních vlastnostech horniny a nuklidů a také na velikosti povrchu v kontaktu s mobilním roztokem. Neretnieks v Moreno et al. (1989) ukázal, že poměr tzv. smáčeného povrchu (*wetted surface*) k celkovému objemu horniny je jedním z hlavních ukazatelů pro retardaci prvků, zatímco proudová pórovitost (*flow porosity*) bude mít v praxi zanedbatelný vliv.

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

Při difúzi hraje roli rovněž náboj částice. V případě, že difundující částice má stejný náboj jako povrch horniny (povrch pórů), nemohou částice z důvodu elektrostatického odpuzování projít těmito cestami a akumulují se (iontová exkluze, selektivní filtrace). Pokud je přítomno více migrujících látek, může dojít k selektivní filtraci některých z nich. Kromě toho chování migrující látky ovlivňuje složení podzemní vody (kompetice iontů, E_h , pH).

Míra průniku migrující látky/kontaminantu do neporušené horninové matrice závisí tedy na:

- vlastnostech pronikající látky (náboj, velikost molekul, sorpční vlastnosti);
- vlastnostech podzemní vody (kompetice jednotlivých stopovačů, přítomnost komplexotvorných látek, pH, E_h , lokální koncentrační gradienty);
- vlastnostech horniny (pórovitost a systém propojení pórů, přítomnost puklinové výplně, počet slepých pórů, tvar a velikost pórů atd.);
- interakci pronikající látky s horninou a jejími minerálními složkami.

Pro stanovení difúzních koeficientů v laboratoři se používá řada experimentů. Obecně lze metodiku kvantifikování difúzních koeficientů rozdělit do dvou kategorií: stanovení za rovnovážného stavu systému (efektivní difúzní koeficient D_e) nebo za přechodného stavu (zdánlivý difúzní koeficient D_a ; García-Gutiérrez et al. 2003). V případě nesorbujících se prvků je možno dosáhnout rovnováhy pro stanovení D_e . V případě sorbujících se prvků je dosažení rovnovážného stavu velmi časově náročné (Löfgren a Neretnieks 2002).

Uspořádání experimentální aparatury v ÚJV Řež, a. s.

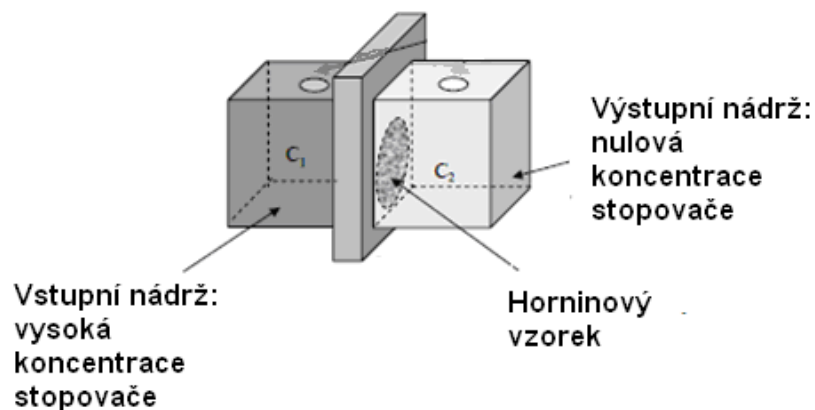
Stanovení difúzního koeficientu za rovnovážného stavu systému se obvykle uskutečňuje v tzv. průnikových difúzních experimentech, a to především pro nesorbující se či slabě se sorbující stopovače (^3H , ^{36}Cl , ^{125}I). Základním principem těchto experimentů je průchod stopovače vzorkem horniny a měření nárůstu/poklesu stopovače ve výstupním/vstupním rezervoáru. Je měřen buď časový průběh koncentračního profilu stopovače ve výstupním rezervoáru, či profil stopovače uvnitř horninového vzorku (Chapman a McKinley 1987). Z těchto údajů je pak na základě různých metod (například metodou rovnovážného stavu, metodou *time-lag*) určován difúzní koeficient.

Pro difúzní experimenty na horninových vzorcích z lokality Bukov byly použity dva typy zdrojových roztoků v syntetické granitické vodě (SGW2):

- 1) směs ^3H a ^{36}Cl , kdy přibližná aktivita stopovače ^3H ($T_{1/2} = 12,4$ let) byla 4 kBq ml^{-1} a stopovače ^{36}Cl ($T_{1/2} = 301\,000$ let) přibližně $2,7 \text{ kBq ml}^{-1}$;
- 2) nejprve roztok se samotným stopovačem ^3H , následně byl zdrojový roztok nahrazen roztokem se stopovačem ^{125}I ($T_{1/2} = 60,1$ dne) o přibližné aktivitě $1,1\text{--}1,7 \text{ kBq ml}^{-1}$.

Typické uspořádání cel pro průnikové experimenty (*through diffusion*) je uvedeno na následujícím schematickém obrázku (Skagius a Neretnieks 1986; Obr. 157).

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017



Obr. 157 Základní uspořádání cely pro laboratorní difúzní experimenty (zleva): vstupní nádrž – vzorek – výstupní nádrž

Metodika difúzních experimentů v ÚJV Řež, a. s., vychází z pracovního postupu PP 2402.03. Difúzní cely používané v oddělení Chemie palivového cyklu ÚJV Řež, a. s. byly inspirovány designem Helsinské university. (Obr. 158).



Obr. 158: Difúzní cely pro průnikové difúzní experimenty: vlevo původní design (2006), vpravo upravený design (ÚJV Řež, a. s. 2009)

Difúzní cely je vyrobena z polymethylmetakrylátu (PMMA), v jejímž středu je umístěno těsnění ze silikonové pryže. Vzorek je umístěn v tomto těsnění, které zajišťuje, aby se roztoky nemísily. Jedna strana vzorku je ve styku s roztokem obsahujícím stopovač ve vstupní nádrži, druhá strana vzorku s neznačeným roztokem v druhé nádrži (obvykle syntetická podzemní voda o daném složení). Pro tento typ cely má vzorek krystalické horniny tvar disku o průměru 42–50 mm a tloušťce 10 mm. Objem rezervoárů je přibližně 160 ml. Z důvodů nízkých difuzivit vzorků z PVP Bukov bylo přistoupeno k další úpravě difúzních cel. Cílové rezervoáry byly zmenšeny na objem cca 55 ml, čímž bylo dosaženo snížení detekovatelného množství prodifundovaného stopovače (viz Obr. 159).



Obr. 159 Difúzní cela pro průnikové difúzní experimenty s malým cílovým rezervoárem; uložení části difúzních cel během experimentu (ÚJV 2016)

Aktivita ve zdrojové nádrži není udržována na konstantní hodnotě a je ponechána bez úprav. Aktivita klesá tak, jak stopovač difunduje vzorkem ve směru vyrovnání koncentračního gradientu. Vzhledem k objemu zdrojového rezervoáru, který je cca třikrát větší než rezervoár cílový, ale celkově malému množství prodifundovaného stopovače, není ve většině případů pokles aktivity ve zdrojovém rezervoáru zaznamenatelný a lze ho tedy pro analytické řešení difúzních rovnic považovat za konstantní zdroj. V druhé nádrži je v průběhu experimentu sledován nárůst koncentrace stopovače. V pravidelných intervalech (7–14 dnů) jsou z obou nádrží odebírány vzorky roztoku a měřeny dle typu stopovače. Na základě nárůstu aktivity stopovače v cílovém rezervoáru je následně vyhodnocena průniková křivka a vypočítán difúzní koeficient.

Vyhodnocení výsledků průnikových difúzních experimentů

V průběhu difúzních experimentů jsou v pravidelných intervalech zaznamenávána data (aktivita, případně koncentrace) jak ze zdrojových rezervoárů obsahujících roztok označený stopovačem, tak z cílových rezervoárů, které na počátku experimentu obsahují pouze vodnou fázi bez daného stopovače.

V případě, kdy jsou splněny počáteční a okrajové podmínky, tj. studovaná látka není přítomna ve vzorku před experimentem, ve zdrojovém rezervoáru je udržována konstantní koncentrace a v cílovém rezervoáru je nulová koncentrace, pak lze difúzní koeficient D_e vypočítat také přímo z experimentálních dat. Toto vyhodnocení vychází z analytického řešení difúzní rovnice, která pro ustálený stav (tj. při konstantním toku J) přechází ve zjednodušený tvar

$$Q(t) = S \cdot L \cdot c_0 \left(\frac{D_e \cdot t}{L^2} - \frac{\alpha}{6} \right) \quad (18)$$

kde $Q(t)$ je prodifundované látkové množství v čase t skrz vzorek o tloušťce L a ploše S , c_0 je vstupní koncentrace sledované látky, která je během experimentu udržována konstantní, a α značí horninový kapacitní faktor. Po úpravě rovnice do tvaru

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

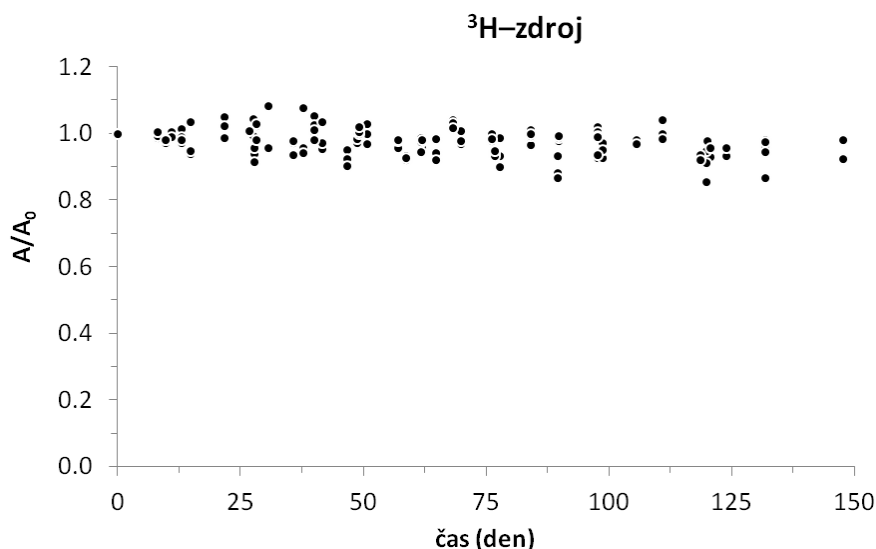
$$\frac{Q(t)}{S \cdot c_0} = \frac{D_e \cdot t}{L} - \frac{\alpha \cdot L}{6} \quad (19)$$

Ize difúzní koeficient D_e určit ze směrnice závislosti $Q(t)/Sc_0$ na čase. Tento způsob vyhodnocení se nazývá metoda *time-lag*. Jinou možností je výpočet difúzního koeficientu přímo z hodnoty difúzního toku J pomocí rovnice

$$D_e = \frac{J \cdot L}{S \cdot c_0} \quad (20)$$

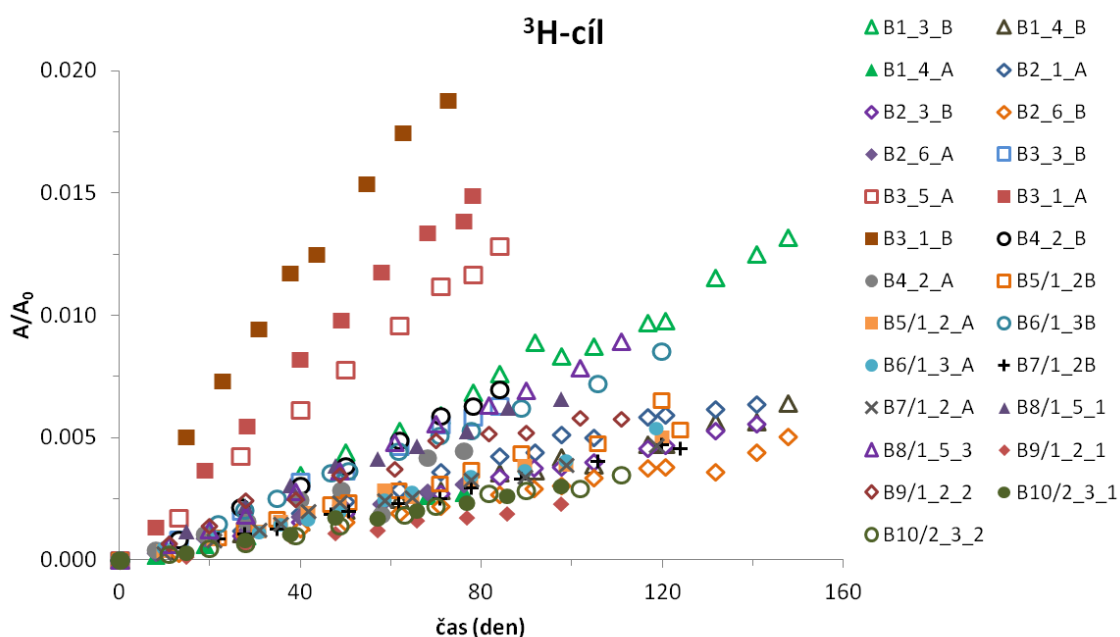
Hodnota difúzního toku však může v průběhu experimentu výrazně kolísat. Podrobnější popis vyhodnocování průnikových difúzních experimentů je možné najít např. v průběžné zprávě k projektu Výzkumná podpora pro bezpečnostní hodnocení hlubinného úložiště (Červinka et al. 2015).

Tyto metody vyhodnocení dat se však běžně používají i v případech, kdy nejsou striktně dodrženy výše zmíněné okrajové podmínky. Obecně jsou pro použití těchto metod přijímány podmínky, kdy vstupní koncentrace by neměla klesnout pod hodnotu 95 % z počáteční koncentrace a do cílového rezervoáru by nemělo prodifundovat více jak 5 % z počáteční zdrojové koncentrace (García-Gutiérrez et al. 2003). Tyto podmínky byly u všech prováděných experimentů splněny. Jak lze vidět na Obr. 160 shrnujícím všechna měření aktivity ve zdrojovém rezervoáru, aktivita je prakticky konstantní po celou dobu experimentu. Rozptyl dat je dán nejistotou měření hodnot.

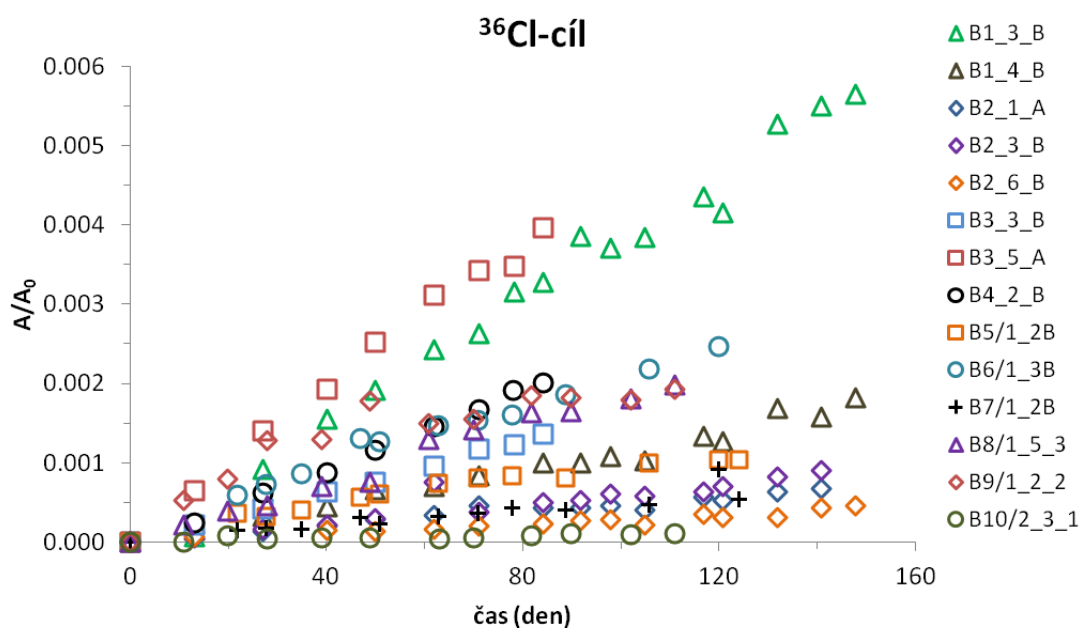


Obr. 160 Naměřené hodnoty aktivit ³H ve zdrojových rezervoárech (souhrn všech experimentů)

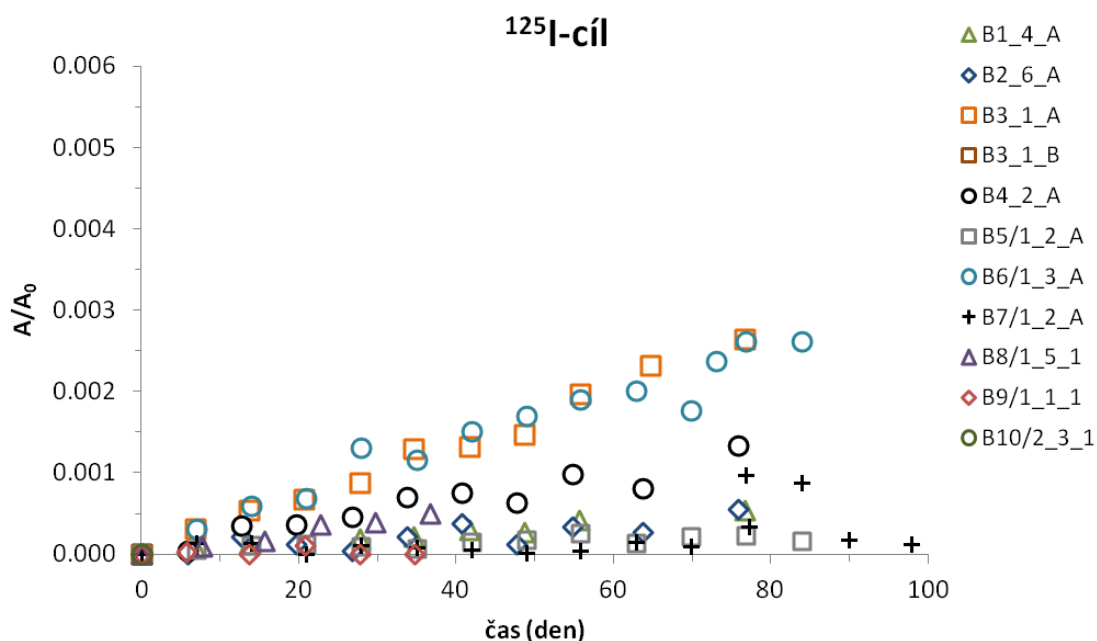
Na Obr. 161 až Obr. 163 jsou zobrazeny průnikové křivky zachycující vývoj aktivit v cílových rezervoárech pro všechny tři použité stopovače. Pokud nebudou brány v úvahu vzorky obsahující puklinu (B1/3B, B3/1_A, B3/1_B, B3/5_A) jsou hodnoty relativní aktivity pro ostatní vzorky v relativně úzkém intervalu.



Obr. 161 Průnikové křivky (vývoj aktivit v cílových rezervoárech) pro experimenty s ^3H (souhrn všech experimentů)

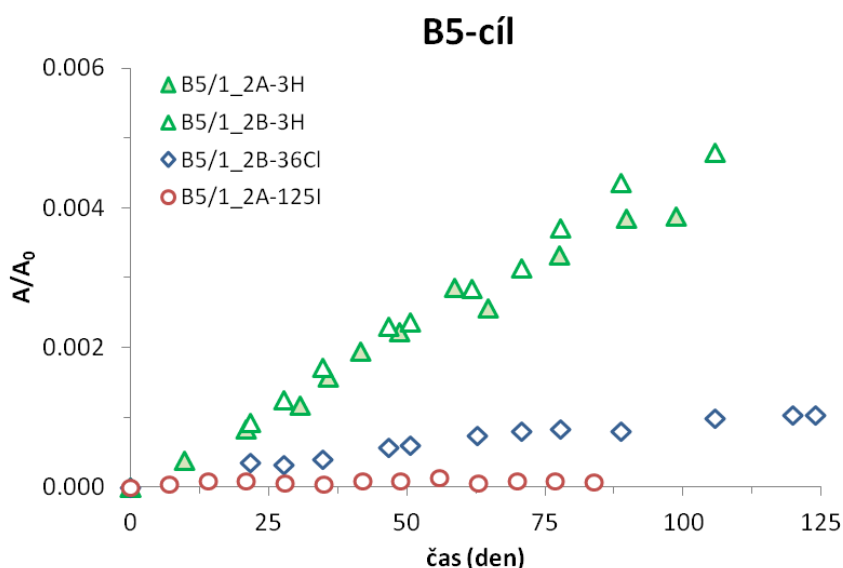


Obr. 162 Průnikové křivky (vývoj aktivit v cílových rezervoárech) pro experimenty s ^{36}Cl (souhrn všech experimentů)



Obr. 163 Průnikové křivky (vývoj aktivit v cílových rezervoárech) pro experimenty s ^{125}I (souhrn všech experimentů)

Na Obr. 164 jsou pro ilustraci srovnány průnikové křivky vzorků z vrtného jádra B5 pro všechny tři použité stopovače. Z obrázku je patrná výrazně nižší difuzivita aniontů v porovnání s tritiem. Příčinou takového chování je patrně aniontová exkluze, tj. omezení průchodu aniontů pórovým prostorem vlivem odpuzivých elektrostatických sil (záporně nabitý povrch).



Obr. 164 Průnikové křivky (vývoj aktivit v cílových rezervoárech) pro všechny použité stopovače na vzorcích z vrtného jádra B5

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

Část výsledků stopovacích experimentů bylo provedeno také numerickým modelováním s využitím difúzního modulu EVALDIFF (v. 4.2.3.) v programu GoldSim, který umožňuje vyhodnocení difúzních experimentů i bez nutnosti udržovat konstantní, resp. nulovou aktivitu stopovače ve zdrojovém, resp. cílovém rezervoáru (Vopálka et al. 2006; Havlová a Vopálka 2010). Tento model respektuje reálné změny v rezervoárech a je schopen modelovat pokles ve zdrojovém rezervoáru i nárůst stopovače v cílovém rezervoáru. Při znalosti základních parametrů vzorku je pak možno fitovat průběh modelované křivky poklesu aktivity/koncentrace stopovače ve zdrojovém rezervoáru i nárůstu aktivity/koncentrace stopovače v rezervoáru cílovém. Vstupními parametry při fitování byly rozměry vzorku, objem rezervoárů, nekonstantní zdroj, distribuční koeficient 0 l kg^{-1} , referenční difuzivita $D_w = 2,27 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ pro tritium a jodid a $D_w = 2,03 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ pro chlorid. Dále byly použity poločasy rozpadu ^3H ($T_{1/2} = 12,4$ let), ^{36}Cl ($T_{1/2} = 301\,000$ let) a ^{125}I ($T_{1/2} = 60,1$ dne). Pórovitost ε byla nastavena na konstantní hodnotu podél difúzní dráhy, jak byla stanovena metodou postupného osychání (viz kapitola 2.5.2 a

Tab. 539). Jediný neznámý parametr tak zůstává geometrický faktor G . Fitování křivky probíhá hledáním nejvhodnější hodnoty geometrického faktoru G , pomocí kterého je pak možno vypočítat hodnotu D_e :

$$D_e = \varepsilon_t D_p = \varepsilon_t D_w \frac{\delta_D}{\tau^2} = \varepsilon_t D_w G = F_f D_w \quad (21)$$

Statické sorpční vsádkové experimenty

Principem statického sorpčního experimentu je interakce známého množství pevné fáze (sorbentu) m a známého objemu kapalné fáze V , obsahující definovanou koncentraci (aktivitu) studovaného radionuklidu c_0 (A_0). Reakční směs, obsahující pevnou fázi, kapalnou fázi a radionuklid, je umístěna po určitou dobu v uzavíratelné vzorkovnici (zkumavka, baňka, lahvička, atd.) a je pravidelně promíchávána. Míchání je realizováno dle možností kontinuálně na třepačce, nebo manuálně periodicky (např. $1 \times$ denně). Po uplynutí daného časového intervalu jsou od sebe pevná a kapalná fáze odděleny a je stanovena koncentrace (aktivita) radionuklidu c (A) v kapalné fázi. Sorpce je popisována hodnotami distribučního koeficientu K_d a výtěžku sorpce, které jsou dány vztahy:

$$K_d = \frac{(c_0 - c)V}{cm} \quad (22)$$

$$\text{Výtěžek sorpce} = \frac{c_0 - c}{c_0} 100 \quad (23)$$

kde c_0 je celková koncentrace sledované látky (mol l^{-1}), c je koncentrace sledované látky ve vodné fázi (mol l^{-1}), V je objem kapalné fáze (ml), m je hmotnost pevné fáze (g).

Propustnost

Měření součinitele filtrace horninových vzorků bylo stanoveno metodou měření při konstantním hydraulickém sklonu dle ČSN CEN ISO/TS 17892-11. K měření vzorků S-3 a S-4 byl použit triaxiální propustoměr, vyvinutý a sestavený v ÚJV Řež, a. s., spolu s laboratorními čerpadly GDS ELDPC schopnými udržovat konstantní tlak a měřícími jimi protékly objem s přesností v řádu mm^3 (viz. Obr. 165).



Obr. 165 Aparatura pro měření součinitele filtrace (ÚJV Rež, a. s.)

Postup měření

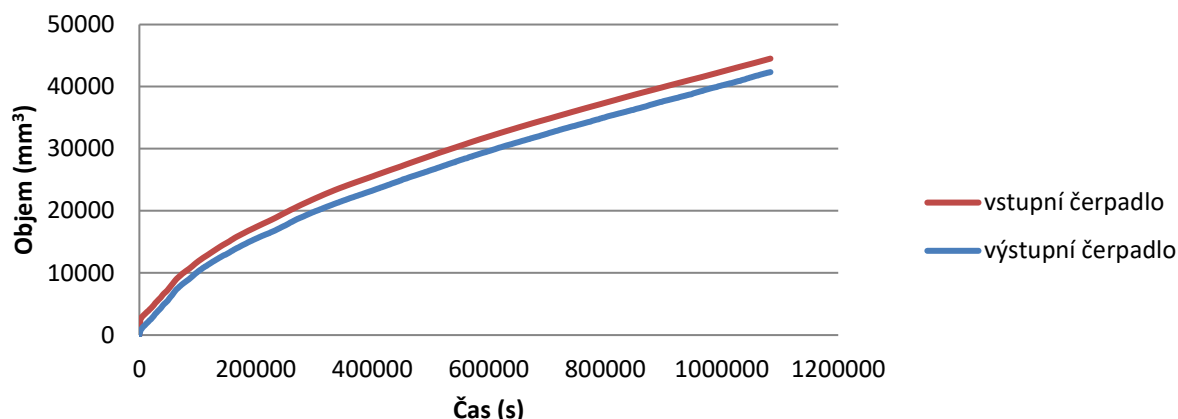
Zásobníky laboratorních čerpadel GDS ELDPC byly naplněny vodou a odvzdušněny. Jedno čerpadlo bylo připojeno na vstup propustoměru, druhé na výstup z propustoměru. Aby bylo dosaženo co možná největšího hydraulického sklonu, byla hodnota vstupního tlaku nastavena na 1000 kPa a hodnota výstupního tlaku na 0 kPa, což jsou limitní hodnoty těchto čerpadel. Hodnota hydraulického sklonu byla tedy nastavena na 1 MPa. V komoře propustoměru byl vyvinut pozadový tlak 10 MPa, což přibližně odpovídá hydrostatickému tlaku v hloubce 1000 m.

Během experimentu byly pomocí programu GDSLAB s periodou 30 minut průběžně zaznamenávány hodnoty aktuálního objemu v zásobnících obou laboratorních čerpadel a zároveň byly vynášeny do grafu. Typický průběh experimentu je patrný z následujícího obrázku (Obr. 166). Pro kontrolu byly současně měřeny i hodnoty vstupního a výstupního tlaku.

Před zahájením měření propustností byly měření na nepropustném plastovém válečku o rozměrech shodných se zkušebními vzorky stanoveny úniky z komory propustoměru do jeho vstupní i výstupní části (jedná se o úniky v řádu $0,0001 \text{ mm}^3 \text{ s}^{-1}$). Tyto úniky ovlivňují získaná data, a proto byly zavedeny opravné koeficienty, které tato ovlivnění odstraňují.

Po celou dobu trvání experimentu byl sledován tvar vstupní a výstupní čáry. Poté, co došlo ke zlinearizování obou čar a z grafu bylo patrné, že jsou obě čáry rovnoběžné, byl experiment ještě několik dní ponechán v běhu a poté ukončen.

Vývoj objemu v zásobních čerpadel



Obr. 166 Typický průběh experimentu

Vzhledem k časové náročnosti měření vzorků bylo měření koeficientu hydraulické vodivosti vzorků po AMS (B4–B10) realizováno na pracovišti ÚGN AV ČR, v. v. i. (ÚGN). Měření byla provedena v propustoměru firmy Infratest (Obr. 167) v triaxiální tlakové komoře odvězdušenou tlakovou vodou při konstantním hydraulickém sklonu. Propustoměr je vybaven zařízením pro udržování konstantního rozdílu tlakových výšek jak zkušební vody působící na spodní a svrchní podstavu zkušební tělesa, tak pro udržování konstantního plášťového tlaku v rozmezí 0–0,6 MPa (Obr. 168). Měření objemu proteklé vody je realizováno ručním odečtem z měřících byret.



Obr. 167 Měření koeficientu hydraulické vodivosti vzorků po AMS (propustoměr firmy Infratest)



Obr. 168 Měřicí komora s udržováním plášťového tlaku (0–0,6 MPa)

Vypočtený koeficient filtrace kT (T teplota měření) je přepočten na srovnávací hodnotu koeficientu filtrace k_{10} při deseti stupních Celsia.

2.5.3 Odběr vzorků horniny – příprava vzorků

Vzorky z jader S-3 a S-4 byly odebrány z uskladněných jádrovnic ve spolupráci s pracovníky ČGS s požadavkem na výběr hlavních litologických horninových typů pro danou oblast a vybraná jádra. Předvýběr vzorků byl proveden na základě popisu vrtných jader a strukturního mapování vrtů S-3 a S-4 (Bukovská et al. 2015; Tomek et al. 2015). Vzhledem k rozpadnutí

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

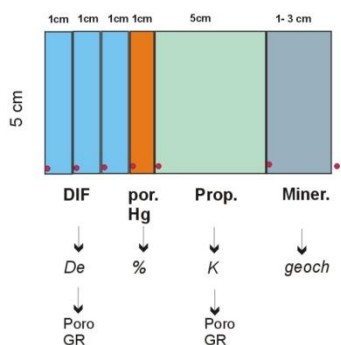
některých jader při formátování bylo v roce 2016 provedeno odebrání nových vzorků v těsné blízkosti původních (vzorky 2S3_2, 2S4_2 a 2S4_4).

Tab. 399 Přehled odebraných vzorků z vrtů S-3 a S-4

Jádro	Označení	Hloubka odběru (m)	Hornina – litologie (dle výbrusů)
S-3	S3_1	73,65–73,94	stromatitický amfibolický migmatit s biotitem
S-3	S3_2, 2S3_2	79,5–79,85	migmatit
S-3	S3_3	81,63–81,98	migmatizovaný granát-biotitický amfibolit
S-3	S3_4	86,70–87,00	stromatitický amfibolický migmatit s biotitem a granátem
S-4	S4_2, 2S4_2	10,15–10,67	stromatitický biotitický migmatit s převahou leukosomu
S-4	S4_3	25,00–25,28	migmatizovaná biotit-amfibolická pararula
S-4	S4_4, 2S4_4	36,00–36,39	kompaktní jemnozrný amfibolit s biotitem

Vzhledem k technickým požadavkům plánovaných experimentů bylo vrtné jádro převrtáno na průměr 50 mm (firmou Arcadis). Po převrtání vzorků jader byly naformátovány podvzorky dle požadavků pro jednotlivé analýzy a zkoušky (gravimetrická pórovitost, difúzní koeficient, Hg porozimetrie, hydraulická vodivost, mineralogie; Obr. 169).

Vzorky z jader S-3 a S-4 pro měření rtuťové porozimetrie byly odebrány v blízkosti difúzních vzorků. Z vybraných segmentů byly následně vyřezány 2 vzorky pomocí diamantové pily (0,4 mm) kvádry pro maximální vyplnění dilatometru o velikosti 40×9×9 mm (Obr. 170) a vzorky měřeny na Ústavu struktury a mechaniky hornin Akademie věd ČR (ÚSMH).



Obr. 169 Schéma formátování vzorků pro plánované testy a analýzy (DIF = difúzní experimenty, por. Hg = rtuťová porozimetrie, Prop. = propustnost, Miner. = mineralogie)



Obr. 170 Příprava vzorků na rtuťovou porozimetrii

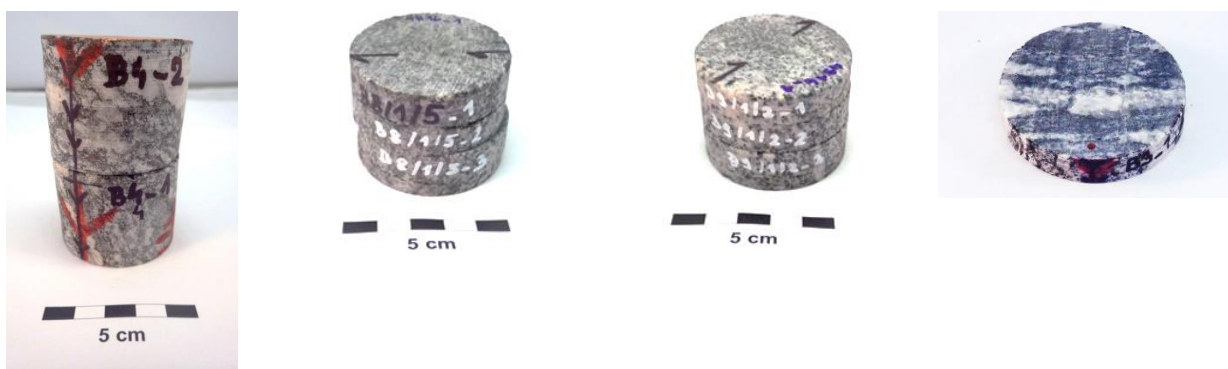
Pro studium možného ovlivnění migračních parametrů vnitřní strukturou horniny byly provedeny odběr orientovaných vzorků (B1–B10). Podrobné informace o odběru vzorků jsou

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

uvedeny ve zprávě projektu (Verner a Bukovská et al. 2015). Vzorky byly nejdříve naměřeny metodou AMS z orientovaných jader (viz kapitola 2.1.6) a následně naformátovány na válečky o průměru 48–50 mm o výšce 10 mm a použity pro měření transportních parametrů (viz Obr. 171). Označení vzorků B1–B10 včetně popisu horninového typu (AMF-amfibolit, RUL- rula, MGM – migmatit) bylo převzato z materiálů ČGS (Verner a Bukovská et al. 2015). Vzhledem k variabilitě složení metamorfovaných hornin je však označení horninového typu složitější a přechody mezi jednotlivými typy není možné zcela jednoduše oddělit.

Podrobná fotodokumentace je vhodná pro následnou interpretaci a zjišťování případných nehomogenit vzorků, usměrnění v rámci vzorku apod. Fotodokumentace vzorků pro difúzní experimenty je součástí Příloha 13.

Obecně byla snaha provádět testy na stejném vzorku, pokud to bylo možné (např. difúze po měření AMS – elektrických vlastnostech, pórovitost – difúze apod.) a nebyly tím ovlivněny studované parametry, případně byly vzorky odebrány v těsné blízkosti studovaných vzorků.



Obr. 171 Ukázka formátování vzorků B1-B10 po AMS na difúzní experimenty

Pro sorpční experimenty bylo z každého vzorku připraveno 5 zrnitostní frakcí (A: < 0,063 mm, B: 0,125–0,063 mm, C: 0,63–0,125 mm, D: 0,8–0,63 mm a E > 0,8 mm), které byly následně analyzovány pomocí Rtg semikvantitativní fázové analýzy přesítovaných frakcí. Frakce C a D byly použity pro statické sorpční experimenty (viz kapitola 0)

2.5.4 Výsledky měření

Hustotní parametry

Pórovitost

V roce 2016 byly připraveny a analyzovány vzorky z vybraných částí vrtů S-3 a S-4 a vzorky po měření AMS (B1–B10). Žádný ze zpracovávaných vzorků nedosahoval vysoké pórovitosti (nad 10 %), proto by metodika Melnyka a Skeeta (1986) měla být vhodná pro všechny typy vzorků - dle zkušeností je vhodná pro vzorky do cca 3 %. Vzorky byly syceny syntetickou granitickou vodou (SGW2). Metodika stanovení pórovitosti nasycení vodou je popsána v kapitole 2.5.2. Hodnoty byly stanoveny na vzorcích disků průměru 48–50 mm, výška 10 mm. Následně byly vybrané vzorky předány na difúzní experimenty.

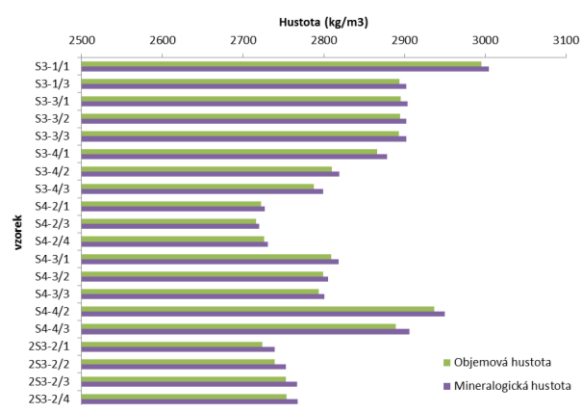
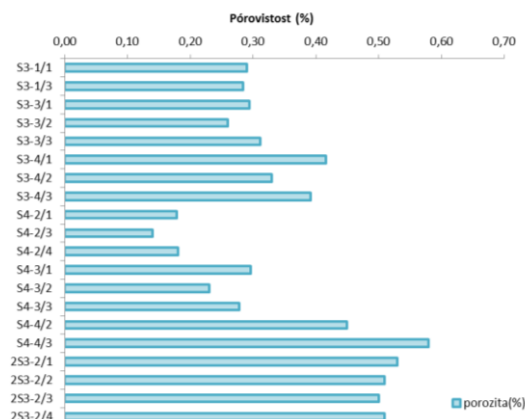
 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

Pórovitosti u vzorků z jader S-3 a S-4 dosahují hodnot mezi 0,14–0,58 % (Tab.). Hodnoty poukazují na nízké narušení těchto hornin. Výsledky pórovitostí pro jednotlivé vzorky a horninové typy jsou zobrazeny na Obr. 173 a Obr. 175.

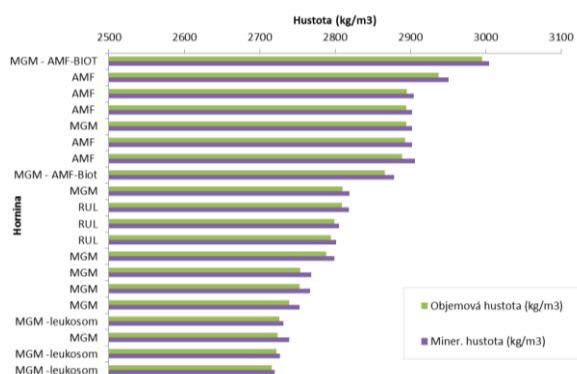
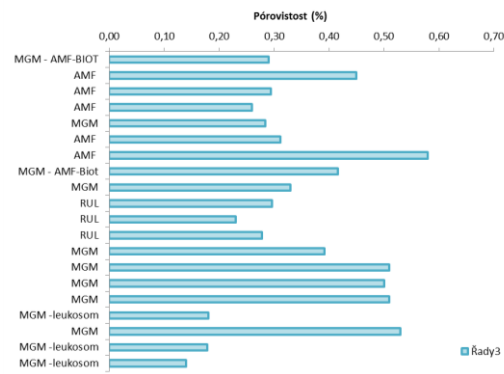
Tab. 40 Výsledky pórovitosti a hustoty vzorků z vrtu S3 a S4- metodou nasycení vodou

Vzorek	Pórovitost (%)	Objemová hustota (kg m ⁻³)	Mineralogická hustota (kg m ⁻³)
S3-1/1	0,29	2995	3004
S3-1/3	0,28	2894	2902
S3-3/1	0,29	2895	2904
S3-3/2	0,26	2894	2902
S3-3/3	0,31	2893	2902
S3-4/1	0,42	2866	2878
S3-4/2	0,33	2810	2819
S3-4/3	0,39	2788	2799
S4-2/1	0,18	2722	2727
S4-2/3	0,14	2716	2720
S4-2/4	0,18	2726	2731
S4-3/1	0,30	2809	2818
S4-3/2	0,23	2799	2805
S4-3/3	0,28	2794	2801
S4-4/2	0,45	2937	2950
S4-4/3	0,58	2889	2906
2S3-2/1	0,53	2724	2739
2S3-2/2	0,51	2739	2753
2S3-2/3	0,50	2753	2767
2S3-2/4	0,51	2754	2768

Nejvyšší hustoty byly naměřeny u vzorků amfibolitů (S3_3 a S4_4 v rozmezí 2901–2950 kg m⁻³). Naopak nejnižší mineralogické hustoty byly sledovány u vzorků migmatitů S4_2, 2S3_2 a S3_4 (2720–2799 kg m⁻³) (Obr. 172 a Obr. 174).


Obr. 172 Výsledky hustot vzorků (kg m^{-3}) jader S-3 a S-4


Obr. 173 Výsledky pórovitosti (%) vzorků S-3 a S-4


Obr. 174 Výsledky hustot vzorků (kg m^{-3}) jader S-3 a S-4 v závislosti na typu horniny


Obr. 175 Výsledky pórovitosti (%) vzorků S-3 a S-4 vs. horninový typ

Pórovitosti studovaných vzorků B1–B10 se pohybují mezi 0,15 a 0,44 %. Hodnoty pórovitosti, objemové a mineralogické hustoty jsou uvedeny v Tab.

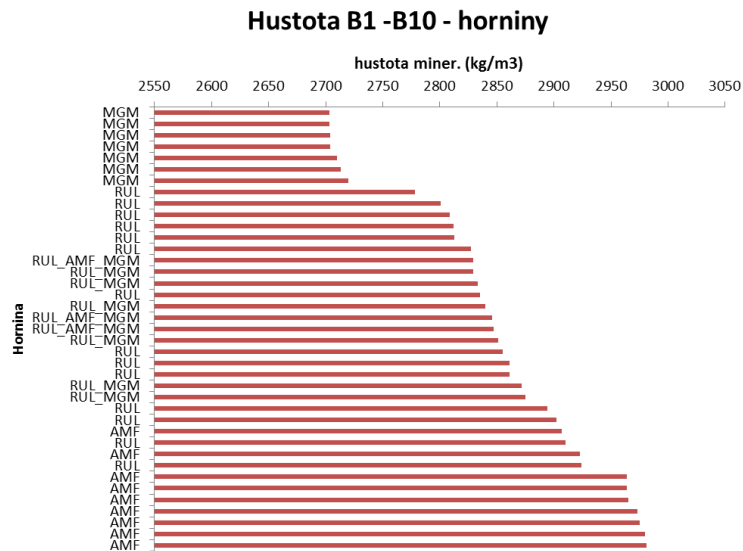
Tab. 41 Výsledky pórovitosti a hustoty vzorků z vrtu B1–B10

Název vzorku	Pórovitost (%)	Objemová hustota (kg m^{-3})	Mineralogická hustota (kg m^{-3})	Hornina
B1_1_A	0,24	2806	2813	RUL
B1_1_B	0,28	2827	2835	RUL
B1_2_A	0,24	2887	2894	RUL
B1_2_B	0,20	2918	2924	RUL
B1_3_A	0,28	2893	2902	RUL
B1_3_B	0,28	2902	2910	RUL
B1_4_A	0,29	2819	2827	RUL
B1_4_B	0,29	2804	2812	RUL

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov			Evidenční označení:
				ZZ 191/2017
B2_1_A	0,44	2895	2907	AMF
B2_1_B	0,47	2922	2923	AMF
B2_3_A	0,21	2967	2973	AMF
B2_3_B	0,19	2958	2964	AMF
B2_6_A	0,20	2959	2965	AMF
B2_6_B	0,15	2959	2964	AMF
B3_1_A	0,36	2699	2709	MGM
B3_1_B	0,40	2692	2702	MGM
B3_3_A	0,22	2707	2713	MGM
B3_3_B	0,19	2715	2720	MGM
B3_5_A	0,25	2697	2704	MGM
B4_2_A	0,22	2697	2703	MGM
B4_2_B	0,20	2697	2703	MGM
B5/1_2A	0,32	2845	2854	RUL
B5/1_2B	0,27	2853	2861	RUL
B5/1_2C	0,27	2853	2861	RUL
B6/1_3A	0,43	2863	2875	RUL_MGM
B6/1_3B	0,38	2840	2851	RUL_MGM
B6/1_3C	0,37	2862	2872	RUL_MGM
B7/1_2A	0,27	2801	2809	RUL
B7/1_2B	0,29	2793	2801	RUL
B7/1_2C	0,44	2765	2778	RUL
B8 1_5_1	0,31	2837	2845	RUL_AMF_MGM
B8 1_5_2	0,40	2817	2829	RUL_AMF_MGM
B8 1_5_3	0,41	2835	2847	RUL_AMF_MGM
B9 1_2_1	0,21	2823	2829	RUL_MGM
B9 1_2_2	0,21	2834	2840	RUL_MGM
B9 1_2_3	0,21	2827	2833	RUL_MGM
B10 2_3_1	0,26	2972	2980	AMF
B10 2_3_2	0,26	2972	2975	AMF
B10 2_3_3	0,28	2967	2975	AMF
mean	0,29	2843	2848	
min	0,15	2692	2702	

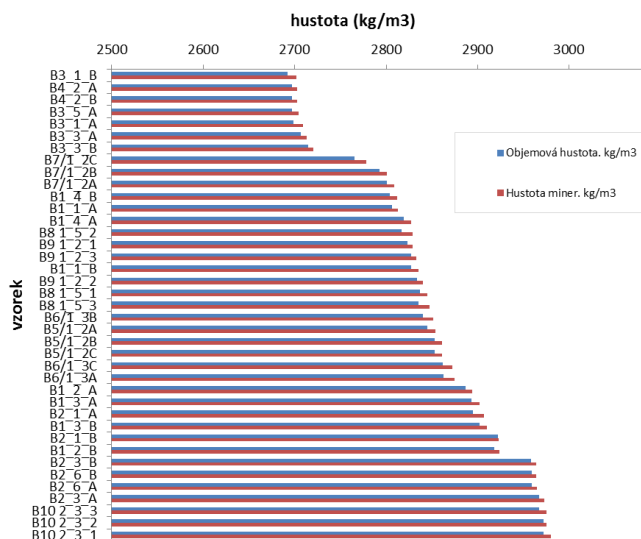
 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov			Evidenční označení:
				ZZ 191/2017
max	0,47	2983	2980	

Průběhy hustot u vzorků B1–B10 jsou vykresleny na Obr. 176 a Obr. 177. Nejnižší hustoty byly opět naměřeny u vzorků migmatitů z vrtů B3 a B4 (hodnoty kolem 2700 kg m⁻³) naopak nejvyšší hodnoty byly naměřeny na lokalitě B10 u vzorků amfibolitu (AMF; 2907–2980 kg m⁻³).

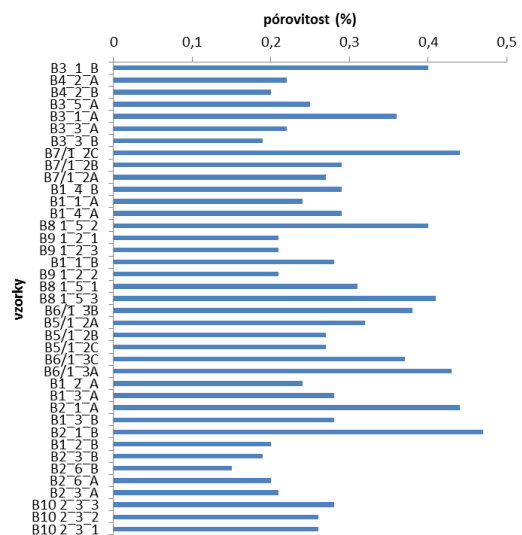


Obr. 176 Výsledky měření mineralogických hustot B1-B10, hodnoty seřazeny dle jejich velikosti

U vzorků nebyla prokázána závislost hustoty na pórovitosti (Obr. 178; Obr. 179).

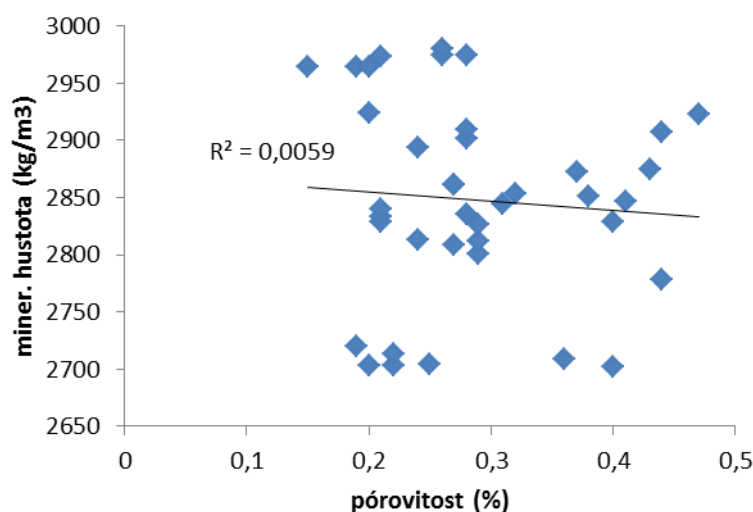


Obr. 177 Výsledky měření hustot vzorků B1–B10 (kg m⁻³), seřazeny dle velikosti



Obr. 178 Výsledky měření pórovitosti vzorků B1–B10, seřazeny dle velikosti hustoty

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017



Obr. 179 Závislost mineralogické hustoty na pórovitosti (B1–B10)

Rtuťová porozimetrie

Vzorky z vrtů S-3 a S-4 byly měřeny na sestavě porozimetrů Pascal 140 + 240 firmy Thermo Electron na pracovišti ÚSMH AV ČR. Porozimetr Pascal 140 slouží jako plnicí zařízení a provádí se na něm nízkotlakové měření do tlaku 100 kPa. Porozimetr 240 pracuje v rozsahu tlaků 0,1 až 200 MPa. Rtuťová porozimetrie je prováděna na separátních vzorcích před tím, než jsou použity pro jiná stanovení.

Pro každé měření byl použit 1 ks vzorku velikosti přibližně 40×9×9 mm, který byl před analýzou sušen 3 hodiny při teplotě 105 °C ve vakuové sušárně a poté vakuován v přístroji při teplotě místnosti až do dosažení konstantního tlaku. Všechna měření se uskutečnila v jednom dilatometru. Pro vyhodnocení byly použity hodnoty 141,3° pro stykový úhel a $480 \cdot 10^{-3} \text{ N m}^{-1}$ pro povrchové napětí rtuti. Na základě tvaru intruzních a extruzních křivek rtuti byl pro výpočet povrchu zvolen lahvičkový tvar pórů. U každého vzorku byla provedena vždy dvě nezávislá měření, a) a b), viz Tab. .

Při porovnání získaných výsledků rtuťové porozimetrie s výsledky stanovenými gravimetricky byly zjištěny rozdílné hodnoty pórovitosti. Měření pórovitosti takto nízkoporézních materiálů je ovlivněno řadou vlivů a parametrů (např. způsobem přípravy vzorků – ovlivnění povrchu, velikostí a tvarem vzorku, použitou metodikou – délka tlakových stupňů, korekce na deformaci minerálních zrn aj.). Měření nízkých porozit pod 0,5 % pomocí Hg porozimetrie je náročné a vyžaduje úpravu stávajících metodik a postupů, které jsou nad rámec této studie.

Tab. 42 Texturní parametry provedených analýz S-3 – S-4

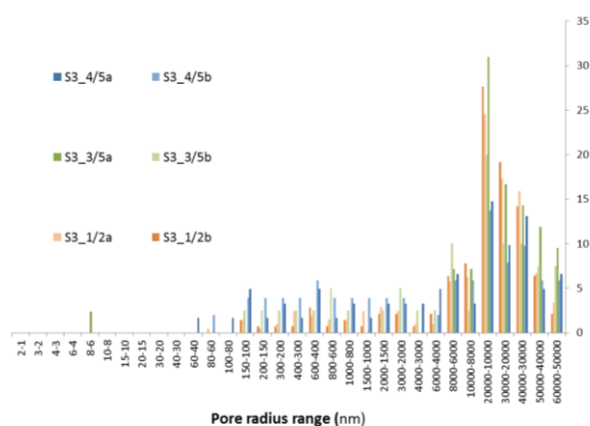
Vzorek		$V_c \text{ (mm}^3 \text{ g}^{-1}\text{)}$	$S_c \text{ (m}^2 \text{ g}^{-1}\text{)}$	$r \text{ (nm)}$	$d_{Hg} \text{ (g cm}^{-3}\text{)}$	Pórovitost (%)	Navážka (g)
S3_4-5	a	0,70	0,07	17109	2,78	0,19	8,7583
	b	0,64	0,07	16215	2,86	0,18	7,9395
S3_3-5	a	0,47	0,05	17177	2,92	0,14	8,8780

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

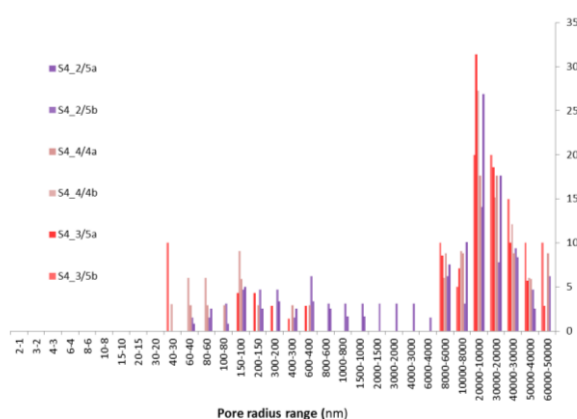
	b	0,43	0,04	17322	2,89	0,12	9,4099
S3_1-2	a	2,01	0,20	17101	2,91	0,59	10,3273
	b	1,77	0,18	16735	3,07	0,54	7,9622
S4_2-5	a	1,38	0,004	15374	2,72	0,37	8,6337
	b	0,82	0,08	17137	2,77	0,23	7,7845
S4_4-4	a	0,42	0,04	bimod.	2,97	0,12	8,1746
	b	0,39	0,04	18380	2,94	0,12	8,4239
S4_3-5	a	0,95	0,10	16831	2,82	0,27	7,4062
	b	0,40	0,04	bimod.	2,85	0,11	5,0053

V_c – celkový objem pórů, S_c – celkový povrch, r – nejčastěji zastoupený poloměr pórů, d_{Hg} – rtuťová hustota

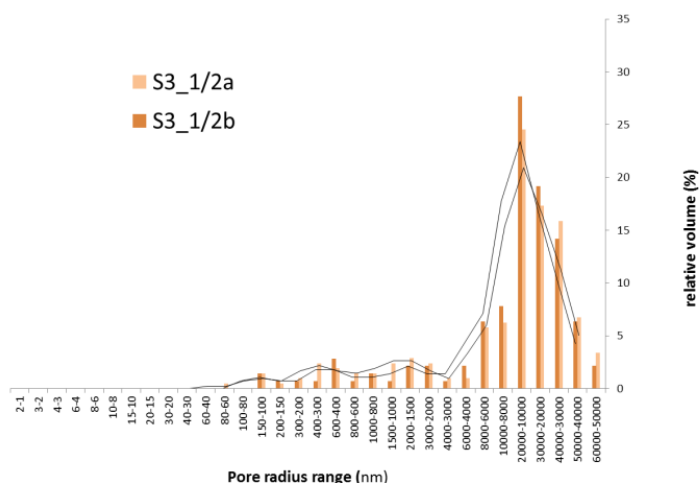
Z výsledků měření byly vyhodnoceny distribuce velikosti pórů v horninové matici vybraných vzorků S-3 a S-4 (Obr. 180 až Obr. 192). U vzorků z vrtu S-3 je více jak 50 % všech hodnot v rozmezí velikosti pórů 6–40 μm . Maximální zastoupení pórů je pak u většiny vzorků kolem 10–20 μm .



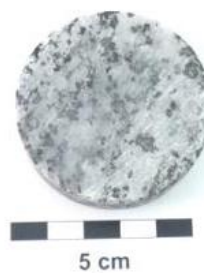
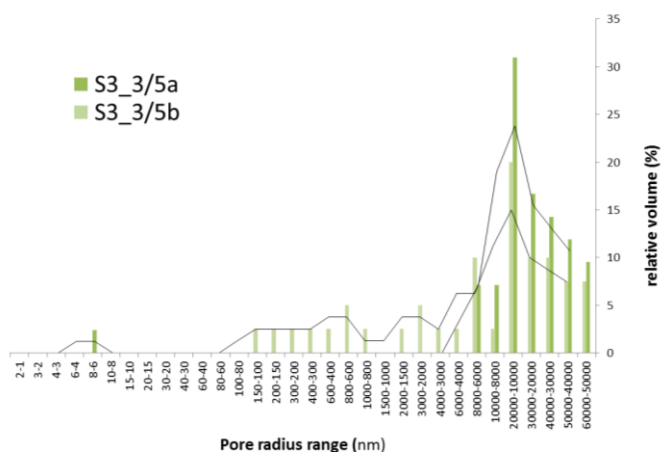
Obr. 180 Relativní zastoupení velikostí pórů u vzorků z vrtu S-3



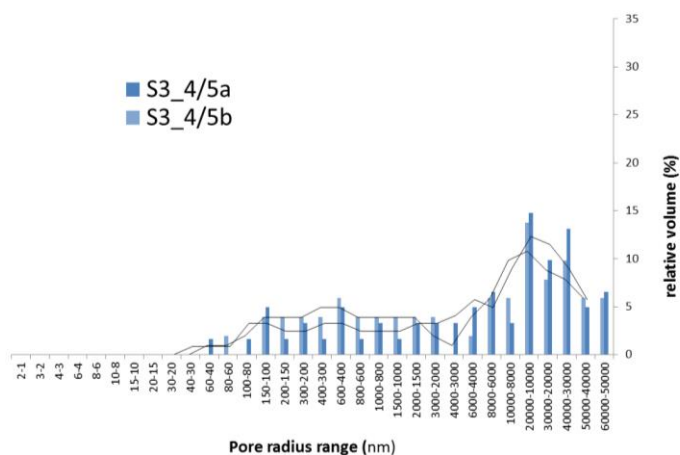
Obr. 181 Relativní zastoupení velikostí pórů u vzorků z vrtu S-4



Obr. 182 Relativní zastoupení velikostí pórů u vzorku S3_1

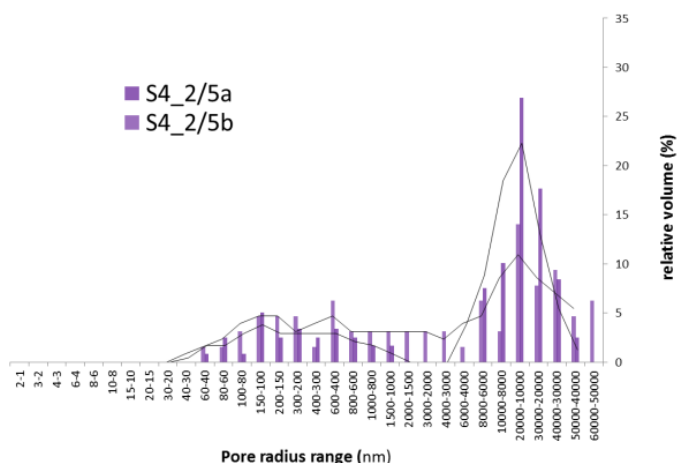

Obr. 183 Vzorek S3_1
stromatitický amfibolický migmatit
s biotitem


Obr. 184 Relativní zastoupení velikostí pórů u vzorku S3_3


Obr. 185 Vzorek S3_3
migmatizovaný
granát-biotitický
amfibolit


Obr. 186 Relativní zastoupení velikostí pórů u vzorku S3_4

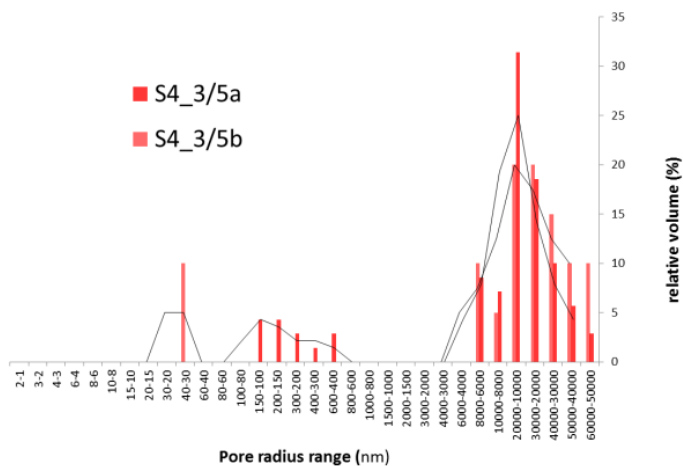

Obr. 187 Vzorek S3_4
stromatitický amfibolický migmatit
s biotitem a granátem



Obr. 188 Relativní zastoupení velikostí pórů u vzorku S4_2



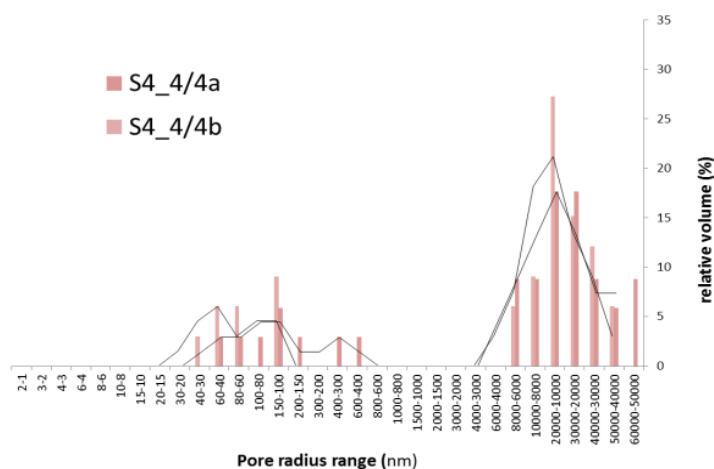
Obr. 189 Vzorek S4_2 stromatitický biotitický migmatit s převahou leukosomu



Obr. 190 Relativní zastoupení velikostí pórů u vzorku S4_3



Obr. 191 Vzorek S4_3 migmatizovaná biotit-amfibolická pararula



Obr. 192 Relativní zastoupení velikostí pórů u vzorku S4_4



Obr. 193 Vzorek S4_4 kompaktní jemnozrný amfibolit s biotitem

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

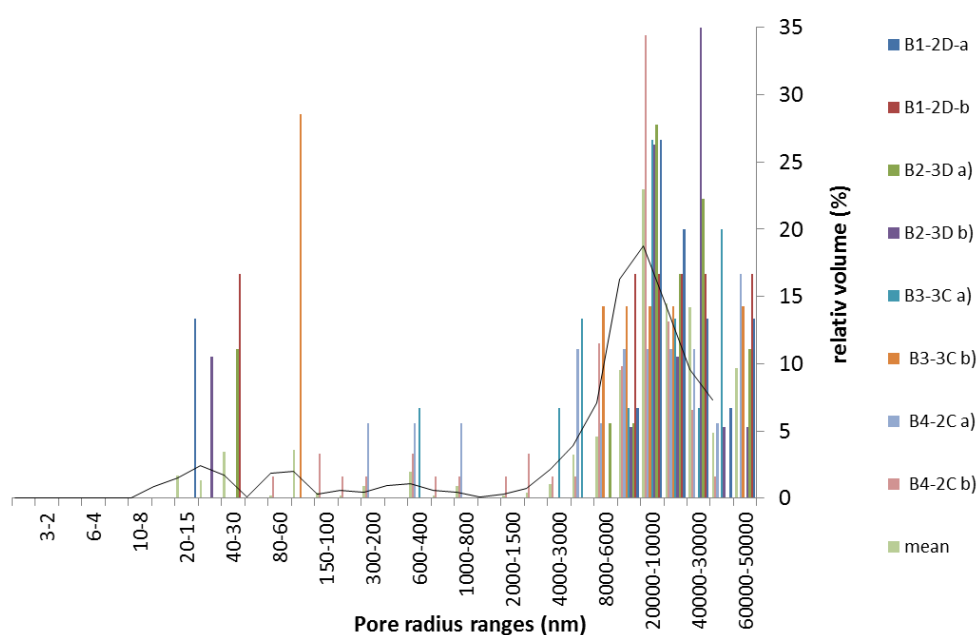
Vzorky B1–B4 měřené rtuťovou porozimetrií vykazovaly extrémně nízké hodnoty pórovitosti v intervalu od 0,03 do 0,29 % (viz Tab. 40). Bohužel ani opakovaným kontrolním měřením se nepodařilo na vzorcích naměřit reprezentativní hodnoty a na základě získaných poznatků nebylo již v dalších měření Hg porozimetrií pokračováno. Přesné měření nízké pórovitosti metamorfovaných a granitických hornin pomocí metody Hg porozimetrie je nutné podrobit hlubšímu bádání a vývoji vhodných metodik a jednotných postupů.

Tab. 40 Texturní parametry provedených analýz

Vzorek		V_c (mm ³ g ⁻¹)	S_c (m ² g ⁻¹)	r (nm)	d_{Hg} (g cm ⁻³)	Pórovitost (%)	Navážka (g)
B1_2D	a	0,26	0,004	17073	2,93	0,07	5,8726
	b	0,21	0,021	bimod,	2,96	0,06	5,6267
B2_3D	a	0,28	0,028	16668	3,01	0,08	6,3760
	b	0,29	0,029	35391	3,00	0,09	6,4695
B3_3C	a	0,25	0,023	15869	2,78	0,07	6,1152
	b	0,11	0,011	88	2,75	0,03	6,1834
B4_2C	a	0,32	0,031	50914	2,68	0,09	5,6085
	b	1,06	0,109	12660	2,70	0,29	5,7339

V_c – celkový objem pórů, S_c – celkový povrch, r – nejčastěji zastoupený poloměr pórů, d_{Hg} – rtuťová hustota

Výsledky měření byly využity pro charakterizaci zastoupení velikosti pórů ve studovaných vzorcích. Průběhy zastoupení velikosti pórů u vzorků B1–B4 vykazují podobné průběhy jako vzorky z jader S3 a S4 s maximálním zastoupením pórů kolem 10–20 μ m (Obr. 194).



Obr. 194 Relativní zastoupení velikostí pórů u vzorků B1- B4

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

Petrologická charakteristika vybraných litologických typů hornin odebraných z orientovaných jader vrtů S-3 a S-4

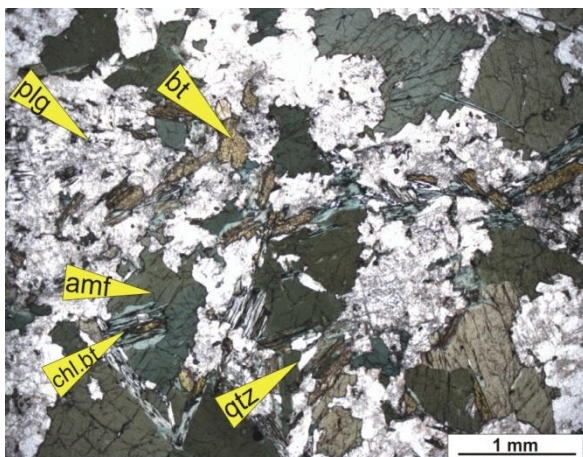
Na základě dokumentace hlavních litologických horninových typů byly vybrány určité části jader S-3 a S-4, které byly následně použity pro experimentální a laboratorní výzkum předem daných fyzikálních vlastností. Pro zpřesnění dokumentace bylo potřeba určit i přesnou petrologicko-mineralogickou charakteristiku jednotlivých odebraných částí těchto vrtných vzorků. Petrologická analýza byla provedena petrology ČGS. Přehled odebraných a petrologicky analyzovaných vzorků je v Tab. 41.

Tab. 41 Přehled odebraných a petrologicky analyzovaných vzorků z vrtných jader S-3 a S-4

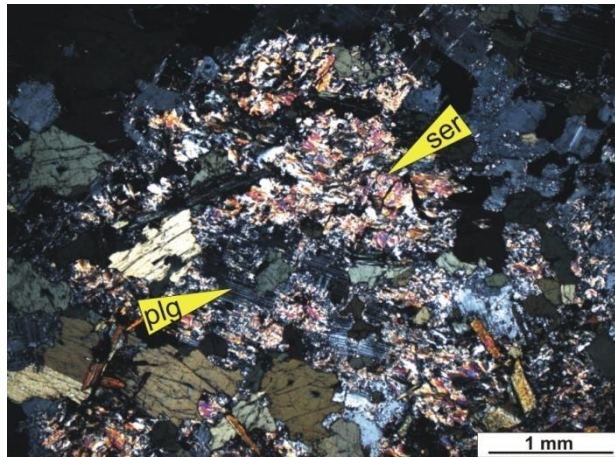
Vrt	Označení	Hloubka odběru (m)	Délka odebraného jádra (cm)	Hornina – litologie
S-3	S3_1/5	73,65–73,94	29	stromatitický amfibolický migmatit s biotitem
S-3	S3_3/7	81,63–81,98	35	migmatizovaný granát-biotitický amfibolit
S-3	S3_4/7	86,70–87,00	30	stromatitický amfibolický migmatit s biotitem a granátem
S-4	S4_2/7	10,15–10,35	20	stromatitický biotitický migmatit s převahou leukosomu
S-4	S4_3/7	25,00–25,28	28,5	migmatizovaná biotit-amfibolická pararula
S-4	S4_4/1	36,00–36,14	14	kompaktní jemnozrnný amfibolit s biotitem

Vzorky z vrtu S-3

Stromatitický amfibolický migmatit s biotitem (vzorek S3_1/5) je páskovaná, drobně až střednězrnatá hornina, která je místy chaoticky provrásněná. Má lepidogranoblastickou strukturu. Hlavní minerální asociaci tvoří plagioklas (52 %), amfibol (30 %) a křemen (10 %) (Obr. 195). Plagioklas vytváří poměrně velká (1–2 mm) zrna s nepravidelnými laločnatými okraji, která jsou často nahrazována sericitem. Amfibol (0,5–1 mm) tvoří hnízda hypidiomorfních zrn, která nevykazují zonálnost, jejich optické vlastnosti a zeleno-hnědé zabarvení naznačují složení ferro-hornblendu. Allotriomorfní zrna křemene (0,1–0,3 mm) vyplňují často prostor mezi plagioklasy, někdy se vyskytují jako samostatné agregáty undulózně zhášejících zrn. Vedlejším minerálem je biotit (4 %), který tvoří hypidiomorfní lupenité agregáty (do 0,5 mm), někde řazené do pásků, jinde chaoticky roztroušené v matrix. Některá zrna biotitu podléhají chloritizaci. Minoritně se vyskytuje epidot (2 %) a draselný živec (1 %). Akcesorie (1 %) tvoří apatit, zirkon a opakní minerály jako ilmenit a pyrit. Hydrotermální alterace se projevují silnou až totální sericitizací plagioklasu (Obr. 196), chloritizací biotitu nebo růstem epidotu na úkor rozpadajícího se amfibolu.



Obr. 195 Provrásněná (stromatitická) struktura amfibolického migmatitu s biotitem. Hlavní minerální složky tvoří plagioklas (plg), amfibol (amf) a křemen (qtz). Vedlejším minerálem je biotit (bt)

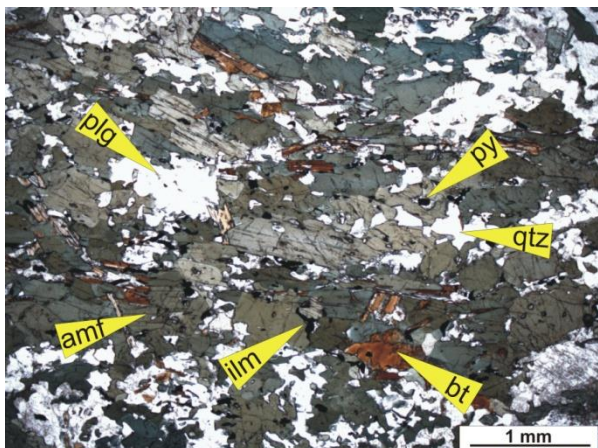


Obr. 196 Totální sericitizace (ser) plagioklasu (plg)

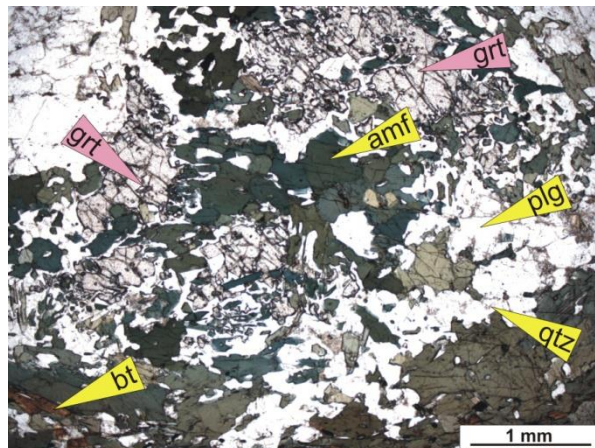
Migmatizovaný granát-biotitický amfibolit (vzorek S3_3/7) je páskovaná hornina s drobnou až jemnozrnnou, granoblastickou strukturou složenou především z amfibolu (50 %) a plagioklasu (28 %), minoritně je zastoupen biotit (9 %), křemen (6 %) a granát (5 %; Obr. 197). Akcesorie (2 %) jsou tvořené především opakními minerály jako pyrit, pyrhotin a ilmenit, ale vyskytují se i titanit, apatit a zirkon.

Protažené, hypidiomorfní agregáty (0,5–1 mm) amfibolu tvoří podstatnou část matrix. Na amfibol je vázáno velké množství drobných zrn opakních minerálů. Hypidiomorfní zrna plagioklasu se vyskytují jako drobné (do 0,2 mm) agregáty uvnitř amfibolových poloh nebo vytváří mozaiku zrn (do 1 mm) v samostatných křemen - plagioklasových páscích. Některé středy větších zrn jsou sericitizované. Biotit tvoří lištovité až lupenité agregáty (do 0,5 mm) usměrněné s foliací, v asociaci výhradně s amfibolem. Biotit je na okrajích nahrazován chloritem. Křemen se nachází především v křemen-živcových páscích a čočkách, kde tvoří mozaiku rekrystalizovaných zrn (do 0,6 mm), které často undulózně zháší. Porfyroblasty (až 3 mm) granátu jsou totálně konzumovány a nahrazovány amfibolem, plagioklasem a popř. biotitem (Obr. 198).

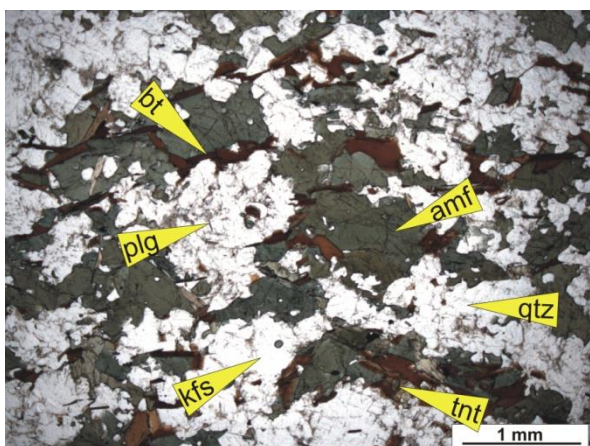
Stromatitický amfibolický migmatit s biotitem a granátem (vzorek S3_4/7) je páskovaná, místy chaoticky provrásněná, středně zrnitá hornina. Tento migmatit je charakteristický přítomností polyminerálních pásků hrubozrnějšího světlého leukosomu, který je tvořen převážně plagioklasem (30 %), křemenem (15 %) a draselným živcem (12 %). Melanosom/restit, který je místy intenzivně provrásněn, obsahuje především amfibol (30 %) a biotit (12 %), ale i malé množství granátu (0,2 %) a rekrystalizovaného plagioklasu a křemene. Akcesorie (1 %) tvoří zirkon, apatit, titanit a opakní minerály jako pyrit a ilmenit (Obr. 199).



Obr. 197 Usměrněná, protažená struktura migmatizovaného páskovaného amfibolitu s biotitem. Hlavní minerální komponenty jsou amfibol (amf) a plagioklas (plg). Vedlejším minerálem je biotit (bt), křemen (qtz) a granát (grt.)



Obr. 198 Postupný rozklad a nahrazování porfyroblastů granátu (grt) amfibolem (amf), plagioklasem (plg) a biotitem (bt)



Obr. 199 Stromatitická struktura amfibolického migmatitu s biotitem a granátem. Světlý leukosom je tvořen hlavně plagioklasem (plg), křemenem (qtz) a K-živcem (kfs). Provrásněný restit (melanosom) se skládá především z amfibolu (amf) a biotitu (bt)

Hypidiomorfní zrna amfibolu (1–3 mm) mají nerovné okraje a opticky nevykazují žádnou zonálnost. Některá z nich obsahují inkluze plagioklasu a křemene. Okraje amfibolu jsou někde nahrazovány sekundárním biotitem nebo chloritem. Hypidiomorfní zrna plagioklasu se vyskytují jako drobné (do 0,1 mm) agregáty uvnitř amfibolových poloh nebo vytváří mozaiku zrn (do 1,5 mm) v samostatných křemen-živcových páscích spolu s mírně pertitickými K-živci. Téměř všechny živce jsou mírně sericitizované. Rekrystalizované složené agregáty (do 0,3 mm) křemene mají laločnaté okraje a výrazně undulózně zháší. Křemenná zrna se vyznačují nejvyšší mírou protažení ve směru foliace z přítomných světlých minerálů. Lupenité a lištovité agregáty (do 0,4 mm) biotitu jsou výhradně vázány na restit a jsou téměř vždy v asociaci s amfibolem. Míra alteračních přeměn biotitu (např. chloritizace) je nízká. Drobná zrna granátu (do 0,1 mm), která jsou výhradně součástí restitických poloh, jsou velmi často obrůstána či úplně nahrazována biotitem a plagioklasem, popř. amfibolem.

Kolmo k délce výbrusu prochází několik drobných (do 0,1 mm) hydrotermálně alterovaných žilek, vyplněných především chloritem a sericitem.

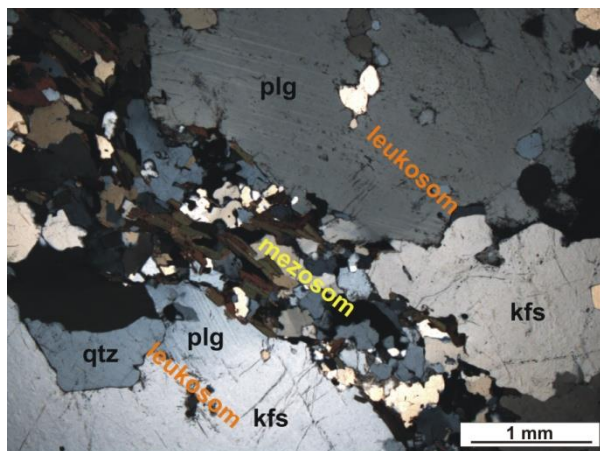
 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

Vzorky z vrtu S-4

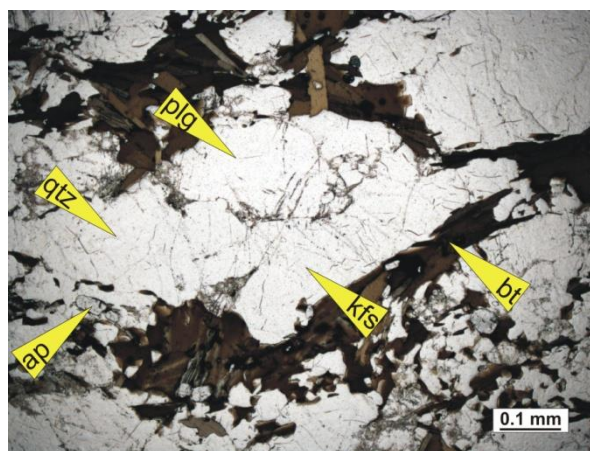
Stromatitický biotitický migmatit s převahou leukosomu (vzorek S4_2/7) je středně zrnitá páskovaná hornina s lepidogranoblastickou strukturou. Je typickým příkladem stromatitického migmatitu, kdy vytavená světlá složka - leukosom, přesáhla 20 % objemu horniny. Leukosom zde tvoří pásy poměrně velkých zrn K-živce (5–8 mm), plagioklasu (do 7 mm) a křemene (do 4 mm). Zdrojová hornina - mezosom, ochuzená již o část taveniny, je mnohem jemnozrnější a obsahuje hlavně biotit (do 0,5 mm), ale i drobná zrna (0,1–0,5 mm) plagioklasu a křemene (vše viz Obr. 200 a Obr. 201). Celkově migmatit obsahuje asi 30 % plagioklasu, 30 % K-živce, 25 % křemene a 13 % biotitu. Zbýlá 2 % tvoří akcesorie jako zirkon, apatit, pyrit a ilmenit.

Agregáty živců a křemene v leukosomu mají nerovné až laločnaté okraje. K-živec je poměrně často mírně pertitický, někde částečně alterovaný sericitem. Plagioklas uzavírá množství inkluzí křemene a apatitu a také podléhá sericitizaci. Křemenná zrna často vyplňují prostor mezi živci a silně undulózně zháší. Lištovité agregáty biotitu v reziduálních polohách mezosomu se řadí do pásků, někdy chaoticky provrásněných. Biotit často uzavírá zirkon nebo apatit, kolem kterých bývají pleochroické dvůrky. Tyto biotitové pásy se prolínají s jemnozrnnou směsí plagioklasu a křemene.

Kolmo k délce výbrusu protínají matrix dvě drobné (do 0,2 mm) hydrotermálně alterované žilky, vyhojené kalcitem, adulárem a sericitem.



Obr. 200 Stromatitická struktura biotitického migmatitu s převahou leukosomu. Světlý leukosom je tvořen velkými zrny K-živce (kfs), plagioklasu (plg) a křemene (qtz). Reziduální zdrojová hornina - mezosom se skládá především z biotitu a jemnozrnné směsi plagioklasu a křemene



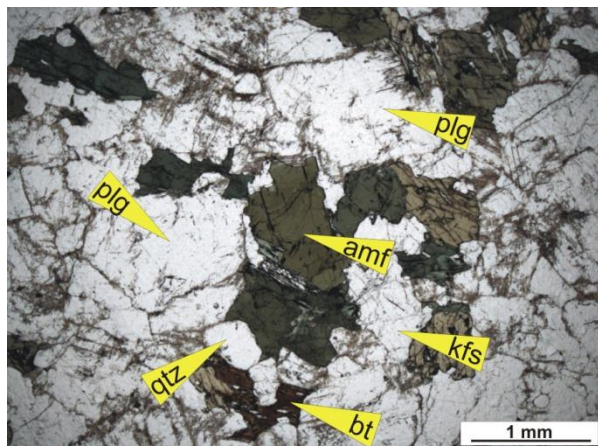
Obr. 201 Detail chaotického provrásnění zbytkového mezosomu, tvořeného převážně biotitem (bt), ve stromatitickém migmatitu. Světlá granitoidní složka se skládá z K-živce (kfs), plagioklasu (plg) a křemene (qtz).

Migmatitizovaná biotit-amfibolická pararula (vzorek S4_3/7) je mírně usměrněná hornina s drobnozrnnou, granoblastickou strukturou, složenou především z plagioklasu (43 %), křemene (25 %), amfibolu (15 %) a draselného živce (10 %). Minoritně je zastoupen biotit (5 %). Akcesorie (2 %) tvoří apatit, granát, zirkon a ilmenit (Obr. 202).

Plagioklas vytváří zrna (do 1 mm) s nepravidelnými okraji, která jsou často nahrazována sericitem. Agregáty křemene (do 0,5 mm) mají výrazně laločnaté okraje a z 1/3 doplňují

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

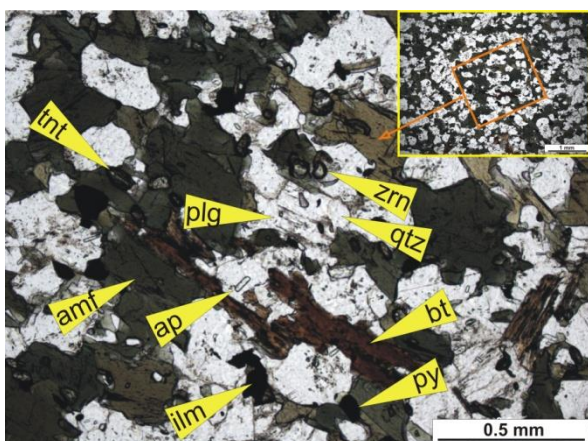
mozaiku křemen-živcové matrix. Většina křemenných zrn výrazně undulózně zháší. Amfibol (0,5–1 mm) tvoří shluky hypidiomorfních zrn, která nevykazují zonálnost, jejich optické vlastnosti a zeleno-hnědé zbarvení naznačují složení ferro/magnesio-hornblendu. Zrna amfibolu obsahují často inkluze plagioklasu a křemene. Agregáty K-živce (0,5–1 mm) se vyskytují méně, téměř všechny jsou alterovány sericitem a některé z nich jsou pertitické. Vedlejším minerálem je biotit (4 %), který tvoří hypidiomorfní lupenité a lištovité agregáty (do 0,5 mm), chaoticky roztroušené v matrix, často v asociaci s amfibolem. Některá zrna biotitu podléhají chloritizaci.



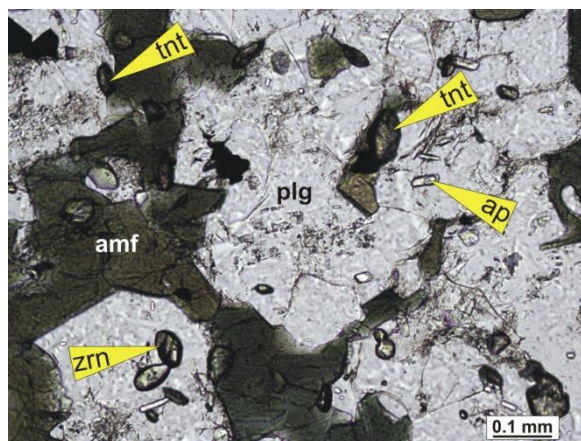
Obr. 202 Mírně usměrněná struktura migmatizované biotit-amfibolické pararuly. Hlavní minerální složky matrix jsou plagioklas (plg), křemen (qtz), amfibol (amf) a K-živec (kfs). Minoritně se vyskytuje biotit (bt)

Kompaktní jemnozrnný amfibolit s biotitem (vzorek S4_4/1) je jemně páskovaná hornina s jemnozrnnou, granoblastickou strukturou složenou především z amfibolu (35 %), plagioklasu (35 %) a křemene (18 %), minoritně je zastoupen biotit (9 %). Akcesorie (3 %) jsou tvořené především opakními minerály jako pyrit, pyrhotin a ilmenit, ale vyskytují se i titanit a zirkon a hojně jsou idiomorfní inkluze apatitu uzavřené v plagioklasu.

Mírně usměrněné, hypidiomorfní agregáty (do 0,5 mm) amfibolu tvoří spolu s plagioklasem podstatnou část matrix. Na amfibol je vázáno velké množství drobných zrn opakních minerálů. Nepravidelná, hypidiomorfní zrna plagioklasu (do 0,3 mm) obsahují často množství malých idiomorfních inkluzí apatitu (Obr. 204). Některé středy větších zrn jsou sericitizované. Křemen se vyskytuje jako menší (do 0,4 mm) undulózně zhášející zrna, která doplňují mozaiku amfibolů a plagioklasů v matrix. Biotit vytváří lupenité agregáty (0,5–0,7 mm), mírně usměrněné s foliací, na okrajích někde slabě alterované chloritem. Produkce titanitu je často vázána na interakci amfibolu s biotitem.



Obr. 203 Mírně usměrněná struktura jemnozrnného kompaktního amfibolitu. Hlavní minerální složky matrix jsou amfibol (amf), plagioklas (plg) a křemen (qtz). Minoritně se vyskytuje biotit (bt). Hojnými akcesoriemi jsou ilmenit (ilm), pyrit (py), titanit (tnt), apatit (ap) a zirkon (zrn)



Obr. 204 Množství idiomorfních inkluzí apatitu (ap), popř. zirkonu (zrn) v plagioklasu. Hojnou akcesorií je též titanit (tnt)

Mineralogická analýza

Z každého vzorku bylo připraveno 5 zrnitostní frakcí (A: < 0,063 mm, B: 0,125–0,063 mm, C: 0,63–0,125 mm, D: 0,8–0,63 mm a E: > 0,8 mm), které byly následně analyzovány.

Nadrcené vzorky z jader S-3 a S-4 byly analyzovány rtg difrakcí na práškovém rtg difraktometru Bruker D8 Advance v Bragg-Brentanově uspořádání na ČGS (Dr. František Laufek, ČGS). Použito bylo CuK α záření a pozičně citlivého detektoru s detektorem Lynx Eye XE. Práškový vzorek byl umístěn na rovinné podložce (tzv. bezdifrakční křemík). Difrakční záznam byl pořízen v úhlovém rozsahu 4–80° 2 Θ s krokem 0,015° a načítacím časem 0,8 sek na krok.

Získané rtg difrakční záznamy byly kvalitativně vyhodnoceny v programu Diffrac.Eva (Bruker AXS, 2015) za pomoci databáze PDF 2. Následná semikvantitativní fázová analýza byla provedena pomocí Rietveldovy metody (Post and Bish 1989) v programu Topas 5 (Bruker AXS, 2014). Modely krystalových struktur jednotlivých fází byly získány z databáze ICSD (FIZ 2015). Během Rietveldovy analýzy byly upřesňovány škálové faktory jednotlivých fází, jejich mřížkové parametry a velikost koherentně difraktujících domén. Byla použita korekce na přednostní orientaci. Limit detekce metody se pohybuje v závislosti na charakteru fáze a její krystalinitě v rozmezí cca 0,2–0,5 hm. %. V Tab. 42 jsou uvedeny výsledky mineralogického složení frakcí C: 0,63–0,125 mm, frakce D: 0,8–0,63 mm, které byly následně použity pro sorpční experiment.

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

Tab. 42 Mineralogické složení použitých horninových vzorků z PVP Bukov (hm. %), frakce C: 0,63–0,125 mm, frakce D: 0,8–0,63 mm

Horninový vzorek	Frakce	Křemen	Plagioklas	K-živec	Chlorit	Amfibol		Biotit, annit	Kalcit	Titanit	Pravděpodobně přítomné minerály
						Hornblend	Cummingtonit				
S3-3	C	8	59,5		0,5	26	2	4			
	D	8,5	60		0,5	25	3	3			dolomit
S3-4	C	29	49	0,5	0,5	17		4			
	D	29	52	1	0,5	15		2,5			
S4-3	C	26,5	46	0,5		22,5		4,5			
	D	29	52	0,5		16		3			chlorit, hematit
2S4-2	C	41	46,5		1			11	0,5		pyrit
	D	42	48,5		1			8	0,5		Pyrit
2S4-4	C	11	35,5		1	50			0,5	2	slída, K-živec
	D	9	39,5		0,5	49			0,5	1,5	

Vliv zastoupení jednotlivých minerálů na sorpční vlastnosti a mechanismy sopce jsou uvedeny v kapitole 2.5.4.

Propustnost

Po ukončení měření propustnosti byly získané hodnoty vyneseny do tabulkového editoru a za pomoci opravných koeficientů zkorigovány. Pro stanovení součinitele filtrace byly pak použity pouze lineární části vstupní a výstupní čáry. Těmito body grafu byly proloženy regresní přímky, byly porovnány jejich směrnice a jejich hodnoty spolehlivosti (koeficienty determinace R^2). Pokud se směrnice přímek mírně lišily, byly pro stanovení součinitele filtrace použity obě čáry a výsledný součinitel byl vypočítán jako aritmetický průměr obou dílčích součinitelů. V několika případech byly směrnice regresních přímek natolik odlišné, že nebylo možné experiment vyhodnotit v souladu s citovanou normou. V takovém případě byl stanoven pouze „orientační součinitel filtrace“, pro jehož výpočet byla použita vstupní čára, která vždy vykazuje konzistentnější hodnoty a je tudíž z obou čar pro orientační výpočet vhodnější.

Součinitele filtrace pro jednotlivé vzorky byly stanoveny výpočtem z proteklého objemu vody, doby trvání experimentu, nastavené tlakové výšky (1 MPa = 101,97 m vodního sloupce) a změřených rozměrů vzorku podle rovnice:

$$k = \frac{Q \times I}{A \times h} \quad (24)$$

přičemž

$$Q = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (25)$$

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

kde ΔV je množství vody proteklé ve vybraném časovém intervalu (m^3), Δt odpovídající časový interval (s), A průřezová plocha zkušební vzorku (m^2), I výška zkušební vzorku (m), h tlaková výška hladiny vody (m).

Vypočítané hodnoty součinitelů filtrace při laboratorní teplotě byly poté kvůli reprodukovatelnosti přepočítány na hodnoty k_{10} při referenční teplotě 10 °C pomocí Poisseuilleovy empirické rovnice:

$$k_{10} = \alpha \times k_T \quad (26)$$

přičemž

$$\alpha = \frac{1,359}{1+0,0337 \times T + 0,000222 \times T^2} \quad (27)$$

kde

α je opravný součinitel, k_T součinitel filtrace při laboratorní teplotě (m s^{-1}), T laboratorní teplota (°C).

Výsledky měření jsou shrnuty v následující tabulce Tab. 43.

Tab. 43 Vypočítané součinitele filtrace jednotlivých vzorků

Číslo vzorku	Součinitel filtrace k_{10} (m s^{-1})	Poznámka
B7_1_3	$1,6 \cdot 10^{-13}$	orientační hodnota
S3_1_4	$1,6 \cdot 10^{-13}$	
S3_3_6	$2,1 \cdot 10^{-14}$	
S3_4_6	$4,3 \cdot 10^{-14}$	
S4_2_6	$1,6 \cdot 10^{-15}$	
S4_3_6	$5,8 \cdot 10^{-14}$	
S4_4_6	$2,9 \cdot 10^{-13}$	orientační hodnota

Vzhledem k délce měření (cca 1 měsíc/vzorek) byly vzorky po AMS (B3–B10) měřeny v propustoměru fy Infratest v triaxiální tlakové komoře od vzdušněnou tlakovou vodou při konstantním hydraulickém sklonu na pracovišti ÚGN AV ČR v Ostravě. Měření objemu proteklé vody bylo realizováno ručním odečtem z měřicích byret.

Získané hodnoty propustnosti na neporušených vzorcích z vrtů S-3 a S-4 byly velmi nízké a často na hranici měřitelnosti dané aparatury (Tab. 43). Při měření srovnávacích vzorků (B7/1/2 a B7/1/1) bylo mezi oběma aparaturami dosaženo srovnatelných výsledků, nicméně naměřené hodnoty vzorků B3-B10 byly nižší oproti vzorkům S-3 a S-4.

U vzorků B3, B8, B10 nebylo možné vzhledem k nízkým propustnostem spočítat součinitel filtrace. Nejvyšší propustnost ($9,68 \cdot 10^{-11}$) byla naměřena u vzorku B4-1, který obsahoval drobnou nehomogenitu (uzavřenou puklinu).

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

Tab. 44 Součinitele filtrace vzorků B 3 – B10 (ÚGN)

Označení vzorku	Objemová hmotnost (kg m ⁻³)	Průměr k_{10} (m s ⁻¹)	Směrodatná odchylka	Koeficient variability (%)
B3-4	2702	Neměřitelný průtok		
B4-1	2702	$9,68 \cdot 10^{-11}$	$9,40 \cdot 10^{-12}$	9,7
B5/1/1	2853	$3,02 \cdot 10^{-13}$	$9,7 \cdot 10^{-14}$	32,1
B6/1/2	2820	$1,34 \cdot 10^{-13}$	$6,1 \cdot 10^{-14}$	46,0
B7/1/1	2760	$1,55 \cdot 10^{-13}$	$6,1 \cdot 10^{-14}$	39,2
B8/1/4	2821	Neměřitelný průtok		
B9/2/4	2819	$2,02 \cdot 10^{-12}$	$4,00 \cdot 10^{-13}$	19,9
B10/1/5	2845	Neměřitelný průtok		

Průnikové difúzní experimenty

V následujících kapitolách jsou shrnuty výsledky difúzních experimentů ve formě efektivních difúzních koeficientů. Data jsou rozčleněna po jednotlivých vrtných jádrech. Značení horninových typů je převzato ze zprávy (Verner a Bukovská2015). Bližší výsledky měření parametrů magnetické susceptibility je možné najít ve zprávě z roku 2015.

Vrtné jádro B1

Tab. 45 Vyhodnocení efektivních difúzních koeficientů pro vzorky z jádra B1

Označení vzorku	ε (%)	D_e ³ H 10 ⁻¹³ m ² s ⁻¹	D_e ³⁶ Cl 10 ⁻¹⁴ m ² s ⁻¹	D_e ¹²⁵ I 10 ⁻¹⁴ m ² s ⁻¹	Poměr D_e aniont/ ³ H	Vyhodnocení
B1/3_B	0,28	3,1	13,3		0,43	<i>time-lag</i>
		3,3	14		0,42	GoldSim
B1/4_A	0,29	1,4		2,3	0,16	<i>time-lag</i>
		1,4		3	0,21	GoldSim
B1/4_B	0,29	1,5	3,9		0,27	<i>time-lag</i>
		1,5	4		0,27	GoldSim

Převládajícím horninovým typem vrtného jádra B1 jsou ruly (usměrnění zrn kolmé k ose vrtu).

Vzorek B1/3_B vykazuje vyšší hodnoty efektivních difúzních koeficientů než zbylé vzorky z jádra B1. Tato odlišnost souvisí s okem viditelnou puklinou na vzorku B1/3_B. U dalších dvou vzorků (B1/4_A a B1/4_B) byl pozorován nízký tok aniontu do cílového rezervoáru ($D_e < 4 \cdot 10^{-14}$ m² s⁻¹). Jelikož poměr efektivních difúzních koeficientů aniontu a tritia (aniont/³H) je nižší než poměr referenčních difuzivit (při použití tabelárních D_w pro nekonečné zředění je poměr přibližně 0,8), lze předpokládat, že dochází k aniontové exkluzi.

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

Vrtné jádro B2

Tab. 46 Vyhodnocení efektivních difúzních koeficientů pro vzorky z jádra B2

Označení vzorku	ε (%)	$D_e \text{ } ^3\text{H}$ $10^{-13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	$D_e \text{ } ^{36}\text{Cl}$ $10^{-14} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	$D_e \text{ } ^{125}\text{I}$ $10^{-14} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	Poměr D_e aniont/ ^3H	Vyhodnocení
B2/1_A	0,44	1,7	1,4		0,08	<i>time-lag</i>
B2/3_B	0,19	1,4	2,2		0,16	<i>time-lag</i>
B2/6_A	0,20	1,4		2,0	0,14	<i>time-lag</i>
B2/6_B	0,15	1,2	1,0		0,09	<i>time-lag</i>

Převládajícím horninovým typem vrtného jádra B2 jsou amfibolity (paralelní usměrnění zrn k ose vrtu).

Všechny vzorky vykazují nízké hodnoty difúzních koeficientů jak pro tritium, tak pro aniontové stopovače (^{36}Cl , ^{125}I). Také poměr efektivních difúzních koeficientů aniontu a tritia (aniont/ ^3H) je nízký, což ukazuje na výraznější vliv aniontové exkluze.

Vrtné jádro B3

Tab. 50 Vyhodnocení efektivních difúzních koeficientů pro vzorky z jádra B3

Označení vzorku	ε (%)	$D_e \text{ } ^3\text{H}$ $10^{-13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	$D_e \text{ } ^{36}\text{Cl}$ $10^{-14} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	$D_e \text{ } ^{125}\text{I}$ $10^{-14} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	Poměr D_e aniont/ ^3H	Vyhodnocení
B3/1_A	0,36	6,9		11,7	0,17	<i>time-lag</i>
B3/1_B	0,40	8,6		28,0	0,32	<i>time-lag</i>
B3/3_B	0,19	2,7	5,8		0,21	<i>time-lag</i>
B3/5_A	0,24	5,3	16,3		0,31	<i>time-lag</i>

m) probíhající experiment se vzorkem – pro vyhodnocení D_e není dostupné dostatečné množství dat

Převládajícím horninovým typem vrtného jádra B3 jsou migmatity (šikmá foliace k ose vrtu).

Kromě vzorku B3/3_B obsahují všechny ostatní vzorky porušení a obsahují viditelnou puklinu, která má vliv na vyšší difuzivitu vzorků. Na druhou stranu, ani přítomnost pukliny ve vzorku neznamená dramatické (řádkové) zvýšení difuzivity. Jelikož poměr efektivních difúzních koeficientů aniontu a tritia (aniont/ ^3H) je nižší než poměr referenčních difuzivit (při použití tabelárních D_w pro nekonečné zředění je poměr přibližně 0,8), lze konstatovat, že i u vzorků s puklinou lze pozorovat vliv aniontové exkluze.

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

Vrtné jádro B4

Tab. 51 Vyhodnocení efektivních difúzních koeficientů pro vzorky z jádra B4

Označení vzorku	ε (%)	$D_e \text{ } ^3\text{H}$ $10^{-13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	$D_e \text{ } ^{36}\text{Cl}$ $10^{-14} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	$D_e \text{ } ^{125}\text{I}$ $10^{-14} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	Poměr D_e aniont/ ^3H	Vyhodnocení
B4/2_A	0,22	2,2		5,4	0,24	<i>time-lag</i>
		2,2		7	0,32	GoldSim
B4/2_B	0,20	3,1	9,1		0,29	<i>time-lag</i>
		3,0	9		0,30	GoldSim

Převládajícím horninovým typem vrtného jádra B4 jsou migmatity (šikmá foliace k ose vrtu).

Vzorky vykazují hodnoty difúzních koeficientů srovnatelné se vzorkem B3/3_B taktéž ze skupiny migmatitů. Poměr efektivních difúzních koeficientů aniontu a tritia (aniont/ ^3H) je opět nízký a ukazuje tak na vliv aniontové exkluze na difúzi aniontových stopovačů.

Vrtné jádro B5

Tab. 52 Vyhodnocení efektivních difúzních koeficientů pro vzorky z jádra B5

Označení vzorku	ε (%)	$D_e \text{ } ^3\text{H}$ $10^{-13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	$D_e \text{ } ^{36}\text{Cl}$ $10^{-14} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	$D_e \text{ } ^{125}\text{I}$ $10^{-14} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	Poměr D_e aniont/ ^3H	Vyhodnocení
B5/1_2A	0,32	1,7		0,9	0,05	<i>time-lag</i>
B5/1_2B	0,27	1,7	2,8		0,17	<i>time-lag</i>

Převládajícím horninovým typem vrtného jádra B5 jsou ruly (šikmá foliace k ose vrtu).

Vzorky vykazují nižší hodnoty difúzních koeficientů jak pro tritium, tak pro aniontové stopovače. Také poměr efektivních difúzních koeficientů aniontu a tritia (aniont/ ^3H) je nízký, což ukazuje na výraznější vliv aniontové exkluze.

Vrtné jádro B6

Tab. 47 Vyhodnocení efektivních difúzních koeficientů pro vzorky z jádra B6

Označení vzorku	ε (%)	$D_e \text{ } ^3\text{H}$ $10^{-13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	$D_e \text{ } ^{36}\text{Cl}$ $10^{-14} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	$D_e \text{ } ^{125}\text{I}$ $10^{-14} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	Poměr D_e aniont/ ^3H	Vyhodnocení
B6/1_3A	0,43	1,7		11,8	0,71	<i>time-lag</i>
B6/1_3B	0,38	2,6	7,1		0,27	<i>time-lag</i>

Převládajícím horninovým typem vrtného jádra B6 jsou migmatitizované ruly (kolmá foliace k ose vrtu).

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

Vzorky vykazují v porovnání se vzorky z jiných jader vyšší hodnoty difúzních koeficientů pro aniontové stopovače. Poměr efektivních difúzních koeficientů aniontu a tritia (aniont/³H) je pro vzorek B6/1_3A blízký poměru referenčních difuzivit (při použití tabelárních D_w pro nekonečné zředění je poměr přibližně 0,8). U vzorku B6/1_3B je naopak patrný vliv aniontové exkluze.

Vrtné jádro B7

Tab. 48 Vyhodnocení efektivních difúzních koeficientů pro vzorky z jádra B7

Označení vzorku	ε (%)	D_e ³ H $10^{-13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	D_e ³⁶ Cl $10^{-14} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	D_e ¹²⁵ I $10^{-14} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	Poměr D_e aniont/ ³ H	Vyhodnocení
B7/1_2A	0,27	1,5		2,0	0,13	<i>time-lag</i>
		1,9		2	0,11	GoldSim
B7/1_2B	0,29	1,5	1,6		0,11	<i>time-lag</i>
		1,7	3		0,18	GoldSim

Převládajícím horninovým typem vrtného jádra B7 jsou ruly (s kolmou foliací k ose vrtu).

Vzorky vykazují nižší hodnoty difúzních koeficientů jak pro tritium, tak pro aniontové stopovače. Také poměr efektivních difúzních koeficientů aniontu a tritia (aniont/³H) je nízký, což ukazuje na výraznější vliv aniontové exkluze.

Vrtné jádro B8

Tab. 49 Vyhodnocení efektivních difúzních koeficientů pro vzorky z jádra B8

Označení vzorku	ε (%)	D_e ³ H $10^{-13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	D_e ³⁶ Cl $10^{-14} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	D_e ¹²⁵ I $10^{-14} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	Poměr D_e aniont/ ³ H	Vyhodnocení
B8/1_5_1	0,31	2,5		5,6	0,22	<i>time-lag</i>
B8/1_5_3	0,41	3,0	6,8		0,23	<i>time-lag</i>

Převládajícím horninovým typem vrtného jádra B8 jsou amfibolitické migmatitizované ruly (šikmá foliace k ose vrtu).

Vzorky z jádra B8 vykazují vyšší hodnoty pórovitosti, také hodnoty difúzních koeficientů jak pro tritium, tak pro aniontové stopovače jsou vyšší. Poměr efektivních difúzních koeficientů aniontu a tritia (aniont/³H) je nízký, což ukazuje na vliv aniontové exkluze.

Vrtné jádro B9

Tab. 50 Vyhodnocení efektivních difúzních koeficientů pro vzorky z jádra B9

Označení vzorku	ε (%)	D_e ³ H $10^{-13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	D_e ³⁶ Cl $10^{-14} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	D_e ¹²⁵ I $10^{-14} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	Poměr D_e aniont/ ³ H	Vyhodnocení
--------------------	----------------------	---	---	---	---------------------------------------	-------------

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov				Evidenční označení:	
					ZZ 191/2017	

B9/1_2_1	0,21	0,9		0,6	0,07	<i>time-lag</i>
B9/1_2_2	0,21	1,9	3,7		0,20	<i>time-lag</i>

Převládajícím horninovým typem vrtného jádra B9 jsou migmatitizované ruly (šikmá foliace k ose vrtu).

Pro vzorek B9/1_2_1 lze říci, že hodnota difúzního koeficientu pro ^3H je nižší než průměr pro bukovské vzorky. Naopak hodnota difúzního koeficientu pro ^3H pro vzorek B9/1_2_2 je nepatrně vyšší než průměrná hodnota. Poměr efektivních difúzních koeficientů aniontu a tritia (aniont/ ^3H) je nízký, což ukazuje na vliv aniontové exkluze.

Vrtné jádro B10

Tab. 51 Vyhodnocení efektivních difúzních koeficientů pro vzorky z jádra B10

Označení vzorku	ε (%)	$D_e \text{ } ^3\text{H}$ $10^{-13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	$D_e \text{ } ^{36}\text{Cl}$ $10^{-14} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	$D_e \text{ } ^{125}\text{I}$ $10^{-14} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	Poměr D_e aniont/ ^3H	Vyhodnocení
B10/2_3_1	0,26	1,2		N.D.		<i>time-lag</i>
B10/2_3_2	0,26	1,2	0,3		0,03	<i>time-lag</i>

N.D.) nebyl zaznamenán měřitelný průnik ($D_e < 1 \times 10^{-15}$)

Převládajícím horninovým typ vrtného jádra B10 jsou amfibolity (šikmá foliace k ose vrtu).

Vzorky z jádra B10 vykazují velmi nízké hodnoty difuzivity. Difúzní koeficient pro ^{36}Cl u vzorku B10/2_3_2 je vzhledem k velmi malému množství stopovače, který prodifundoval do cílového rezervoáru, a tím i velké nejistotě stanovení, pouze orientační. Nízká hodnota efektivního difúzního koeficientu pro aniont ukazuje na výrazný vliv aniontové exkluze pro chloridový aniont.

Vrtná jádra S-3 a S-4

Tab. 52 Vyhodnocení efektivních difúzních koeficientů pro vzorky z jádra S-3 a S-4

Označení vzorku	ε (%)	$D_e \text{ } ^3\text{H}$ $10^{-13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	$D_e \text{ } ^{36}\text{Cl}$ $10^{-14} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	$D_e \text{ } ^{125}\text{I}$ $10^{-14} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	Poměr D_e aniont/ ^3H	Vyhodnocení
S3-1/1	0,29	2,1	7,9		0,38	<i>time-lag</i>
S3-3/2	0,26	1,6	3,7		0,23	<i>time-lag</i>
S3-4/2	0,33	3,0	8,2		0,27	<i>time-lag</i>
S4-2/3	0,14	3,0	10,6		0,35	<i>time-lag</i>
S4-3/2	0,23	1,6	2,9		0,18	<i>time-lag</i>
S4-4/2	0,45	2,9	7,5		0,26	<i>time-lag</i>

Vzorky z vrtných jader S-3 a S-4 jsou různého horninového typu (Tab. 39)

Difúzní experimenty byly provedeny pouze s tritiem a chloridovým aniontem. Difuzivita vzorků S je v porovnání se vzorky z vrtů B mírně nadprůměrná.

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

Souhrn výsledků průnikových experimentů a vztah k orientaci magnetické stavby (AMS)

V následující tabulce jsou shrnuty efektivní difúzní koeficienty všech vzorků vypočtené metodou *time-lag* (analytické řešení difúzní rovnice), spolu s definicí horninového typu a orientace magnetické susceptibility na základě výsledků měření AMS.

Tab. 53 Souhrn efektivních difúzních koeficientů na všech testovaných vzorcích

Označení vzorku	ε (%)	$D_e \text{ } ^3\text{H}$ 10^{-13} $\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$	D_e ^{36}Cl 10^{-14} $\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$	D_e ^{125}I 10^{-14} $\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$	Poměr D_e (aniont/ ^3H)	Horninový typ	Orientace magnetické stavby (AMS) k os vrtu Zjednodušeno
B1/3_B	0,28	3,1	13,3		0,43	RUL	kolmá
B1/4_A	0,29	1,4		2,3	0,16	RUL	kolmá
B1/4_B	0,29	1,5	3,9		0,27	RUL	
B2/1_A	0,44	1,7	1,4		0,08	AMF	palelní
B2/3_B	0,19	1,4	2,2		0,16	AMF	palelní
B2/6_A	0,20	1,4		2,0	0,14	AMF	palelní
B2/6_B	0,15	1,2	1,0		0,09	AMF	palelní
B3/1_A	0,36	6,9		11,7	0,17	MGM	šikmá
B3/1_B	0,40	8,6		28	0,32	MGM	šikmá
B3/3_B	0,19	2,7	5,8		0,21	MGM	šikmá
B3/5_A	0,25	5,3	16,3		0,31	MGM	šikmá
B4/2_A	0,22	2,2		5,4	0,24	MGM	šikmá
B4/2_B	0,20	3,1	9,1		0,29	MGM	šikmá
B5/1_2A	0,32	1,7		0,9	0,05	RUL	šikmá
B5/1_2B	0,27	1,7	2,8		0,17	RUL	šikmá
B6/1_3A	0,43	1,7		11,8	0,69	RUL_MGM	kolmá
B6/1_3B	0,38	2,6	7,1		0,27	RUL_MGM	kolmá
B7/1_2A	0,27	1,5		2,0	0,13	RUL	kolmá
B7/1_2B	0,29	1,5	1,6		0,11	RUL	kolmá
B8/1_5_1	0,31	2,5		5,6	0,22	RUL_AMF_MGM	šikmá
B8/1_5_3	0,41	3,0	6,8		0,23	RUL_AMF_MGM	šikmá
B9/1_2_1	0,21	0,9		0,6	0,07	RUL_MGM	šikmá

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov				Evidenční označení:	
					ZZ 191/2017	

B9/1_2_2	0,21	1,9	3,7		0,20	RUL_MGM	šikmá
B10/2_3_1	0,26	1,2		N.D.		AMF	šikmá
B10/2_3_2	0,26	1,2	0,3		0,03	AMF	šikmá
S3-1/1	0,29	2,1	7,9		0,38	RUL_AMF	
S3-3/2	0,26	1,6	3,7		0,23	AMF	
S3-4/2	0,33	3,0	8,2		0,27	RUL_BIOT	
S4-2/3	0,14	3,0	10,6		0,35	MGM	
S4-3/2	0,23	1,6	2,9		0,18	RUL_AMF	
S4-4/2	0,45	2,9	7,5		0,26	AMF	
2S3	0,49	m	m				
2S3	0,48	m	m				

m) probíhající experiment se vzorkem – pro vyhodnocení D_e není dostupné dostatečné množství dat

V Tab. jsou porovnány efektivní difúzní koeficienty vzorků na základě převládajícího horninového typu. Vzhledem k variabilnímu složení horniny bylo zjednodušené označení převzato z Verner a Bukovská et al. (2015). Podrobnější charakteristika vzorků byla následně provedena po petrologickém studiu výbrusů vybraných vzorků B1 až B10 (D. Buriánek, Příloha 14).

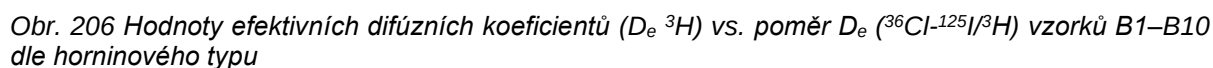
Hodnoty včetně porušených vzorků jsou uvedeny v závorkách. Z výsledků lze konstatovat, že nejvyšší hodnoty byly zjištěny pro migmatity, naopak nejnižší hodnoty D_e byly vyhodnoceny pro amfibolity. Nejvyšší hodnoty difúzních koeficientů byly naměřeny u vzorků migmatitů (B3/1A, B3/1B, B3/5A a B1/3B) s patrnou nehomogenitou (uzavřenou puklinou), která zvyšuje difúzní koeficienty cca 3–4× a vybočuje tak z trendů hodnot. Pro vyhodnocení difúzních koeficientů horninových typů byly vzorky s patrnou puklinou vyloučeny (Obr. 205). Výraznější rozdíly v difuzivitě jsou patrné na difúzi chloridového aniontu (^{36}Cl) než u tritia.

Tab. 60 Porovnání průměrných hodnot efektivních difúzních koeficientů vzorků z lokality Bukov podle horninového typu

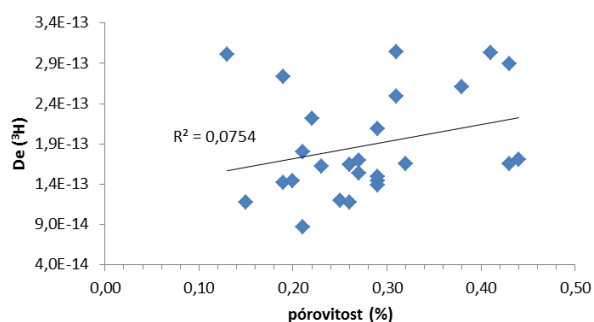
Horninový typ	$D_e \text{ } ^3\text{H}$ $10^{-13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	$D_e \text{ } ^{36}\text{Cl}$ $10^{-14} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	$D_e \text{ } ^{125}\text{I}$ $10^{-14} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	Poměr D_e $^{36}\text{Cl}/^3\text{H}$
migmatit	2,8 (4,6)	8,5 (10,5)	5,4 (8,6)	0,28 (0,26)
amfibolitická rula	2,5	7,3	5,6	0,25
migmatitizovaná rula	1,7	5,3	11,8	0,39
rula	1,5 (1,8)	2,8 (5,4)	1,7	0,15 (0,19)
amfibolit	1,4	1,2	2,0	0,10



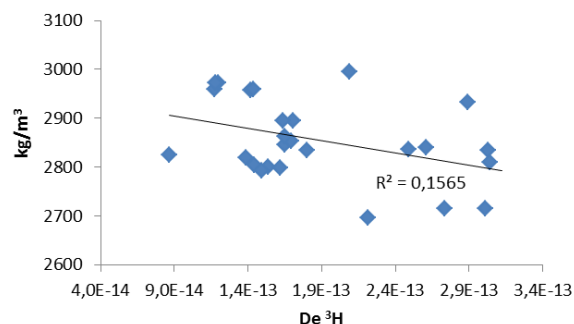
Biotitické migmatity mají vyvinutou foliaci, která je definována orientací lupínků biotitu. Biotit je soustředěn v melanosomu, který tvoří neprůběžné a zvrásněné pásy o mocnosti několika mm (Příloha 14). Obsah biotitu a jeho uspořádání tak může ovlivnit charakter pórové sítě.



U studovaných vzorků PVP Bukov nebyla zjištěna závislost difúzních koeficientů ^3H na pórovitosti a hustotě vzorků (Obr. 207 a Obr. 208).



Obr. 207 Vliv závislosti D_e (^3H) na pórovitosti vzorků PVP Bukov



Obr. 208 Vliv závislosti D_e (^3H) na hustotě vzorků PVP Bukov

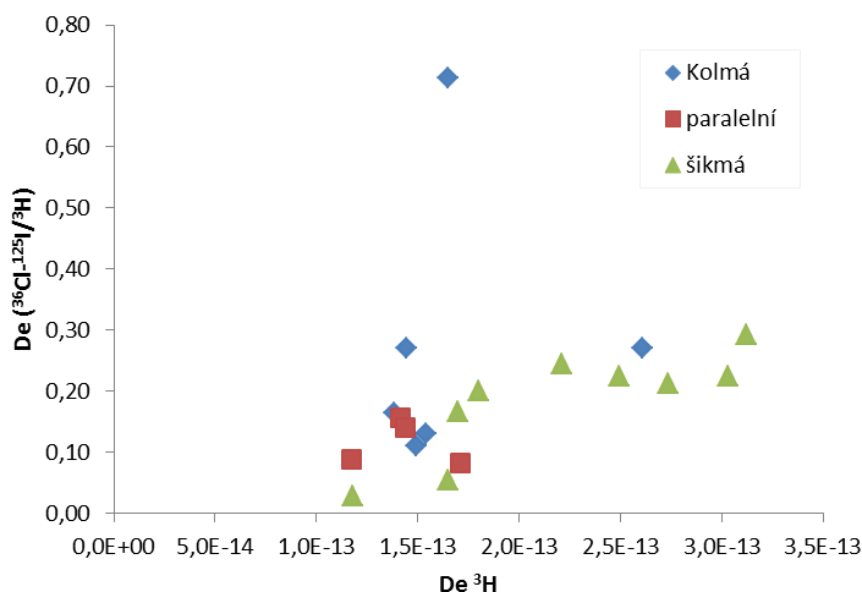
V Tab. jsou porovnány efektivní difúzní koeficienty vzorků na základě usměrnění magnetické susceptibility (zjednodušeně uvedeno: kolmo ke vzorku, šikmo, paralelně na základě výsledků stanovení AMS) - viz Tab. 56.

Ze souboru dat byly vyloučeny vzorky obsahující puklinu. Hodnoty porušených vzorků jsou uvedeny v závorkách. Rozdíly v difúzních koeficientech jsou velmi malé a z výsledků nelze usuzovat na výrazný trend v hodnotách D_e v závislosti na usměrnění vzorku. Jelikož usměrnění (zjednodušeně uvedeno: kolmo ke vzorku, šikmo, paralelně) bylo zjištěno pro různé horninové typy, je při hodnocení vlivu orientace magnetické susceptibility na difúzi těžké odlišit vliv typu horniny od vlivu samotného usměrnění (orientace). Vliv samotné orientace foliace je tak potlačen horninovým typem, který má převládající vliv na hodnoty difúzních koeficientů (Obr. 209).

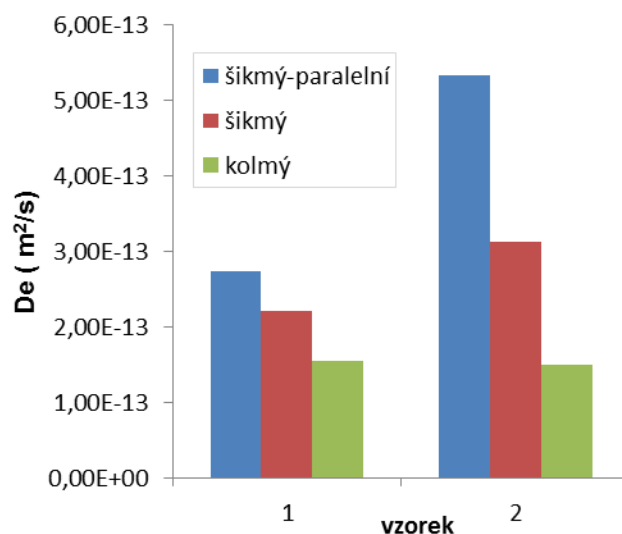
Pro zhodnocení vlivu usměrnění magnetické foliace na stejném typu hornin, byly vybrány vzorky horniny biotitických migmatitů (B3, B4, B7). Pouze u těchto vybraných vzorků bylo možné získat vzorky s rozdílnou orientací (kolmá, šikmá, paralelní) pro stejný typ horniny. Bohužel tento výběr zahrnoval pouze 8 vzorků, z čehož byly vyřazeny vzorky B3/1 obsahující puklinu. Z výsledků je možné pozorovat určitý trend nižších difuzivit (průměr D_e pro ^3H je $1,5 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) u vzorků B7 s kolmou magnetickou foliací než u vzorků B4 (D_e pro ^3H je $2,7 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$; šikmá orientace) a nejvyšší difuzivita u vzorků B3 (D_e pro ^3H je $5,9 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$; šikmá až paralelní orientace - viz Obr. 210). Pro reprezentativní zhodnocení je však takto malý soubor dat nedostatečný a není možné tento trend generalizovat.

Tab. 61 Porovnání průměrných hodnot efektivních difúzních koeficientů vzorků z lokality Bukov podle usměrnění k ose vrtu

Orientace	D_e ^3H	D_e ^{36}Cl	D_e ^{125}I	Poměr D_e $^{36}\text{Cl}/^3\text{H}$
	$10^{-13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	$10^{-14} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	$10^{-14} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	
paralelní	1,4	1,5	2,0	0,12
šikmá	2,0 (3,0)	4,8 (6,4)	4,0 (5,9)	0,18 (0,19)
kolmá	1,7 (1,9)	4,2 (7,3)	4,5	0,14 (18)



Obr. 209 Hodnoty efektivních difúzních koeficientů ($D_e \text{ } ^3\text{H}$) vs. poměr $D_e (^{36}\text{Cl}-^{125}\text{I}/^3\text{H})$ vzorků PB1–B10 v závislosti na orientaci magnetické foliace



Obr. 210 Hodnoty efektivních difúzních koeficientů ($D_e \text{ } ^3\text{H}$) vzorků B3, B4, B7 (biotitický migmatit) v závislosti na orientaci magnetické foliace (2 vzorky se stejnou orientací foliace vůči vzorku)

Vztah k ostatním potencionálním lokalitám pro umístění HÚ

V Tab. jsou statisticky vyhodnoceny efektivní difúzní koeficienty D_e získané na vzorcích z PVP Bukov. Ze souboru dat byly vyloučeny vzorky, které obsahovaly viditelnou puklinu. Hodnoty včetně těchto vzorků jsou uvedeny v závorkách. Minimální hodnoty D_e ($< 10^{-14} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) jsou zatíženy velkou chybou stanovení aktivity kvůli velmi nízkému průniku stopovače do cílového rezervoáru.

Tab. 62 Statistické vyhodnocení souboru dat pórovitostí a efektivních difúzních koeficientů na vzorcích z PVP Bukov

Bukov	ϵ	$D_e \text{ } ^3\text{H}$	$D_e \text{ } ^{36}\text{Cl}$	$D_e \text{ } ^{125}\text{I}$
-------	------------	---------------------------	-------------------------------	-------------------------------

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

	(%)	$10^{-13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	$10^{-14} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	$10^{-14} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$
min	0,14	0,9	0,3	0,9
max	0,45	3,1 (8,6)	10,6 (16,3)	11,8
průměr	0,28	1,9 (2,5)	4,8 (5,8)	4,3
medián	0,27	1,7 (1,7)	3,8 (4,9)	2,3
SD	0,08	0,7 (1,7)	3,1 (4,3)	3,8
počet	31	27 (31)	18 (20)	7

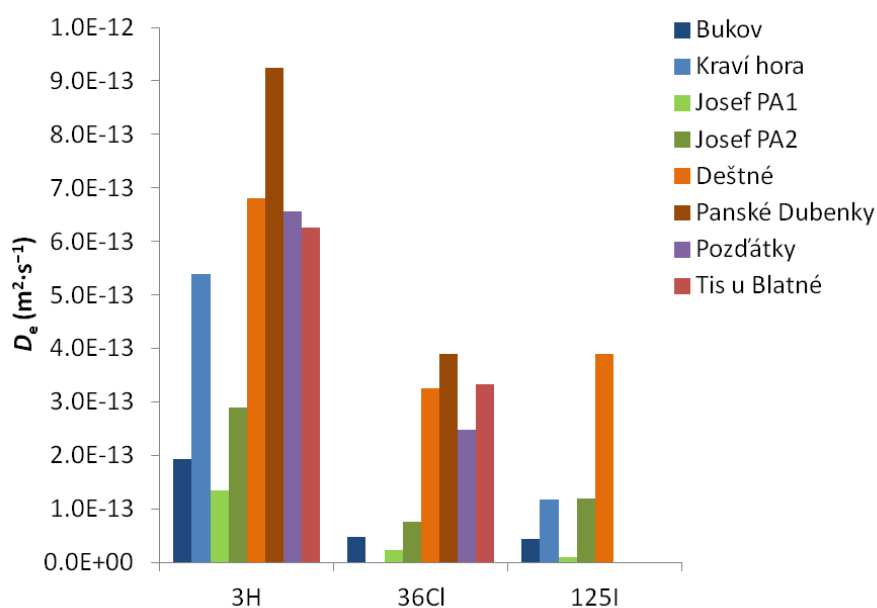
Nebyl pozorován významný vliv přítomnosti pukliny ve vzorku na velikost porozity stanovené metodou osychání. Vzorky obsahující pukliny vykazovaly systematicky vyšší hodnoty D_e , nejednalo se ale o řádově rozdílné hodnoty (maximálně 4–5 násobek průměrné hodnoty).

Tab. 54 porovnává průměrné hodnoty efektivních difúzních koeficientů z různých lokalit. Z porovnání vyplývá, že difuzivita hornin PVP Bukov je srovnatelná se vzorky z podzemní laboratoře Josef (Havlová et al., 2017). Obě tyto skupiny vzorků pak vykazují nižší hodnoty D_e , než u zbývajících lokalit, přičemž výraznější rozdíly lze pozorovat u difúze aniontů. Grafické porovnání hodnot difúzních koeficientů je znázorněno na Obr. 211.

Tab. 54 Porovnání průměrných hodnot efektivních difúzních koeficientů vzorků z různých lokalit

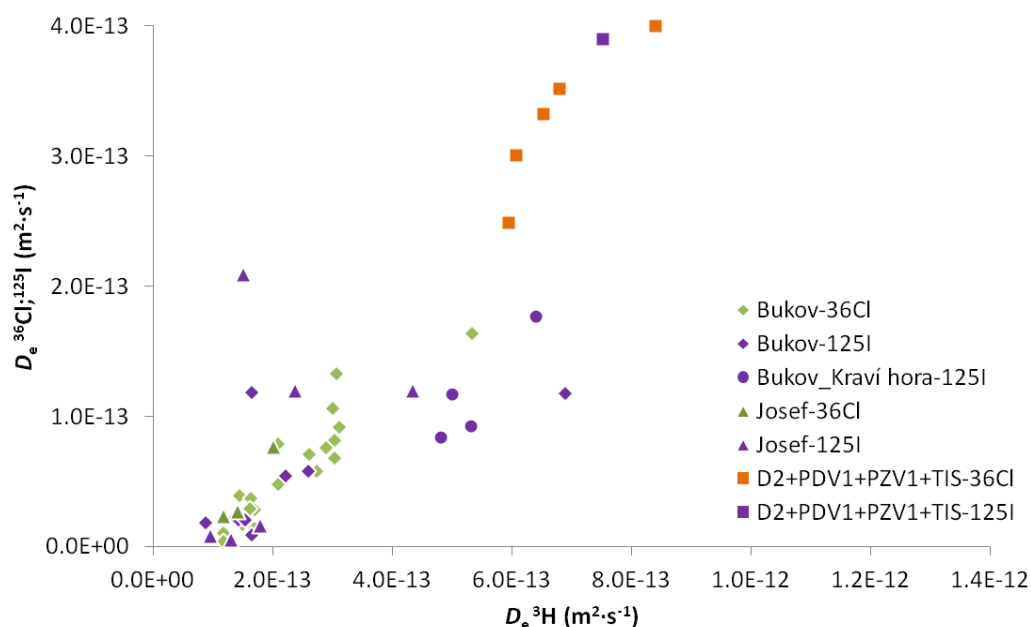
Lokalita	ε (%)	$D_e \text{ } ^3\text{H}$ $10^{-13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	$D_e \text{ } ^{36}\text{Cl}$ $10^{-14} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	$D_e \text{ } ^{125}\text{I}$ $10^{-14} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$
Bukov (B1–10, S3, S4)	0,28	1,9	4,8	4,3
Bukov – přípovrchové vzorky	0,34	5,4	–	11,7
Josef PA1	0,22	1,3	2,2	1,0
Josef PA2	0,57	2,9	7,6	1,2
Čihadlo (D2)	0,59	6,8	32,6	39,0
Hrádek (PDV1)	0,41	9,2	39,0	–
Horka (PZV1)	0,36	6,6	24,9	–
Čertovka (TIS)	0,26	6,3	33,2	–

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017



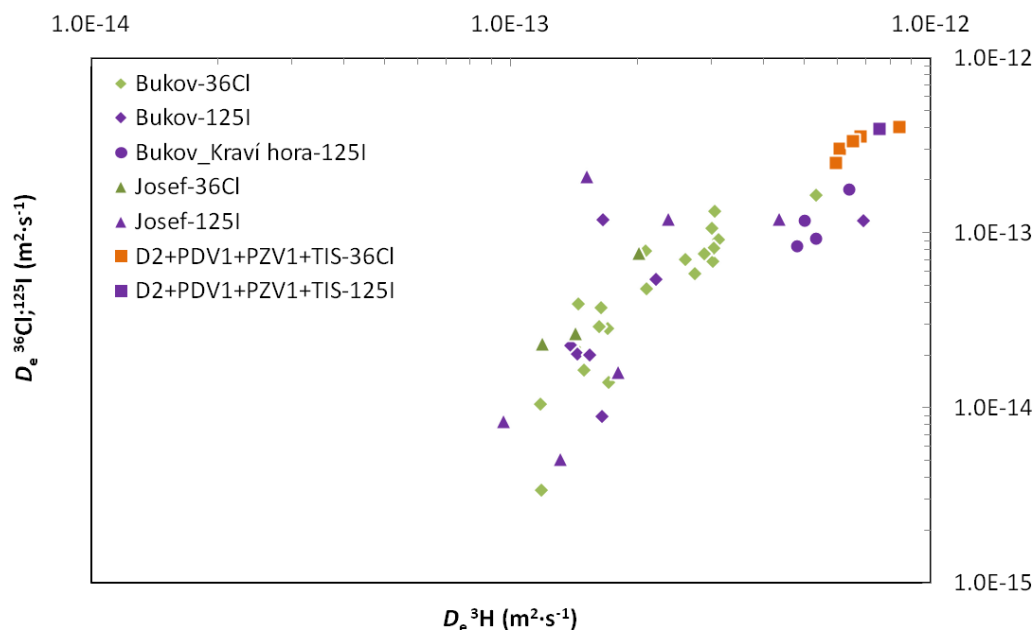
Obr. 211 Grafické porovnání průměrných hodnot efektivních difúzních koeficientů pro ^3H , ^{36}Cl a ^{125}I na vzorcích z jednotlivých lokalit

V grafu na Obr. 212 jsou shrnuty všechny efektivní difúzní koeficienty tak, že na ose x jsou vyneseny hodnoty D_e pro tritium a na ose y jsou potom vyneseny odpovídající hodnoty D_e pro aniont (^{36}Cl nebo ^{125}I). V grafu jsou zobrazeny i hodnoty efektivních difúzních koeficientů na vzorcích z jiných lokalit. Z porovnání je patrné, že s výjimkou vzorků obsahujících puklinu, dosahují vzorky z PVP Bukov (společně se vzorky z podzemní laboratoře Josef; Havlová et al. 2017) nejnižších hodnot. Pro zřetelnější zobrazení bodů s nízkými D_e je uveden stejný graf, ale s použitím logaritmického měřítka na osách (Obr. 213).



Obr. 212 Graf zobrazující hodnoty D_e pro aniont v závislosti na hodnotě D_e pro ^3H

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017



Obr. 213 Graf zobrazující hodnoty D_e pro aniont v závislosti na hodnotě D_e pro ^3H – logaritmické měřítko os

Ačkoli jednotlivé vzorky z PVP Bukov jsou značně rozdílné, co se týká horninového složení a usměrnění, rozdíly maximálních a minimálních hodnot efektivních difúzních koeficientů nejsou především pro experimenty s tritiem výrazné. Větší vliv horninového typu na difuzivitu lze pozorovat při difúzi aniontů - ^{36}Cl a ^{125}I výrazně pomaleji difundují v horninách metamorfovaných (PVP Bukov) a v horninách z podzemní laboratoře Josef (Havlová et al. 2017; viz Obr. 213). Při porovnání s výsledky difúzních experimentů na vzorcích z jiných lokalit (viz např. Tab. 54, Obr. 211, Obr. 212) je zřejmé, že vzorky z lokality Bukov obecně vykazují zřetelně nižší difuzivitu (porovnatelnou pouze s částí vzorku z podzemní laboratoře Josef, Havlová et al. 2017) pro ^{36}Cl a ^{125}I než ostatní vzorky.

Shrnutí

- Přestože byly z oblasti PVP Bukov studovány vzorky různých horninových typů a s různým usměrněním magnetické foliace, naměřené hodnoty efektivních difúzních koeficientů ^3H spadají do poměrně úzkého rozmezí ($0,9 \cdot 10^{-13}$ – $3,1 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$), přičemž vzorky různých horninových typů nejsou výrazně odlišné.
- Vyšší hodnoty difúzních koeficientů byly zjištěny u vzorků s patrnou nehomogenitou (uzavřená puklina), kdy hodnoty D_e byly cca 4 krát vyšší oproti vzorkům zdravé horniny. Hodnoty difúzních koeficientů ^3H u vzorků s puklinou se pohybovaly od 3×10^{-13} do $8,6 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.
- Výraznější rozdíly v difuzivitě než u tritia jsou patrné na difúzi aniontu (^{36}Cl a ^{125}I). To ukazuje na různou míru vlivu aniontové exkluze jednotlivých horninových typů.
- Nejodlehlejší hodnoty v difúzních parametrech byly sledovány u vzorků amfibolitů, především pak pro anionty (^{36}Cl , ^{125}I), kdy byly hodnoty D_e nižší než u ostatních typů hornin.

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

- Změny difúzních parametrů mezi horninovými vzorky jsou zřejmě více závislé na mineralogickém složení a stupni následné přeměny než na vnitřní struktuře. Difúze je pravděpodobně ovlivněna sekundárními produkty přeměn horninových minerálů (např. nahrazení biotitu chloritem v amfibolitech, seritizace živců) a možnou výplní pórů těmito minerály.
- Nebyl prokázán výrazný vliv usměrnění magnetické foliace na difúzní koeficienty, případně byl potlačen dominujícím vlivem horninového typu.
- V porovnání s ostatními lokalitami (s výjimkou části vzorků z podzemní laboratoře Josef) vzorky z PVP Bukov vykazují výrazně nižší difuzivitu jak pro ^3H , tak pro anionty ^{36}Cl a ^{125}I .

Sorpční experimenty

Příprava vzorků pro sorpční experimenty

Pro statické sorpční experimenty byly použity horninové vzorky z PVP Bukov. Horninová jádra byla nadrcena na pět zrnitostních frakcí, vybrané frakce C (0,63–0,125 mm) a D (0,8–0,63 mm) byly promyty syntetickou granitickou vodou SGW2 a vysušeny na vzduchu. Popis a mineralogické složení použitých vzorků jsou uvedeny v Tab. 55, složení SGW2 je uvedeno v Tab. 56.

Tab. 55 Popis použitých horninových vzorků z PVP Bukov

Horninový vzorek	metráž jádra (m)	Charakterizace	Oblast na lokalitě
S3-3	81,63–81,98	migmatizovaný amfibolický amfibolit	BZ-XIIJ
S3-4	86,70–87,00	páskovaná amfibolická rula s biotitem	BZ-XIIJ
S4-3	25,00–25,28	amfibolická rula, rekrystalovaná	BZ-XIIJ
2S4-2	10,50–10,67	migmatit, leukosom	BZ-XIIJ
2S4-4	36,16–36,39	amfibolit	BZ-XIIJ

Tab. 56 Chemické složení a pH syntetické granitické vody SGW2

Složka	SGW2 (mg l ⁻¹)
Na ⁺	16,5
K ⁺	2,14
Ca ²⁺	37,3
Mg ²⁺	8,32
Cl ⁻	3,49
SO ₄ ²⁻	21,9
HCO ₃ ⁻	168,7
pH	8,2

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

Na horninových vzorcích z PVP Bukov byla studována sorpce následujících radionuklidů:

- $^{137}\text{CsCl}$ ($c = 2 \cdot 10^{-5} \text{ mol l}^{-1}$, $A = 0,8 \text{ kBq ml}^{-1}$)
- $^{85}\text{SrCl}_2$ ($c = 2 \cdot 10^{-5} \text{ mol l}^{-1}$, $A = 0,8 \text{ kBq ml}^{-1}$)
- Na_2SeO_3 ($c = 2 \cdot 10^{-5} \text{ mol l}^{-1}$)
- $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ ($c = 2,6 \cdot 10^{-4} \text{ mol l}^{-1}$)

Cesium se řadí mezi kritické radionuklidy vyskytující se výhradně jako kation Cs^+ , v roztoku nevytváří komplexy. K jeho sorpci na hydroxylové skupiny minerálů nedochází vlivem velké velikosti a nízkému náboji Cs^+ , naproti tomu vysoce efektivní je jeho sorpce na slídové minerály iontovou výměnou (Söderlund et al. 2014).

Stroncium patří mezi zástupce kationových slabě se sorbujících kritických radionuklidů. Vyskytuje se ve formě Sr^{2+} , při $\text{pH} > 9$ nebo v přítomnosti karbonátů tvoří karbonátové a hydroxokomplexy. Hlavním sorpčním mechanismem v horninovém prostředí je iontová výměna, při které je sorpce kontrolována zejména hodnotami CEC a pH (Carbol a Engkvist 1997).

Selen je zástupcem redox-senzitivních aniontových kritických radionuklidů. Vyznačuje se komplikovanou chemií, v oxidačních podmínkách se vyskytuje jako seleničitan (SeO_3^{2-}) a selenan (SeO_4^{2-}), v mírně redukčních podmínkách jako elementární Se a v redukčních podmínkách je dominantní specií selenid (Se^{2-}). Pro experimenty byl zvolen selen ve formě SeO_3^{2-} , u kterého může docházet za určitých podmínek k sorpci na horninový materiál. SeO_4^{2-} se naproti tomu v prostředí krystalických hornin chová jako nesorbující se radionuklid.

Uran patří mezi redox-senzitivní kritické radionuklidy a v geosféře se vyskytuje ve formě U(IV) a U(VI) . Jeho sorpce na horniny závisí na pH systému, při nízkém pH jsou uranylové ionty (UO_2^{2+}) sorbovány kationovou výměnou, s rostoucím pH klesá sorpce uranylu jakožto důsledek tvorby nesorbujících se U(VI) -karbonátových komplexů (Hakanen et al. 2014).

Výsledky sorpčních experimentů

Cesium

Výsledné hodnoty K_d cesia na vzorcích z PVP Bukov jsou uvedeny na Obr. 214. V případě frakce C byly výsledné hodnoty K_d na všech horninových vzorcích PVP Bukov obdobné a pohybovaly se mezi 30–40 ml g^{-1} , viz

Tab. 57. Výjimku tvořil amfibolit 2S4-4, jehož K_d byl 9 ml g^{-1} . Zcela odlišná situace byla pozorována u frakcí D studovaných horninových vzorků (viz Tab. 58). Nejvyšší hodnoty K_d bylo dosaženo na migmatitu 2S4-2, a to 110 ml g^{-1} . K_d cesia na ostatních materiálech byly podobné (70–80 ml g^{-1}) opět s výjimkou amfibolitu 2S4-4 (8 ml g^{-1}). Z uvedených výsledků je patrný zajímavý trend. U všech vzorků z PVP Bukov s výjimkou 2S4-4, na němž byla pozorována nejnižší sorpce, byly získány vyšší, cca dvojnásobné, hodnoty K_d na frakcích D studovaných hornin. Tento výsledek tedy nepotvrdil prvotní předpoklad vyšší sorpce na frakci C, jakožto důsledek většího sorpčního povrchu. Během celého experimentu bylo u všech horninových vzorků sledováno pH a E_h kapalně fáze, přičemž nebyly pozorovány výrazné změny v měřených hodnotách, ve všech případech bylo naměřeno $\text{pH} \sim 8,4$ a E_h v rozmezí 380–412 mV.

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

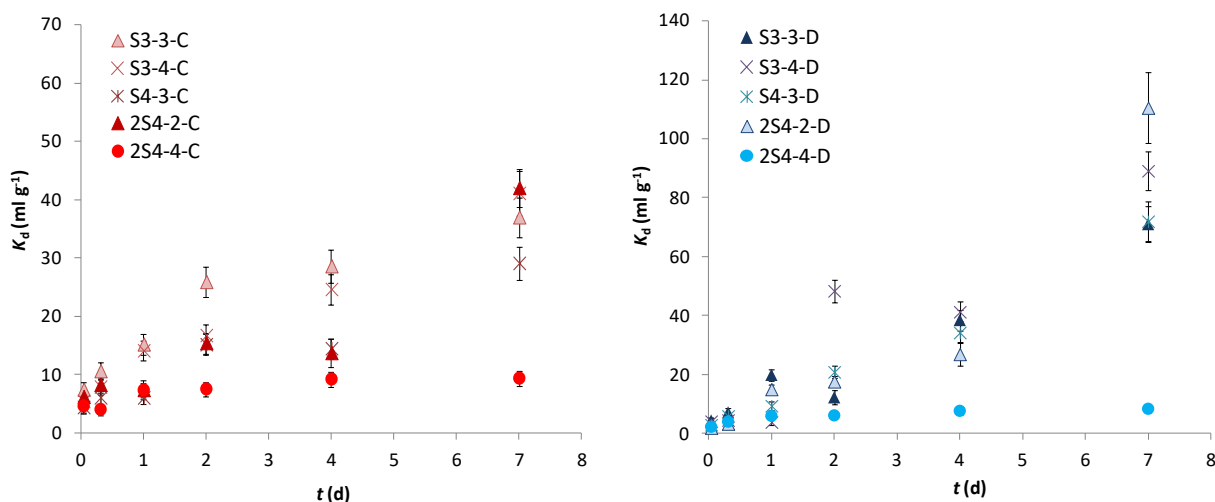
Tab. 57 Hodnoty K_d cesia včetně jejich rozšířených standardních nejistot na frakcích C horninových vzorků z PVP Bukov, $c(\text{Cs}) = 2 \cdot 10^{-5} \text{ mol l}^{-1}$

t (dny)	S3-3-C	S3-4-C	S4-3-C	2S4-2-C	2S4-4-C
0,04	$7,4 \pm 1,2$	$5,4 \pm 1,1$	$4,4 \pm 1,0$	$6,2 \pm 1,2$	$4,6 \pm 1,1$
0,31	$10,6 \pm 1,4$	$7,9 \pm 1,3$	$6,0 \pm 1,1$	$8,3 \pm 1,3$	$4,0 \pm 1,0$
1	$15,2 \pm 1,8$	$14,1 \pm 1,7$	$6,0 \pm 1,1$	$7,4 \pm 1,6$	$7,3 \pm 1,2$
2	$25,9 \pm 2,6$	$16,7 \pm 1,9$	$15,2 \pm 1,8$	$15,4 \pm 1,8$	$7,5 \pm 1,2$
4	$28,6 \pm 2,8$	$24,6 \pm 2,6$	$14,5 \pm 1,7$	$13,7 \pm 2,4$	$9,2 \pm 1,4$
7	$37,0 \pm 3,4$	$41,1 \pm 3,9$	$29,1 \pm 2,9$	$42,0 \pm 3,2$	$9,3 \pm 1,4$

Tab. 58 Hodnoty K_d cesia včetně jejich rozšířených standardních nejistot na frakcích D horninových vzorků z PVP Bukov, $c(\text{Cs}) = 2 \cdot 10^{-5} \text{ mol l}^{-1}$

t (dny)	S3-3-D	S3-4-D	S4-3-D	2S4-2-D	2S4-4-D
0,04	$4,4 \pm 1,0$	$4,1 \pm 1,0$	$3,0 \pm 1,0$	$1,9 \pm 0,9$	$2,3 \pm 0,9$
0,31	$7,2 \pm 1,4$	$4,5 \pm 1,0$	$5,9 \pm 1,1$	$3,3 \pm 1,0$	$4,0 \pm 1,0$
1	$19,9 \pm 1,9$	$3,9 \pm 1,2$	$9,4 \pm 1,4$	$15,0 \pm 1,6$	$6,0 \pm 1,1$
2	$12,3 \pm 2,4$	$48,4 \pm 3,8$	$20,9 \pm 2,0$	$17,6 \pm 1,7$	$6,2 \pm 1,1$
4	$38,5 \pm 3,6$	$41,3 \pm 3,3$	$34,2 \pm 3,3$	$26,9 \pm 3,8$	$7,7 \pm 1,2$
7	$71,0 \pm 6,2$	$89,1 \pm 6,5$	$72,0 \pm 6,7$	$110,5 \pm 12,0$	$8,4 \pm 1,3$

Z hlediska mineralogického složení horninových vzorků lze říci, že nejvyšších hodnot K_d bylo dosaženo na materiálu 2S4-2, který obsahoval 11 % biotitu, což je nejvyšší obsah slídových minerálů ze všech materiálů PVP Bukov. Vysokých hodnot K_d bylo ovšem dosaženo i na těch horninových vzorcích, které obsahovaly cca poloviční obsah slíd (S3-3, S3-4, S4-3). Tyto vzorky však ve svojí struktuře obsahovaly okolo 20 % hornblendu ze skupiny Ca-amfibolů. Nejnižší sorpce cesia byla pozorována na amfibolitu 2S4-4, který obsahoval slídu pod limitem detekce a 50 % magneziohornblendu. Vzhledem k tomu, že vysokých hodnot K_d bylo dosaženo na materiálu 2S4-2, který neobsahoval amfibol, je patrné, že dominantním sorbentem cesia je slída, i když, jak je vidět na dalších vzorcích z PVP Bukov, je nezbytné uvažovat i sorpci na hornblend. V současné době má skupina amfibolů popsáno cca 75 koncových členů s široce rozvinutým izomorfním zastupováním prvků a mnoha přechodnými členy (Chvátal 2005). Bylo by proto vhodné podrobněji popsat amfibolické minerály obsažené ve vzorcích z PVP Bukov a zaměřit se na rozdíly, které mohou vést k pozorované různé sorpci jak cesia, tak obecně radionuklidů.



Obr. 214 Hodnoty K_d cesia a jejich rozšířené standardní nejistoty na horninových vzorcích z PVP Bukov, vlevo: frakce C, vpravo: frakce D, $c(\text{Cs}) = 2 \cdot 10^{-5} \text{ mol l}^{-1}$

Z hodnot výsledných distribučních koeficientů vyplývá, že u studovaných vzorků je cesium sorbováno zejména na horniny (amfibolity, ruly, migmatity) s obsahem slídy a amfibolu. Slídy (biotit, muskovit, annit) patří spolu s illitem, vermikulitem, chloritem a kaolinitem mezi fylosilikáty přítomné v granitických horninách a jsou považovány za velice efektivní sorbenty cesia (Söderlund et al. 2011). Sorpce na ně probíhá iontovou výměnou a je nelineární s existencí více než jednoho typu sorpčních míst. Jedná se o sorpční místa s nízkou kapacitou a vysokou afinitou vůči cesiu, jež jsou přístupné stopovým koncentracím cesia ($c_{\text{Cs}} < 10^{-8} \text{ mol l}^{-1}$) a sorpční místa s nižší afinitou vůči cesiu, ale větší hustotou výskytu (Missana a García-Gutiérrez 2012). Kromě fylosilikátů jsou dalšími významnými sorbenty cesia Ca-amfiboly ze skupiny inosilikátů, které jsou charakteristické svojí vysokou kationovou výměnnou kapacitou a ve formě hornblendu jsou přítomny i ve vzorcích z PVP Bukov (Andersson et al. 1983). Sorpce na hornblend probíhá rovněž mechanismem iontové výměny. Naopak sorpce cesia na tektosilikáty (draselné živce, plagioklasy, křemen), která je realizována pouze na aktivních deprotonovaných centrech na povrchu minerálu, je nízká a výsledné K_d jsou obvykle menší než 1 ml g^{-1} . Souhrnně lze tedy říci, že sorpce cesia na jednotlivé minerály přítomné v krystalických horninách klesá v pořadí muskovit > biotit > hornblend > serpentín > ortoklas > magnetit > hematit > apatit > kalcit = křemen > fluorit, čemuž odpovídají i hodnoty K_d pro jednotlivé minerály (viz Tab. 59), uvedené v Söderlund et al. (2011).

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

Tab. 59 Hodnoty K_d pro Cs na vybraných minerálech (Söderlund et al. 2011)

Minerál	Biotit	Chlorit	Hematit	Hornblend	Křemen	Magnetit	Muskovit	K-živec	Pyrit
K_d (ml g ⁻¹)	624	5	6	213	1	7	765	11	3

Stroncium

Výsledky sorpčních experimentů se stronciem na horninových vzorcích z PVP Bukov jsou shrnuty na Obr. 215. Pro lepší přehlednost nejsou v obrázku zobrazeny nejistoty K_d , které se pohybovaly okolo 1 ml g⁻¹. Výsledné hodnoty K_d jsou o řád nižší než v případě cesia, přičemž pouze nepatrně vyšších hodnot K_d bylo dosaženo na horninových frakcích C všech studovaných materiálů. Hodnoty K_d stroncia na frakce C studovaných vzorků se pohybovaly od 3 do 6 ml g⁻¹ (viz Tab. 60). U frakce D byla nejmenší sorpce pozorována na materiálu 2S4-2 (1 ml g⁻¹), na ostatních vzorcích byla výsledná hodnota v rozmezí 3–5 ml g⁻¹ (Tab.).

Tab. 60 Hodnoty K_d stroncia včetně jejich rozšířených standardních nejistot na frakcích C horninových vzorků z PVP Bukov, $c(\text{Sr}) = 2 \cdot 10^{-5} \text{ mol l}^{-1}$

t (dny)	S3-3-C	S3-4-C	S4-3-C	2S4-2-C	2S4-4-C
0,04	3,2 ± 1,0	2,7 ± 0,9	3,3 ± 1,0	2,7 ± 0,9	2,0 ± 0,9
0,31	4,1 ± 1,0	3,4 ± 1,0	4,0 ± 1,0	3,0 ± 1,0	2,6 ± 0,9
1	4,6 ± 1,1	4,0 ± 1,0	4,5 ± 1,0	3,2 ± 1,0	3,4 ± 1,0
2	4,8 ± 1,1	4,0 ± 1,0	5,3 ± 1,1	3,7 ± 1,0	4,2 ± 1,0
4	5,7 ± 1,1	4,5 ± 1,0	4,8 ± 1,1	3,8 ± 1,0	3,5 ± 1,0
7	5,8 ± 1,1	5,4 ± 1,1	6,7 ± 1,2	4,8 ± 1,1	3,6 ± 1,0

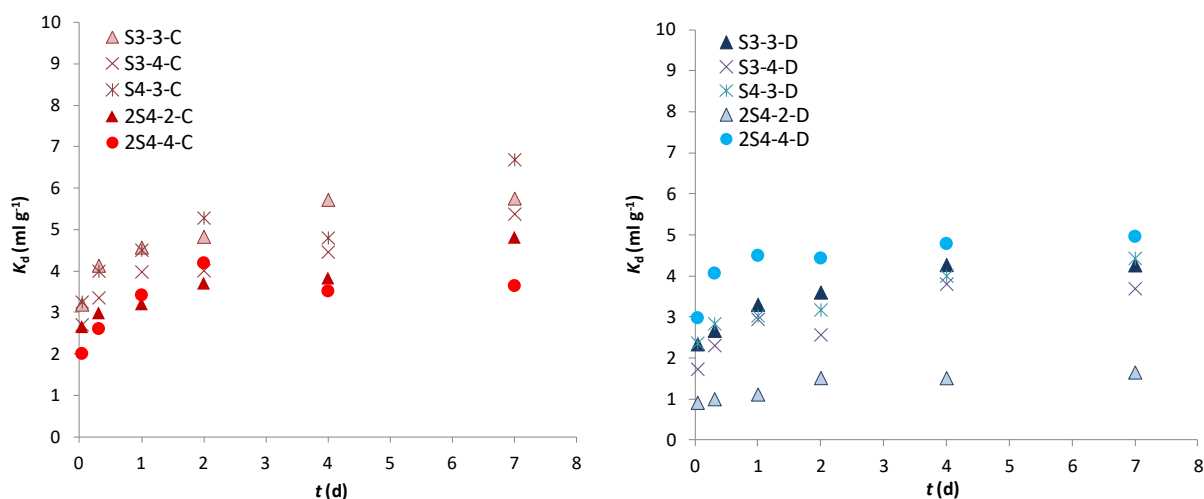
Tab. 70 Hodnoty K_d stroncia včetně jejich rozšířených standardních nejistot na frakcích D horninových vzorků z PVP Bukov, $c(\text{Sr}) = 2 \cdot 10^{-5} \text{ mol l}^{-1}$

t (dny)	S3-3-D	S3-4-D	S4-3-D	2S4-2-D	2S4-4-D
0,04	2,3 ± 0,9	1,7 ± 0,9	2,4 ± 0,9	0,9 ± 0,9	3,0 ± 1,0
0,31	2,7 ± 0,9	2,3 ± 0,9	2,8 ± 1,0	1,0 ± 0,9	4,1 ± 1,0
1	3,3 ± 1,0	2,9 ± 1,0	3,0 ± 1,0	1,1 ± 0,9	4,5 ± 1,0
2	3,6 ± 1,0	2,6 ± 0,9	3,2 ± 1,0	1,5 ± 0,9	4,4 ± 1,0
4	4,3 ± 1,0	3,8 ± 1,0	4,0 ± 1,0	1,5 ± 0,9	4,8 ± 1,1
7	4,3 ± 1,0	3,7 ± 1,0	4,4 ± 1,0	1,6 ± 0,9	5,0 ± 1,1

Z výsledků tedy vyplývá, že menší zrnitostní frakce studovaných hornin vedla k vyšší hodnotě K_d pouze u migmatitu 2S4-2 (4,8 ml g⁻¹ vs. 1,6 ml g⁻¹). U ostatních materiálů byly

hodnoty K_d totožné nebo se od sebe na jednotlivých frakcích lišily o jednotku, což odpovídá rozšířené standardní nejistotě stanovení K_d . Výrazně rozdílné chování jednotlivých vzorků z PVP Bukov vůči stronciu tedy nebylo pozorováno, na zrnitostních frakcích C byly výsledné hodnoty K_d prakticky stejné. U frakcí D byla situace až na materiál 2S4-2 obdobná, hodnoty K_d na jednotlivých materiálech byly se zahrnutím nejistoty stanovení K_d prakticky totožné. Výraznější rozdíl v sorpci na frakce C a D materiálu 2S4-2 lze přisuzovat většímu rozdílu v obsahu slídových minerálů mezi jednotlivými frakcemi, kdy frakce C obsahovala 11 % biotitu a frakce D 8 % biotitu. Tento jediný vzorek neobsahoval amfiboly, z potenciálních sorbentů je v něm přítomna pouze slída. Výsledná hodnota K_d přitom nepatřila mezi nejvyšší, jak to mu bylo např. u cesia, z čehož vyplývá, že slídové minerály nejsou jediné možné sorbenty stroncia ve studovaných horninových vzorcích.

Během všech experimentů byly rovněž sledovány elektrochemické parametry systému, pH bylo v případě všech horninových vzorků 8,2 a $E_n \sim 350$ mV.



Obr. 215 Hodnoty K_d stroncia na horninových vzorcích z PVP Bukov, vlevo: frakce C, vpravo: frakce D, $c(\text{Sr}) = 2 \cdot 10^{-5} \text{ mol l}^{-1}$

V krystalických horninách je stroncium preferenčně sorbováno na hornblend a slídové minerály, naproti tomu křemen a živce jsou charakteristické svým nízkým zachytem stroncia. Hlavním mechanismem sorpce stroncia na krystalické horniny v prostředí podzemní vody je nespecifická reversibilní iontová výměna a intenzita sorpce je dána hodnotou CEC pevné fáze (Crawford et al. 2006). Obecně platí, že hodnoty K_d klesají s rostoucí iontovou silou roztoku a rostou s rostoucím pH. Významnými konkurenčními ionty stroncia při sorpci na horniny jsou kationty Ca^{2+} a Na^+ , jedny z hlavních složek podzemních vod (Hakanen et al. 2014). V porovnání s cesiem se stroncium ukazuje jako slabě se sorbující radionuklid, ovšem jeho sorpce na jednotlivé minerály klesá prakticky ve stejném pořadí jako sorpce cesia, a to v pořadí muskovit > chlorit > biotit > hornblend > hematit > ortoklas > pyrit > magnetit > křemen, viz Tab. .

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

Tab. 71 Hodnoty K_d pro Sr na vybraných minerálech (Andersson et al. 1983)

Minerál	Biotit	Chlorit	Hematit	Hornblend	Křemen	Magnetit	Muskovit	K-živec	Pyrit
K_d (ml g ⁻¹)	24	50	7	18	1	2	114	5	3

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

Selen

Jak již bylo zmíněno výše, selen se jakožto redox-senzitivní prvek vyskytuje v několika oxidačních stavech. Oxoanionty SeO_3^{2-} a SeO_4^{2-} , charakteristické svou mobilitou a vysokou rozpustností, jsou v kontextu hlubinného ukládání významné vzhledem k jejich potenciálnímu výskytu v prostředí úložiště. Experimenty byly zaměřeny, s ohledem na nesorbující se chování selenanu, na seleničitan, jakožto sorbující se specii, jejíž záchyt je ovlivněn vlastnostmi prostředí.

Výsledné hodnoty K_d seleničitanu na horninových vzorcích z PVP Bukov jsou shrnuty na Obr. 216. Pro lepší přehlednost nejsou v obrázku zobrazeny nejistoty K_d , které se pohybovaly okolo 1 ml g^{-1} . Na frakci C se výsledné hodnoty K_d pohybovaly v rozmezí 2,4–4,4 ml g^{-1} , na frakci D byly hodnoty K_d ve všech případech okolo 1 ml g^{-1} , viz Tab. a Tab. 61.

Tab. 72 Hodnoty K_d selenu včetně jejich rozšířených standardních nejistot na frakcích C horninových vzorků z PVP Bukov, $c(\text{Se}) = 2 \cdot 10^{-5} \text{ mol l}^{-1}$

t (dny)	S3-3-C	S3-4-C	S4-3-C	2S4-2-C	2S4-4-C
0,04	$0,8 \pm 0,8$	$0,7 \pm 0,8$	$0,7 \pm 0,8$	$0,8 \pm 0,8$	$0,9 \pm 0,9$
0,31	$1,2 \pm 0,9$	$1,2 \pm 0,9$	$1,0 \pm 0,9$	$1,5 \pm 0,9$	$1,4 \pm 0,9$
1	$1,8 \pm 0,9$	$2,0 \pm 0,9$	$1,7 \pm 0,9$	$2,5 \pm 0,9$	$2,0 \pm 0,9$
2	$2,9 \pm 1,0$	$3,9 \pm 1,0$	$2,2 \pm 0,9$	$2,2 \pm 0,9$	$1,9 \pm 0,9$
4	$2,7 \pm 0,9$	$4,1 \pm 1,0$	$3,6 \pm 1,0$	$2,9 \pm 1,0$	$2,5 \pm 0,9$
7	$3,4 \pm 1,0$	$4,4 \pm 1,3$	$2,4 \pm 0,9$	$4,0 \pm 1,0$	$3,0 \pm 1,0$

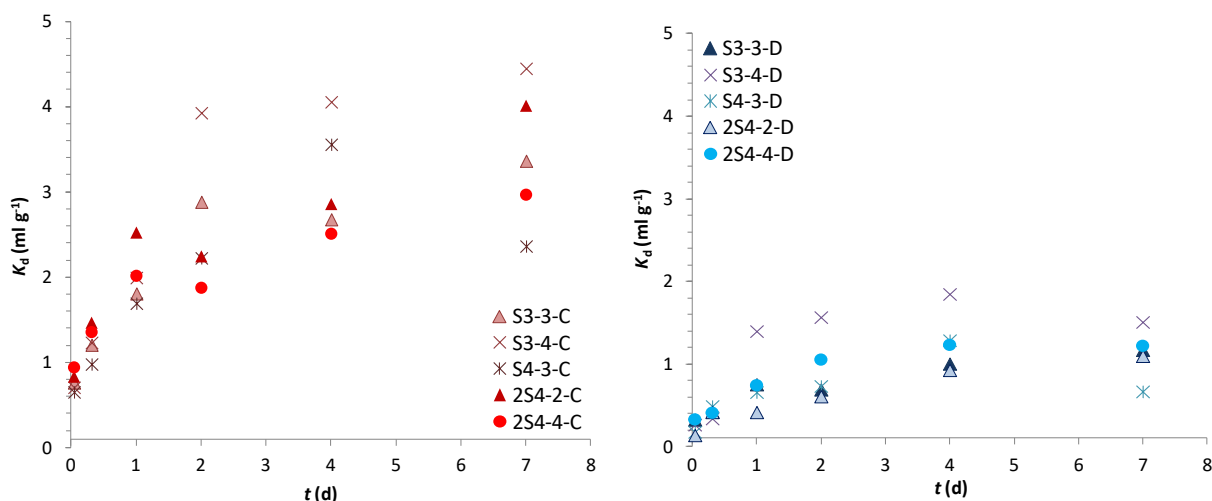
Tab. 61 Hodnoty K_d selenu včetně jejich rozšířených standardních nejistot na frakcích D horninových vzorků z PVP Bukov, $c(\text{Se}) = 2 \cdot 10^{-5} \text{ mol l}^{-1}$

t (dny)	S3-3-D	S3-4-D	S4-3-D	2S4-2-D	2S4-4-D
0,04	$0,3 \pm 0,8$	$0,3 \pm 0,8$	$0,2 \pm 0,8$	$0,1 \pm 0,8$	$0,3 \pm 0,8$
0,31	$0,4 \pm 0,8$	$0,3 \pm 0,8$	$0,5 \pm 0,8$	$0,4 \pm 0,8$	$0,4 \pm 0,8$
1	$0,8 \pm 0,8$	$1,4 \pm 0,9$	$0,7 \pm 0,8$	$0,4 \pm 0,8$	$0,7 \pm 0,8$
2	$0,7 \pm 0,8$	$1,6 \pm 0,9$	$0,7 \pm 0,8$	$0,6 \pm 0,8$	$1,1 \pm 0,9$
4	$1,0 \pm 0,9$	$1,9 \pm 0,9$	$1,3 \pm 0,9$	$0,9 \pm 0,9$	$1,2 \pm 0,9$
7	$1,2 \pm 0,9$	$1,5 \pm 0,9$	$0,7 \pm 0,8$	$1,1 \pm 0,9$	$1,2 \pm 0,9$

Byla pozorována slabá sorpce seleničitanu na studované horninové vzorky, ve srovnání se stronciem přibližně o polovinu nižší. Na rozdíl od cesia a stroncia je ovšem u selenu patrný rozdíl v sorpci na jednotlivé zrnitostní frakce. Vyšší záchyt byl ve všech případech pozorován na frakci C, čímž se tedy potvrdil původní předpoklad vyšší sorpce na menší zrnitostní frakci. Nejvyšší sorpce byla pozorována na vzorku S3-4, nejnižší sorpce na vzorku S4-3. V obou případech se jedná o amfibolickou rulu s velice podobným mineralogickým složením (viz Tab. 42), kdy výsledné hodnoty se od sebe lišily o 2 ml g^{-1} . To je rozdíl, který se zahrnutím nejistoty stanovení K_d 1 ml g^{-1} lze zanedbat a považovat všechny hodnoty K_d popisující

sorpci seleničitanu na vzorky z PVP Bukov za prakticky totožné. Z výsledků tedy vyplývá, že rozdíly v mineralogickém složení vzorků z PVP Bukov nevedly k významným rozdílům v zachytu selenu na studované horniny. Sorpci naopak ovlivnila velikost zrn horninových vzorků, kdy vyšší sorpce byla pozorována na menší zrnitostní frakci.

Během všech experimentů byly rovněž sledovány elektrochemické parametry systému, pH bylo v případě všech horninových vzorků 8,4 a $E_h \sim 395$ mV.



Obr. 216 Hodnoty K_d seleničitanu na horninových vzorcích z PVP Bukov, vlevo frakce C, vpravo frakce D, $c(\text{Se}) = 2 \cdot 10^{-5} \text{ mol l}^{-1}$

Seleničitan se na horninové materiály může sorbovat mechanismem ligandové výměny, přičemž sorpce vykazuje závislost na pH, kdy k zachytu seleničitanu na Fe-hydroxidy dochází při $\text{pH} < 9$ a k sorpci na železo obsahující silikátové minerály (např. biotit, chlorit) dochází při $\text{pH} < 8$. Dalším možným mechanismem sorpce selenu je redukce seleničitanu na Se^0 a Se^{II} . K té může dojít v přítomnosti sulfidů železa, v přítomnosti tzv. *green rust* nebo mikrobiální aktivitou. Vzhledem k podobnosti se sírou může selen v sulfidických minerálech, jako jsou např. pyrit, chalkopyrit nebo sfalerit nahradit sulfidickou sírou (Söderlund et al. 2016). Obecně pro vybrané minerály a horniny klesá sorpce selenu v pořadí hematit > goethit > biotit > montmorillonit > granit (Carbol a Engkvist 1997). Na základě mineralogické analýzy studovaných horninových vzorků lze konstatovat, že z možných sorbentů selenu jsou ve studovaných horninách přítomny v malém množství pouze slídové minerály. Sorpce selenu na biotit je dána přítomností Fe^{II} v biotitu, jež je schopen redukce SeO_3^{2-} na Se^0 . Hornblend se jako potenciální sorbent selenu neuvádí (Söderlund et al. 2016). Ostatní Fe-minerály (sulfidy, oxidy, hydroxidy) ve vzorcích obsaženy nebyly, což odpovídá nízkému zachytu na všechny studované vzorky. Hodnoty K_d na granit jsou v literatuře uváděny v rozsahu $0-8,9 \text{ ml g}^{-1}$, což je v souladu s experimentálními daty (Söderlund et al. 2014; Hakanen et al. 2014).

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

Uran

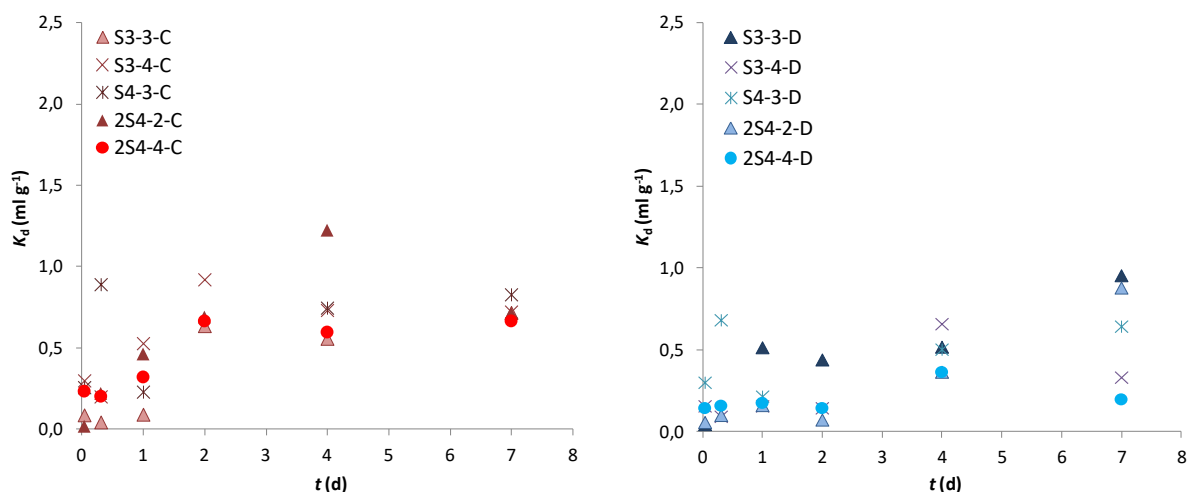
Výsledky sorpčního experimentu s dusičnanem uranylu jsou shrnuty na Obr. 217. Pro lepší přehlednost nejsou v obrázku zobrazeny nejistoty K_d , které se pohybovaly okolo 1 ml g⁻¹. Hodnoty K_d po sedmi dnech experimentu dosáhly v případě obou horninových frakcí hodnoty 1 ml g⁻¹, což ukazuje zanedbatelnou sorpci uranylu na všechny studované vzorky bez ohledu na rozdíly v mineralogickém složení jednotlivých hornin z PVP Bukov (viz Tab. 62 a Tab. 63). Současně nebyl pozorován vliv velikosti frakce na záchyt uranylu. Během všech experimentů byly rovněž sledovány elektrochemické parametry systému, pH bylo v případě všech horninových vzorků 8,2 a $E_h \sim 380$ mV.

Tab. 62 Hodnoty K_d uranu včetně jejich rozšířených standardních nejistot na frakcích C horninových vzorků z PVP Bukov, $c(U) = 2,6 \cdot 10^{-4} \text{ mol l}^{-1}$

t (dny)	S3-3-C	S3-4-C	S4-3-C	2S4-2-C	2S4-4-C
0,04	$0,1 \pm 1,6$	$0,3 \pm 1,7$	$0,3 \pm 1,6$	$0,0 \pm 1,6$	$0,2 \pm 1,7$
0,31	$0,0 \pm 1,6$	$0,2 \pm 1,6$	$0,9 \pm 1,7$	$0,2 \pm 1,7$	$0,2 \pm 1,6$
1	$0,1 \pm 1,6$	$0,5 \pm 1,7$	$0,2 \pm 1,6$	$0,5 \pm 1,7$	$0,3 \pm 1,7$
2	$0,6 \pm 1,7$	$0,9 \pm 1,7$	$0,0 \pm 1,6$	$0,7 \pm 1,7$	$0,7 \pm 1,7$
4	$0,6 \pm 1,7$	$0,7 \pm 1,7$	$0,7 \pm 1,7$	$1,2 \pm 1,7$	$0,6 \pm 1,7$
7	$0,7 \pm 1,7$	$0,7 \pm 1,7$	$0,8 \pm 1,7$	$0,7 \pm 1,7$	$0,7 \pm 1,7$

Tab. 63 Hodnoty K_d uranu včetně jejich rozšířených standardních nejistot na frakcích D horninových vzorků z PVP Bukov, $c(U) = 2,6 \cdot 10^{-4} \text{ mol l}^{-1}$

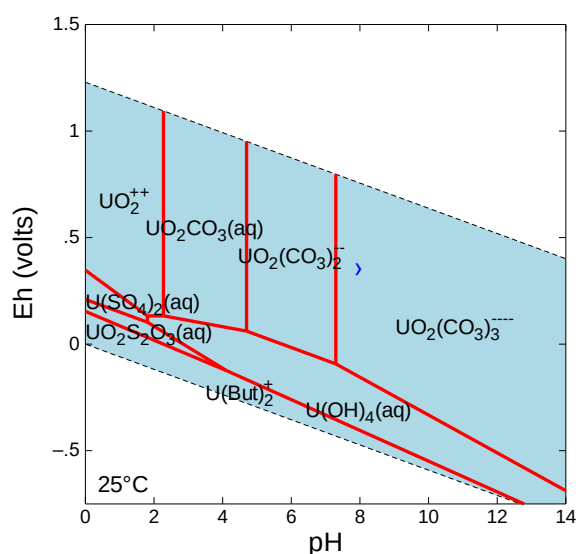
t (dny)	S3-3-D	S3-4-D	S4-3-D	2S4-2-D	2S4-4-D
0,04	$0,0 \pm 1,6$	$0,2 \pm 1,6$	$0,3 \pm 1,7$	$0,1 \pm 1,6$	$0,1 \pm 1,6$
0,31	$0,0 \pm 1,6$	$0,1 \pm 1,6$	$0,7 \pm 1,7$	$0,1 \pm 1,6$	$0,2 \pm 1,6$
1	$0,5 \pm 1,7$	$0,2 \pm 1,6$	$0,2 \pm 1,6$	$0,2 \pm 1,6$	$0,2 \pm 1,6$
2	$0,4 \pm 1,7$	$0,1 \pm 1,6$	$0,0 \pm 1,6$	$0,1 \pm 1,6$	$0,1 \pm 1,6$
4	$0,5 \pm 1,7$	$0,7 \pm 1,7$	$0,5 \pm 1,7$	$0,4 \pm 1,7$	$0,4 \pm 1,7$
7	$1,0 \pm 1,7$	$0,3 \pm 1,7$	$0,6 \pm 1,7$	$0,9 \pm 1,7$	$0,2 \pm 1,6$



Obr. 217 Hodnoty K_d uranu na horninových vzorcích z PVP Bukov, vlevo frakce C, vpravo frakce D, $c(U) = 2,6 \cdot 10^{-4} \text{ mol l}^{-1}$

Jak již bylo zmíněno výše, uran patří mezi redox-senzitivní radionuklidy. V prostředí podzemních vod za oxidačních nebo mírně redukčních podmínek je jeho dominantním oxidačním stavem +VI, konkrétně specíe $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{4-}$ a $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2^{2-}$. Za silně redukčních podmínek se uran vyskytuje v oxidačním stavu +IV jako specíe $\text{U}(\text{OH})_4$ (Carbol a Engkvist 1997). pH/ E_h diagram speciace uranu v SGW2 s vyznačenými experimentálními podmínkami je uveden vlevo na Obr. 218. Z výpočtu speciace uranu v SGW2 výpočetním programem PhreeqC vyplývá, že v podmínkách experimentálního pH a E_h je uran v prostředí SGW2 přítomen ze 100 % v oxidačním stavu +VI jako směs specií $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{4-}$, $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2^{2-}$, $(\text{UO}_2)_2\text{CO}_3(\text{OH})_3^-$ a $\text{UO}_2(\text{OH})_2$, přičemž dominantními speciemi ve studovaném systému jsou Ca-uranyl-karbonátové komplexy (viz Obr. 218). Tyto specíe jsou uváděny jako hlavní specíe přítomné v systému při pH > 7,5 a jsou charakteristické svým nesorbujícím se chováním (Hakanen et al. 2014).

Sorpce uranylu na horninový materiál probíhá za nižšího pH iontovou výměnou, přičemž přítomnost Na^+ a Ca^{2+} v kapalně fázi vede ke zvýšení sorpce uranylu na biotit, dominantní sorbent v horninových vzorcích, ke které dochází expanzí biotitu výměnou hydratovaných Na^+ a Ca^{2+} kationtů za K^+ v mezivrstvě a penetrací uranylu do biotitu (Hakanen et al. 2014).



577	U (3)	0.000e+00	
578	U+3	0.000e+00	0.000e+00
579	U (4)	1.021e-20	
580	U (OH) 4	1.021e-20	1.021e-20
581	U (CO3) 4-4	1.201e-32	3.505e-33
582	U (CO3) 5-6	6.680e-38	4.181e-39
583	UOH+3	0.000e+00	0.000e+00
584	USO4+2	0.000e+00	0.000e+00
585	U (SO4) 2	0.000e+00	0.000e+00
586	U+4	0.000e+00	0.000e+00
587	UCl+3	0.000e+00	0.000e+00
588	UNO3+3	0.000e+00	0.000e+00
589	U (NO3) 2+2	0.000e+00	0.000e+00
590	U (5)	2.706e-17	
591	UO2+	2.706e-17	2.506e-17
592	UO2 (CO3) 3-5	1.405e-23	2.052e-24
593	U (6)	2.400e-04	
594	UO2 (CO3) 3-4	9.753e-05	2.847e-05
595	UO2 (CO3) 2-2	5.961e-05	4.383e-05
596	(UO2) 2CO3 (OH) 3-	3.974e-05	3.681e-05
597	UO2 (OH) 2	2.652e-06	2.652e-06
598	UO2 (OH) 3-	5.618e-07	5.204e-07
599	UO2CO3	1.579e-07	1.579e-07
600	(UO2) 3 (OH) 7-	2.495e-09	2.311e-09
601	UO2OH+	2.307e-09	2.138e-09
602	(UO2) 3 (CO3) 6-6	1.915e-09	1.199e-10
603	(UO2) 3 (OH) 5+	2.845e-10	2.635e-10
604	(UO2) 4 (OH) 7+	6.844e-12	6.340e-12
605	UO2+2	2.954e-12	2.179e-12
606	UO2 (OH) 4-2	1.748e-12	1.285e-12
607	(UO2) 2 (OH) 2+2	3.759e-13	2.773e-13

Obr. 218 Modelování speciace uranu v SGW2. Vlevo pH/Eh diagram uranu v SGW2 s vyznačenou speciací (■) za experimentálních podmínek (The Geochemist's Workbench). Vpravo výpočet zastoupení specií uranu v SGW2 za experimentálních podmínek (PHREEQC), pH = 8,2; Eh = 380 mV; $c(U) = 2,4 \cdot 10^{-4} \text{ mol l}^{-1}$; databáze LLNL.DAT

Sorpční izotermie

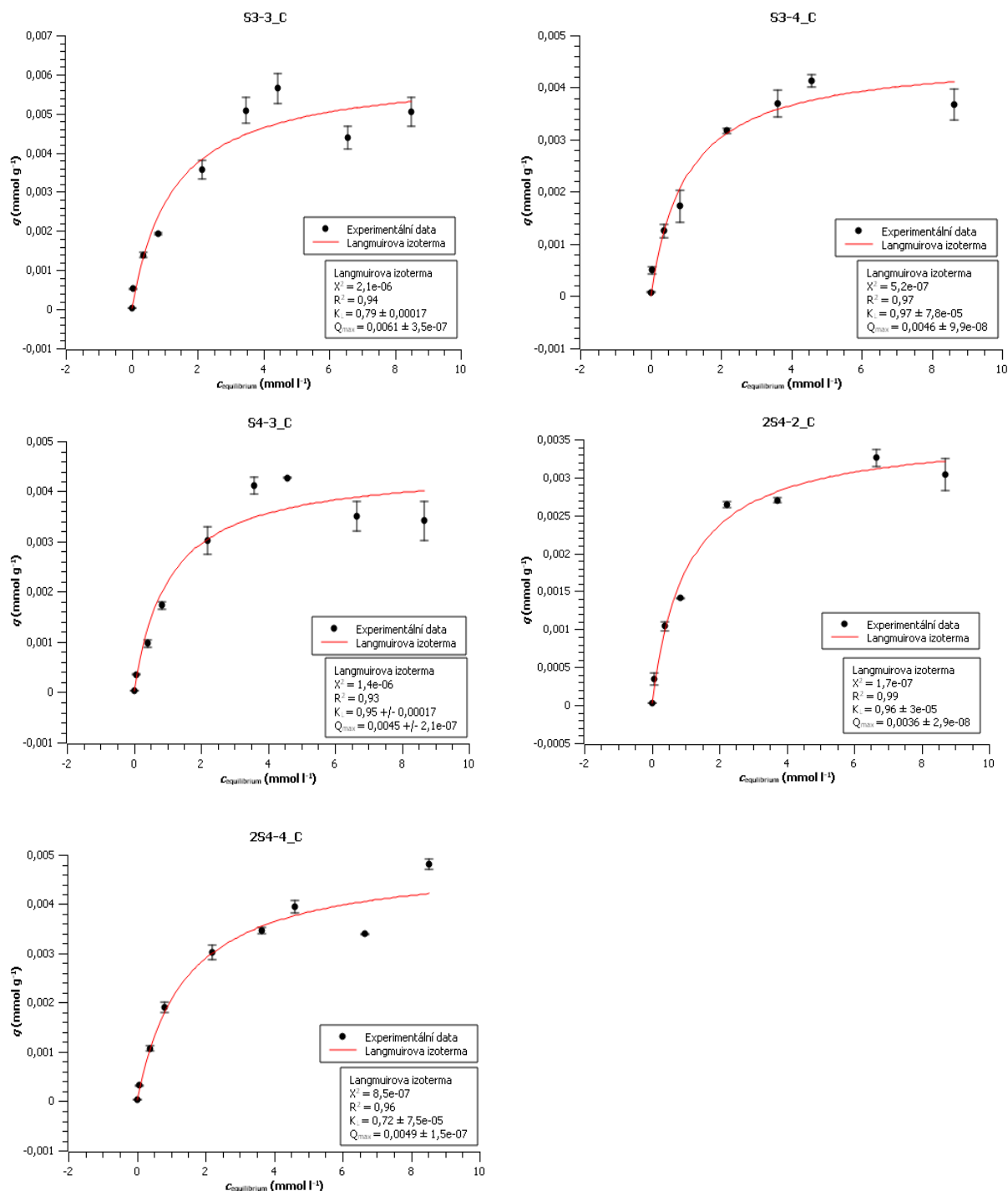
V poli vzdálených interakcí je u většiny radionuklidů předpokládána jejich přítomnost ve stopových koncentracích a lineární průběh sorpce. Při vyšší koncentraci radionuklidů v podzemní vodě je sorpce nelineární a lze ji popsat sorpční izotermou (Posiva Oy 2012). Byly vytvořeny sorpční izotermie popisující sorpci cesia na všechny studované materiály z PVP Bukov. Sorpce byla studována v rozsahu koncentrací cesia $1 \cdot 10^{-5}$ – $9 \cdot 10^{-3} \text{ mol l}^{-1}$. Výsledné izotermie proložené Langmuirovou rovnicí (viz rovnice 28) jsou zobrazeny na Obr. 219. Langmuirova izoterma je typickým příkladem nelineární izotermie shora konvexního tvaru a je odvozena za předpokladu, že se sorpce uskutečňuje adiční reakcí. Je použitelná pro velkou část reálných systémů, zvláště tehdy, pokud je iontová síla v daném koncentračním rozsahu nízká a v podstatě se nemění (Štamberg 1998). Koeficient Langmuirovy izotermie $Q_{\max}$ kvantifikuje maximálně dosažitelnou koncentraci sledované složky v pevné fázi a při sorpci radionuklidu iontovou výměnou je ekvivalentní hodnotě kationtové výměnné kapacity (CEC) daného materiálu.

$$q_k = K_L \cdot C_k \cdot Q_{\max} / (1 + K_L \cdot C_k) \quad (28)$$

kde q_k je koncentrace radionuklidu v pevné fázi, C_k je koncentrace radionuklidu v kapalně fázi, K_L je koeficient Langmuirovy izotermie (rovnovážná reakce rovnice adiční reakce), $Q_{\max}$ je koeficient Langmuirovy izotermie (maximálně dosažitelná koncentrace sledované složky v pevné fázi).

Výsledné hodnoty $Q_{\max}$ (resp. CEC) studovaných horninových minerálů jsou uvedeny v Tab. 64. Jak je vidět, jedná se o velice nízké hodnoty, jejichž velikost je dána nízkým obsahem

minerálů s vysokou CEC (jíly, slídy, hornblendy). Jako dominantní sorbenty v horninách PVP Bukov lze uvažovat zejména slídové minerály, v jejichž struktuře rozlišujeme tři typy sorpčních míst. Jedná se o vysoce selektivní *frayed edge sites* (FES), jež vznikají postupným zvětráváním slíd, dále mezivrství, tzv. *layer sites*, a povrch slíd, tzv. *basal site*.



Obr. 219 Sorpční izotermny cesia na horninových vzorcích z PVP Bukov, $c(Cs) = 1 \cdot 10^{-5} - 9 \cdot 10^{-3} \text{ mol l}^{-1}$

Při nízkých koncentracích cesia sorpci dominují FES, u vyšších koncentrací cesia dojde k jejich nasycení a většina cesia je sorbována na zbývajících dva typy sorpčních míst.

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

V mezivrství je sorpce cesia nespecifická a reversibilní, proto může právě v mezivrství docházet k výměně cesia za jiné konkurenční ionty přítomné v systému. Naproti tomu na FES je sorpce cesia ireversibilní a specifická, jakožto důsledek nízké hydratační energie Cs^+ (Söderlund et al. 2011).

Výsledné nízké hodnoty resp. $Q_{\max}$, resp CEC, získané ze sorpčních izoterem jsou v souladu s publikovanými daty. Allard a Karlsson (1983) uvádí CEC, stanovené technikou izotopového ředění, hornblendu $0,0025 \text{ mmol g}^{-1}$ a biotitu $0,017 \text{ mmol g}^{-1}$.

Tab. 64 Hodnoty $Q_{\max}$ (resp. CEC) horninových vzorků z PVP Bukov

Hornina	S3-3	S3-4	S4-3	2S4-2	2S4-4
$Q_{\max}$ (mmol/g)	0,0061	0,0046	0,0045	0,0036	0,0049
Obsah slíd (hm. %)	4	4	4,5	11	< LOD
Obsah amfibolů (hm. %)	28	17	22,5	< LOD	50

Souhrn výsledků sorpčních experimentů

Byla sledována sorpce vybraných radionuklidů (Cs, Sr, U, Se) na drcené horninové vzorky z PVP Bukov. Tyto vzorky se od sebe vzájemně lišily svým mineralogickým složením. Z hlediska sorpčního chování jednotlivých vzorků byl významný zejména různý obsah slídových a amfibolických minerálů. Vzorky S3-3, S3-4, S4-4 obsahovaly jak slídu ve formě biotitu, tak amfiboly ve formě hornblendu, oba typy minerálů v podobném množství. Vzorek 2S4-2 obsahoval pouze slídové minerály (biotit a annit) a vzorek 2S4-4 obsahoval 50 % magneziohornblendu. Z mineralogických analýz bylo tedy možné predikovat podobné chování vzorků S3-3, S3-4 a S4-3 a očekávat rozdíly v sorpci radionuklidů na vzorky 2S4-2 a 2S4-4.

Sorpce cesia, jakožto kationtového, sorbujícího se radionuklidu, byla pozorována na všech studovaných vzorcích z PVP Bukov. Nejvyšších hodnot K_d bylo dosaženo na vzorku 2S4-2 a na vzorcích S3-3, S3-4 a S4-3. Tyto vzorky se vyznačovaly obsahem slíd a amfibolů, přičemž se potvrdila původní hypotéza srovnatelné sorpce cesia na vzorky s podobným mineralogickým složením S3-3, S3-4 a S4-3. Nejnižší záchyt cesia byl pozorován na vzorku 2S4-4, s vysokým obsahem magneziohornblendu.

Stroncium patří mezi slabě se sorbující radionuklidy, což bylo pozorováno rovněž na vzorcích z PVP Bukov. Výsledné hodnoty K_d byly cca 10 krát nižší než v případě cesia a nebyl pozorován významný rozdíl v sorpci stroncia na jednotlivé horninové vzorky. Vyšší obsah slídových minerálů nevedl k vyššímu záchytu stroncia.

Seleničitan patří mezi slabě se sorbující aniontové radionuklidy. Jeho záchyt je dán přítomností Fe-minerálů (pyrit, siderit, magnetit, hematit, atd.) ve struktuře hornin. Vzhledem k tomu, že jedinými Fe-minerály ve studovaných vzorcích byly slídy, jichž bylo velice omezené množství, odpovídal tomuto faktu i nízký záchyt seleničitanu. Rovněž nebyly pozorovány výrazné rozdíly v sorpci na jednotlivé vzorky z PVP Bukov.

Uran patří spolu se selenem mezi redox-senzitivní prvky, jejich sorpční chování závisí na aktuální speciaci. Vzhledem k tomu, že experimenty s uranem byly prováděny

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

za aerobních podmínek při pH ~8, odpovídá těmto podmínkám výskyt uranu v oxidačním stavu +VI, který v prostředí podzemních vod tvoří nesorbující se karbonátové komplexy. Z tohoto důvodu nebyl na horninových vzorcích pozorován prakticky žádný záchyt uranu a výsledné hodnoty distribučních koeficientů se pohybovaly v rozmezí 0–1 ml g⁻¹, bez ohledu na mineralogické složení vzorků.

Vztah k ostatním lokalitám

Hodnoty K_d vybraných radionuklidů popisující jejich sorpci na vzorky z PVP Bukov byly porovnány s hodnotami K_d získaných na dalších vzorcích z české provenience, konkrétně na durbachytu PZV1 a granitech TIV1, PDV1 a D2 (výsledky ZL Transport 1). Přehled a mineralogické složení porovnávaných hornin jsou uvedeny v Tab. 65 a Tab. 66. Výsledné srovnání hodnot K_d studovaných radionuklidů je uvedeno na Obr. 220 a v Tab. 67 a Tab. .

Tab. 65 Přehled horninových vzorků z české provenience

Hornina	Charakteristika	Původ	Lokalita HÚ
PZV1	durbachit	Pozďátky	Horka
TIV1	granit	Tis u Blatna	Čertovka
PDV1	granit	Panské Dubenky	Hrádek/Čihadlo
D2	granit	Deštná	Čihadlo

Tab. 66 Mineralogické složení horninových vzorků z Českého masivu (hm. %), frakce C: 0,63–0,125 mm, frakce D: 0,8–0,63 mm;

Horninový vzorek	Frakce	Křemen	Plagioklas	K-živec	Chlorit	Amfibol		Biotit, annit	Kaolinit	Muskovit	Pyroxen	Pravděpodobně přítomné minerály
						Hornblend	Cummingtonit					
PZV1	C	24,5	21	20		15		19,5				
	D	25	24,5	26		14,5		10				apatit
TIV1	C	46,5	29	18	0,5			1,5	0,5	4		
	D	44	30,5	19	0,5			5,75	0,25			
PDV1	C	52	24,5	15	0,5					7	1	
	D	46	27	18	0,5					7	1,5	
D2	C	43	30	20,5				2	1	3,5		pyroxen
	D	37	32,5	24,5				1,5	1	3,5		pyroxen

K_d cesia byl u studovaných hornin nejvyšší na durbachytu PZV1, u něhož byla pozorována vyšší sorpce na frakci C, než na frakci D (viz Tab. 67). Tento materiál se vyznačuje nejvyšším obsahem biotitu a rovněž přítomností amfibolických minerálů. Sorpce cesia

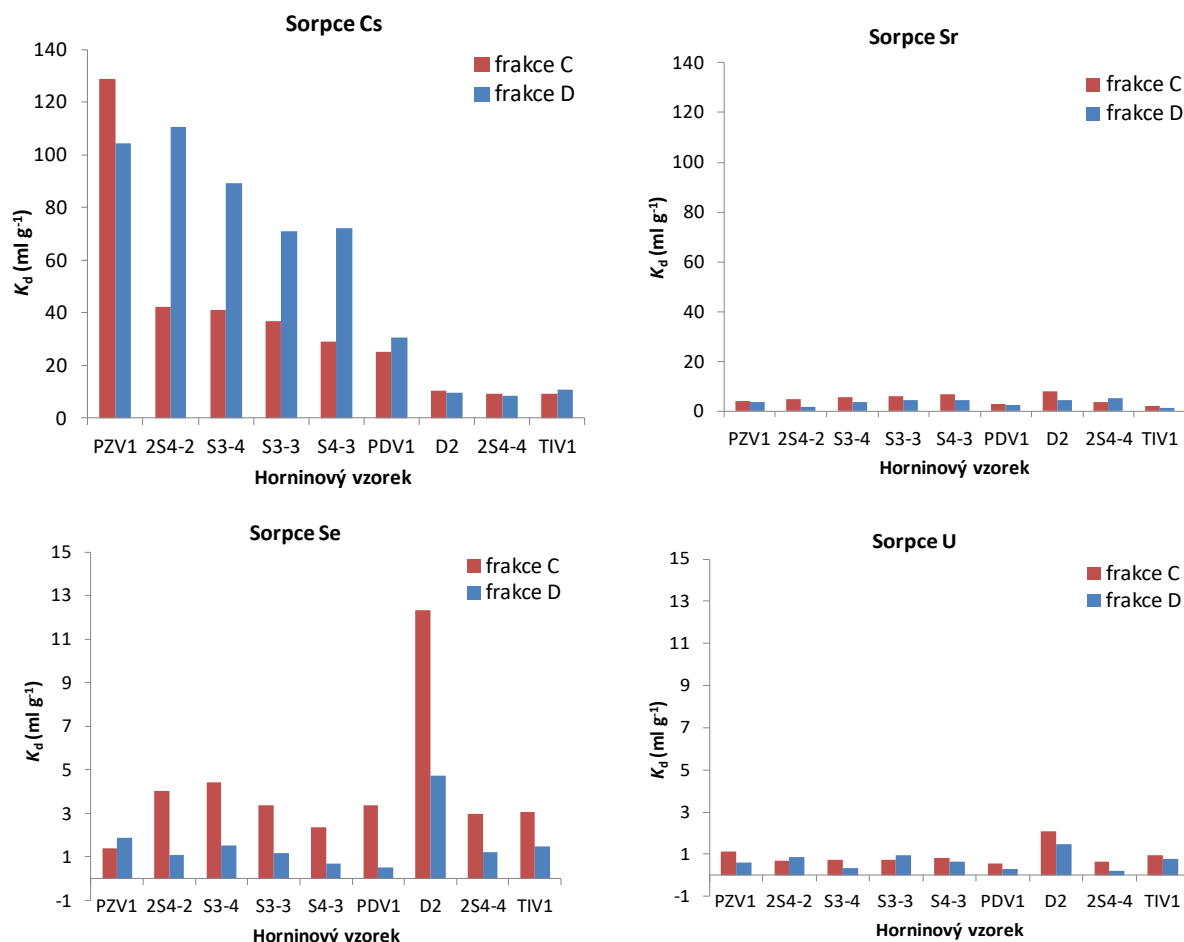
 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

na další vzorky byla výrazně slabší, nejnižší K_d byl pozorován u materiálů TIV1 a 2S4-4, které obsahovaly nejméně slídových minerálů. Z porovnání všech hornin a frakcí je patrný rozdíl v sorpci cesia na jednotlivé frakce. V případě vzorků z PVP Bukov, u kterých byla pozorována „střední“ sorpce cesia, byly hodnoty K_d vyšší vždy na frakci D. U vzorků, na nichž byla pozorována nižší sorpce cesia (D2, 2S4-4, TIV1), byly hodnoty K_d na obou frakcích srovnatelné. Na vzorku PZV1 s nejvyšší hodnotou K_d byla pozorována vyšší sorpce na frakci C. Nabízí se tedy otázka, co ovlivňuje sorpci cesia na jednotlivé horninové frakce. Větší sorpční povrch jemnější frakce to vzhledem k výsledkům na vzorcích z PVP Bukov patrně není. Rozdíly v mineralogii použitých frakcí také ne, protože mineralogické složení jednotlivých frakcí se od sebe výrazně nelišilo. Pouze u vzorku PZV1 došlo vlivem drcení a síťování k nabohacení slídových minerálů ve frakci C, na které byl rovněž stanoven vyšší K_d cesia, čímž tedy lze vysvětlit vyšší sorpci na frakci C vzorku PZV1. Tak velký rozdíl v obsahu slíd mezi frakcemi C a D už ale nebyl pozorován u žádného dalšího vzorku. Proto otázka, proč byla pozorována u vzorků z PVP Bukov výrazně vyšší sorpce na větší zrnitostní frakci D, zůstává nezodpovězena. Jako možnost se nabízí změření specifického povrchu horninových frakcí, tzv. *specific surface area* (SSA), pro zjištění, zda se s měnící se velikostí zrn mění i specifický povrch horninových vzorků. Rovněž je nutné vzít v úvahu heterogenitu horninových materiálů a nejistotu stanovení mineralogického složení hornin.

Tab. 67 Výsledné hodnoty K_d cesia a stroncia včetně jejich rozšířených standardních nejistot na horninových vzorcích české provenience

Hornina	K_d (ml g ⁻¹)			
	Cesium		Stroncium	
	Frakce C	Frakce D	Frakce C	Frakce D
PZV1	128,8 ± 10,8	104,2 ± 9,0	4,0 ± 1,0	3,7 ± 1,0
2S4-2	42,0 ± 3,2	110,5 ± 12,0	4,8 ± 1,1	1,6 ± 0,9
S3-4	41,1 ± 3,9	89,1 ± 6,5	5,4 ± 1,1	3,7 ± 1,0
S3-3	37,0 ± 3,4	71,0 ± 6,2	5,8 ± 1,1	4,3 ± 1,0
S4-3	29,1 ± 2,9	72,0 ± 6,7	6,7 ± 1,2	4,4 ± 1,0
PDV1	25,2 ± 2,6	30,7 ± 2,9	2,7 ± 0,9	2,3 ± 0,9
D2	10,3 ± 1,4	9,7 ± 1,4	5,9 ± 1,1	4,5 ± 1,1
2S4-4	9,3 ± 1,4	8,4 ± 1,3	3,6 ± 1,0	5,0 ± 1,1
TIV1	9,0 ± 1,3	10,6 ± 1,5	2,2 ± 0,9	1,2 ± 0,9

V sorpci stroncia nebyly pozorovány na jednotlivých horninových vzorcích takové rozdíly jako v případě cesia a výsledné hodnoty K_d byly výrazně nižší, pohybovaly se okolo 5 ml g⁻¹. Ve většině případů byla pozorována vyšší sorpce na frakci C a vyšší obsah slíd nevedl k vyšší sorpci stroncia (viz Tab. 67). Z toho vyplývá, že biotit patrně není jediným možným sorbentem stroncia ve studovaných horninových vzorcích, v úvahu připadá rovněž další vrstevnatý minerál kaolinit, obsažený v granitu D2 a hornblend, obsažený ve většině studovaných minerálů.



Obr. 220 Sorpce vybraných radionuklidů na horninové vzorky z české provenience

Výsledné hodnoty K_d seleničitanu na vzorcích z PVP Bukov byly srovnatelné s ostatními vzorky české provenience a pohybovaly se okolo 3 ml g⁻¹ na frakci C (viz Tab.). Výjimku tvořil granit D2, u nějž K_d dosáhl 12 ml g⁻¹. Je však otázkou, zda tato vyšší hodnota není důsledkem heterogenity materiálu a možného jednorázového nabohacení některých minerálů v navažovaném vzorku. Ovšem vzhledem k tomu, že vyšší hodnota K_d byla získána i na frakci D granitu D2, jedná se patrně skutečně o vlastnost horninového vzorku. Ve všech případech byla pozorována vyšší sorpce na menších horninových frakcích, větší sorpční povrch tedy vedl k vyššímu zachytu seleničitanu. Přesto se seleničitan jevil jako slabě se sorbující radionuklid. Jeho sorpce je ovlivněna různými faktory, mezi nejvýznamnější patří složení a pH kapalná fáze, mineralogické složení sorbentu a obsah organické hmoty (Söderlund et al. 2016). Provedené experimenty byly všechny provedeny se stejnou syntetickou granitickou vodou (SGW2) a pH se ve všech případech pohybovalo okolo 8,5. Obsah organické hmoty nebyl v horninových vzorcích uvažován, a proto jediným významným faktorem, který mohl ovlivnit zachyt seleničitanu, je mineralogické složení pevné fáze.

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

Tab. 80 Výsledné hodnoty K_d selenu a uranu včetně jejich rozšířených standardních nejistot na horninových vzorcích české provenience

Hornina	K_d (ml g ⁻¹)			
	Selen		Uran	
	Frakce C	Frakce D	Frakce C	Frakce D
PZV1	1,4 ± 0,9	1,9 ± 0,9	1,1 ± 1,7	0,6 ± 1,7
2S4-2	4,0 ± 1,0	1,1 ± 0,9	0,7 ± 1,7	0,9 ± 1,7
S3-4	4,4 ± 1,3	1,5 ± 0,9	0,7 ± 1,7	0,3 ± 1,7
S3-3	3,4 ± 1,0	1,2 ± 0,9	0,7 ± 1,7	1,0 ± 1,7
S4-3	2,4 ± 0,9	0,7 ± 0,8	0,8 ± 1,7	0,6 ± 1,7
PDV1	3,4 ± 1,0	0,5 ± 0,8	0,5 ± 1,7	0,3 ± 1,7
D2	12,3 ± 2,0	4,7 ± 1,1	2,1 ± 1,8	1,5 ± 1,8
2S4-4	3,0 ± 1,0	1,2 ± 0,9	0,7 ± 1,7	0,2 ± 1,6
TIV1	3,1 ± 1,0	1,5 ± 0,9	1,0 ± 1,7	0,8 ± 1,7

V Tab. 68 jsou shrnuty hodnoty K_d na jednotlivých minerálech přítomných v krystalických horninách podle Söderlund et al. (2016). Je z nich patrné, že potenciálním sorbentem seleničitanu v použitých vzorcích je zejména biotit a v menší míře i chlorit a plagioklas. Přesto sorpce seleničitanu na tyto minerály není vysoká (viz Tab. 68), ale je v souladu s našimi experimentálními daty. Nízké hodnoty K_d seleničitanu na studovaných vzorcích jsou tedy důsledkem absence Fe-minerálů (např. hematit, goethit, pyrit, magnetit, siderit), které jsou uváděny jako významné sorbenty selenu (Carbol a Engkvist 1997).

Tab. 68 Hodnoty K_d seleničitanu na vybrané minerály přítomné v krystalických horninách (Söderlund et al. 2016)

Minerál	Křemen	K-živec	Plagioklas	Hornblend	Hematit	Chlorit	Biotit	Muskovit
K_d (ml g ⁻¹)	0	0	7,8	0	14,3	6,7	17,6	0

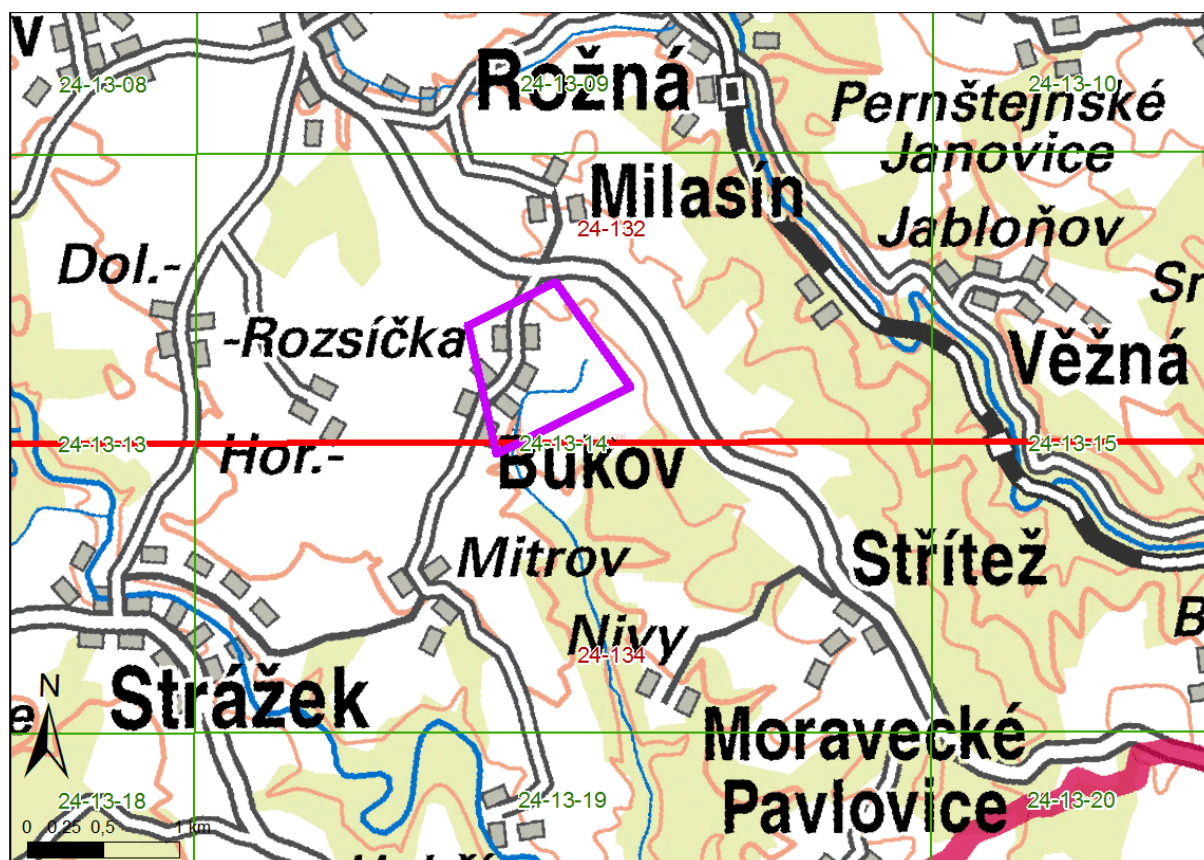
Sorpce uranu na srovnávaných vzorcích byla obdobná jako v případě vzorků z PVP Bukov (viz Obr. 220). Hodnoty K_d se pohybovaly okolo 1 ml g⁻¹, výjimku opět tvořil materiál D2, u kterého byla hodnota K_d vyšší (2 ml g⁻¹). Jedná se o minimální rozdíl, přesto v porovnání s ostatními horninovými vzorky patrný (viz Tab.). Obecně lze ale říci, že uranuly se v tomto prostředí choval jako nesorbující se stopovač a nebyly pozorovány významné rozdíly v sorpčním chování uranuly na jednotlivých horninových vzorcích z české provenience.

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

3 3D geovědní modely PVP Bukov

V průběhu výstavby PVP Bukov byla získávána geologická data, která umožnila komplexní charakteristiku horninového prostředí a vytvoření 3D modelů geologické a strukturně geologické stavby zájmového objemu horninového masívu. Podrobná znalost geologického prostředí PVP Bukov byla nezbytná nejen k upřesnění technických prací v průběhu ražby a výstavby, ale také jako vstup pro geomechanické modely. 3D strukturně-geologické modely pracoviště jsou také základním podkladovým materiálem pro lokalizaci budoucích experimentálních pracovišť a jejich efektivní využití.

3D strukturně geologické modely pracoviště zohledňují 2 úrovně: a) globální (regionální), která vizualizuje struktury širšího okolí pracoviště včetně zpracované archivní dokumentace DIAMO, s.p. a b) detailní strukturní model pracoviště včetně přístupových částí, který je založen na datech získaných během ražeb (např. strukturní mapování, dokumentace vrtných jader apod.). Rozsahy obou modelů jsou zhruba definovány v ZL a upřesněny byly po konzultaci se SÚRAO a UJV Řež v průběhu roku 2015 (Obr. 221) tak, že reflektují rozsah PVP Bukov a regionálně geologickou situaci okolí. Plošný rozsah globálního modelu je shodný s rozsahem nově vytvořené povrchové geologické mapy 1 : 10 000. Hloubkový dosah globálního modelu je cca 700 m, v závislosti na nadmořské výšce terénu. Plošný rozsah detailního modelu odpovídá rozsahu ražeb PVP Bukov, vertikální rozsah je pak max. 50 m od úrovně PVP Bukov.



Obr. 221 Rozsah území 3D regionálního modelu PVP Bukov na podkladu topografické mapy, legenda: fialový polygon – plošný rozsah regionálního 3D strukturně-geologického modelu ČGS; listoklady – zeleně 1 : 10 000, -červeně 1 : 25 000

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

Díky rozsáhlé hornické činnosti spojené s těžbou uranových ložisek Rožná a Olší disponuje zájmové území velmi podrobným a obsáhlým souborem archivních materiálů jak z povrchových průzkumných prací včetně technických, tak z podzemních prostor až do hloubek 1200 m pod povrchem. Tím se dané území z hlediska množství provedených geologických prací a dostupných archivních dat výrazně odlišuje od běžné situace v Českém masívu.

Pro účely tvorby 3D strukturně geologických modelů PVP Bukov byly na základě znalostí řešitelského týmu a diskuze s odborníky z řad zaměstnanců DIAMO s.p., o.z. GEAM vybrány následující podklady:

- geologická mapa 1 : 10 000 České geologické služby,
- dokumentace vrtů realizovaných pro účely ložiskového průzkumu dané oblasti poskytnutá DIAMO, s.p.,
- archivní podpovrchová dokumentace ražeb poskytnutá DIAMO s.p. v rozsahu 3., 5., 9., 12., 16. a 18. patra, konkrétně generalizované patrové mapy v měřítku 1 : 1 000, lokálně doplněné primární dokumentací v měřítku 1 : 200,
- strukturní měření zlomů z těchto map,
- strukturní měření foliací z těchto map,
- digitalizované horizontální řezy ložiskovým polem Rožná – Olší, poskytnuté DIAMO s.p.,
- archivní vertikální geologické řezy vytvořené na základě geologických map, vrtných prací a podpovrchové dokumentace, poskytnuté DIAMO s.p.,
- detailní strukturně geologický model PVP Bukov sestavený ČGS (viz kapitola 4.2 této zprávy).

Pro tvorbu modelů bylo samozřejmě dále využito geologických dat pořízených během ražeb a následných prací PVP Bukov na 12. patře v těsné blízkosti jámy Bukov.

Část vstupních dat byla zpracovávána a kompilována nejdříve v softwaru ArcMap verze 10.2.2, který ČGS využívá na základě plovoucí licence zakoupené od firmy ArcData. Dále byla převedena do formátů vhodných pro import do softwaru MOVE. 3D strukturně geologické modely PVP Bukov byly vytvořeny v MOVE verze 2015.2, 2016.1 a 2016.2, využívanými na základě plovoucí licence zakoupené přímo od výrobce Midland Valley Ltd. Výsledné modely vycházejí ze souhrnu všech výše jmenovaných dat. Zdrojová data využitá pro tvorbu modelů jsou v původní podobě uložena na síťovém adresáři ČGS vytvořeném pro řešení této zakázky, s přístupem omezeným pouze na řešitelský tým ČGS.

Každý model byl vytvořen za využití následujících počátečních kroků:

- Založení projektu a nastavení projekce

Při založení nového projektu byl nastaven souřadný systém využívaný v rámci ČR: S-JTSK (Křovák East-North). Importy vektorových dat a georeferencovaných rastrů z programů ArcMap zpracovávaných v souřadném systému S-JTSK (Křovák East-North) pak proběhly bez problémů.

- Vytvoření sjednocené litologické kolonky v „Horizons“ v souladu s geologickou mapou

V souladu s geologickou mapou 1 : 10 000 bylo v MOVE vytvořeno „stratigrafické“ (litologické) členění, tak aby jednotlivé nově vytvořené Horizons (reprezentující v tomto případě jednotlivé litologie) odpovídaly předem definovaným názvům z geologické mapy a byly barevně odlišeny.

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

- Definice strukturních a dalších symbolů

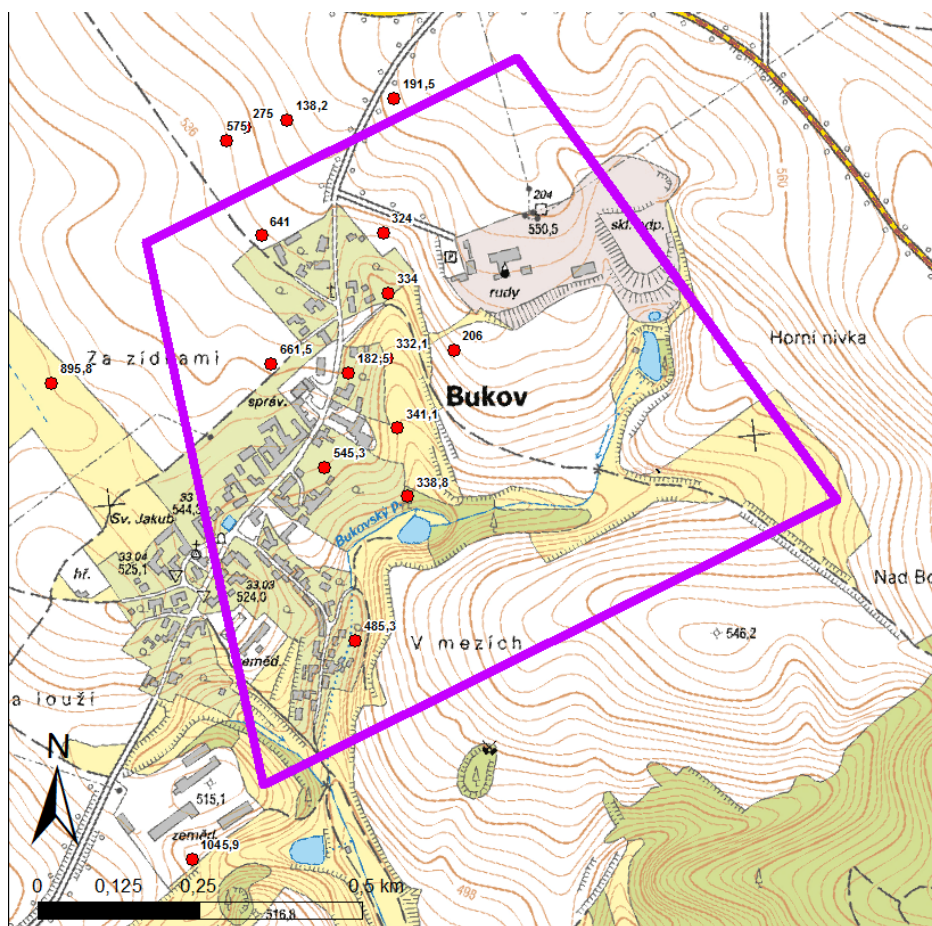
Příprava strukturních symbolů probíhala obdobně jako příprava „horizontů“. Program MOVE obsahuje vlastní databázi běžně využívaných strukturních znamének, která lze přiřadit k uživateli předem definovaným strukturním prvkům (puklina, kliváž, foliace, lineace aj.) a tyto byly přiřazeny především orientacím foliací změřeným v PVP Bukov.

3.1 Globální (regionální) 3D strukturně geologický model

3.1.1 Charakteristika vstupních dat

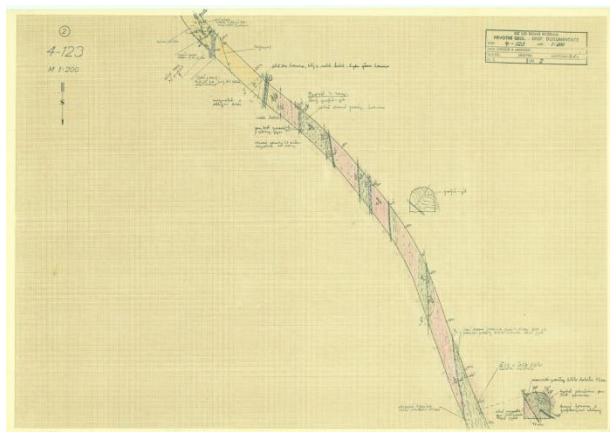
Základ modelů tvoří nová povrchová geologická mapa zakrytá širšího okolí PVP Bukov včetně průběhu hlavních zlomů. Především západní část území pokrývají důlní patrové mapy ložiska Rožná, tyto archivní materiály byly doplněny o vrtná data. Ve východní části území bohužel hloubková data téměř úplně chybí, vzhledem k tomu, že tato oblast nebyla více rozfárána. V rámci tvorby 3D strukturně geologického globálního modelu širšího okolí PVP Bukov byly využity následující podklady:

- Základní geologická mapa zakrytá v měřítku 1 : 10 000 (viz kapitola 2.1.8, Příloha 2) a digitální model reliéfu. Tato mapa byla vytvořena ČGS v průběhu roku 2015 na základě nově provedených terénních prací ČGS (viz Roční etapová zpráva 2015) a s využitím geologických map velkých měřítek pocházejících z archivů DIAMO, vytvořených pro účely ložiskového průzkumu dané oblasti. Tato mapa je umístěna na digitální model reliéfu modelovaného území.
- Dokumentace vrtů realizovaných pro účely ložiskového průzkumu dané oblasti. V databázi Geofond je pro zájmové území vedeno 11 vrtů dosahujících hloubek 182,5 až 661,5 m (Obr. 222). K těmto vrtům je v databázi dostupný litologický profil. Kromě těchto je v databázi stejným způsobem vedeno 6 vrtů z blízkosti zájmového území, které byly při tvorbě globálního 3D strukturně geologického modelu také uvažovány. Z lokalizace vrtů je zřejmé, že jejich hlavním účelem byl opět ložiskový průzkum zaměřený na S-J zlomové zóny zrudněné uranem. Východní polovina zájmového území, kde je lokalizováno PVP Bukov a která se strukturně nachází v podloží zrudněných zón, je tudíž vrty zcela neprozkoumána. Litologické údaje z vrtů byly reinterpretovány v souladu s jednotnou legendou globálního modelu. Výraznou nevýhodou vrtných dat je absence inklinometrie ve všech využitých vrtech. Všechny vrty byly plánovány jako vertikální, avšak při jejich hloubce vyšších stovek metrů je jisté, že se ve větších hloubkách od vertikálního směru odchýlily. Lokalizace jednotlivých zastižených litologií je tedy s rostoucí hloubkou méně přesná.

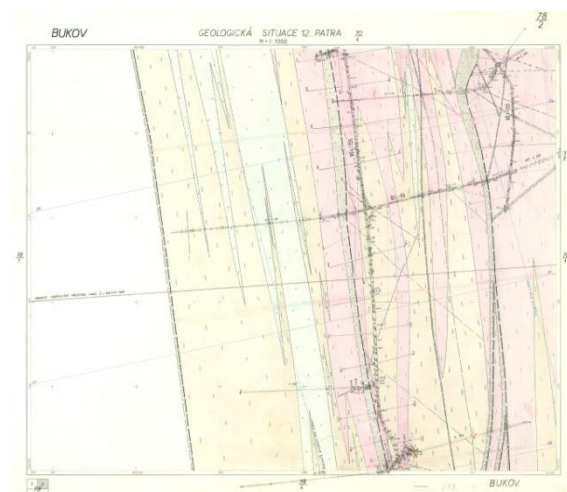


Obr. 222 Lokalizace vrtů vedených v databázi Geofondu s uvedením hloubky jednotlivých vrtů

- Georeferencované skeny patrových map od DIAMO,s.p., o.z. GEAM. ČGS získala podrobné skeny patrových map měřítka 1 : 1 000 z ložiska Rožná, a to z následujících pater: 3. (407 m.n.m.), 5. (331 m.n.m.), 9. (167 m.n.m.), 12. (21 m.n.m.), 16. (-187 m.n.m.), 18. (-287 m.n.m.). Lokálně jsou tyto mapy doplněné primární dokumentací v měřítku 1 : 200 – jejich vzájemná shoda byla namátkově ověřena, rovněž byla namátkově ověřena přesnost a správnost terénní rekognoskací přímo v podzemí (zejména na 12. patře). Z patrových map 1 : 1 000 byly využity jak kontury horninových těles a kataklasticky postižených zlomových zón, tak mezoskopická strukturní měření zlomů a foliací. Správnost těchto strukturních měření byla rovněž namátkově ověřena v podzemí.



Obr. 223 Základní geologická dokumentace 1 : 200 z lokality Bukov, zobrazující výřez situace v jedné z horizontálních chodeb, vč. dvou orientačních nákresů čelby



Obr. 224 Geologická dokumentace 1 : 1 000 z lokality Bukov, zobrazující výřez situace na úrovni 12. patra (hloubka c. 500 m pod povrchem)

- Digitalizované horizontální řezy ložiskovým polem Rožná – Olší poskytnuté DIAMO, s.p. Tyto vektorizované podklady byly ČGS předány SÚRAO v podobě GIS projektu. SÚRAO tyto podklady získalo od DIAMO s.p., o.z. GEAM. Dle srovnání se skeny patrových map představují tato vektorová data zjednodušení oproti skenům patrových map a extrapolaci geologické situace do širšího okolí důlních prostor.
- Jednotná horninová legenda PVP Bukov. Pro účely tvorby modelu bylo nutno stanovit závazný seznam litologií, které budou v litologicky pestrém okolí PVP Bukov během geologických prací rozlišovány. Tato legenda byla vytvořena sloučením 2 legend – legendy ke geologické dokumentaci ražeb a vrtů PVP Bukov a legendy k nově vytvořené geologické mapě 1 : 10 000.
- Generalizovaná distribuce litologií a hlavních zlomů zastižená ražbami PVP Bukov. Strukturní a petrografická dokumentace ČGS pořizovaná průběžně během ražeb PVP Bukov. Z této dokumentace jsou pro účely tvorby globálního modelu využity jen nejvýznamnější litologické hranice a nejmnocnější zlomy a zlomové zóny.
- Archivní vertikální geologické řezy poskytnuté DIAMO s.p. (Obr. 225) byly konstruovány za účelem dokumentace a průzkumu ložiska Rožná. Skeny těchto rukopisných řezů byly georeferencovány do modelu na základě mapy povrchového průběhu těchto řezů a vertikálního rozsahu jednotlivých řezů. Samotné řezy vycházejí z dobové syntézy patrových map, strukturních měření a vrtných dat. Jejich měřítko, kvalita a množství obsažených informací je variabilní.

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017



Obr. 225 Geologický řez k projektu 1958 Bukov

Následující text stručně popisuje metodiku importu výše uvedených dat do globálního 3D modelu v programu MOVE ve verzích 2016.1 a 2016.2.

- Import sjednocené geologické mapy včetně zlomové sítě

Geologická mapa 1 : 10 000 byla do projektu nahrána jako polygonová vrstva ve formátu shapefile (*.shp). Každý polygon měl již v atributové tabulce uvedeno jeho litologické zařazení dle předem vytvořené litologické legendy pro celý model (nedefinované v poli „Horizons“). V nastavení importu GIS vektorových dat v rámci programu MOVE pak byl pouze přiřazen tento atribut položce Horizon, každý polygon tak byl přiřazen dané litologii nedefinované v Horizons. Import zlomové sítě (liniový shapefile) proběhl stejným způsobem bez nutnosti definovat Horizons. Po nahrání do projektu byly vybrané linie zařazeny do položky zlomy (Fault) a program s nimi tak dále nakládal.

- Import rastrových podkladů a jejich rektifikace

Import geologických map a řezů ve formě rastrových obrázků lze provádět v širokém rozsahu formátů, čistých rastrů i rastrů s uloženými metadaty (např. polohopis, výškopis aj.). U geologických map a map obecně bylo nutné obrázek nejdříve rektifikovat v GIS programu (výsledkem je např. soubor ve formátu GeoTiff). Konkrétně patrové mapy 1 : 1 000 byly georeferencovány na základě souřadnic S-JTSK uvedených přímo na jednotlivých listech těchto map, georeferencování pak bylo nezávisle ověřeno po importu do MOVE shodou s průběhem hlavních ražeb vektorizovaných a dodaných v DXF formátu od DIAMO s.p. (černé linie na Obr. 229). Vertikální řezy byly vloženy do předem vytvořených sekcí (ploch průběhu řezů) a jejich ořez i zmenšení/zvětšení byl proveden během importu a následně transformací snímku v rámci sekce.

- Import vrtných dat

Vrtná data jsou důležitou součástí při konstrukci modelu a program jejich důležitost reflektuje propracovaným rozhraním importu průběhu vrtu a mnoha doplňkových informací. Vrtná data byla importována z textového formátu ASCII (*.csv nebo *.txt). Textové soubory obsahovaly název vrtu, zaměření vrtu ve formátu souřadnic XYZ v souřadném systému S-JTSK (Křovák East-North), údaj o hloubce vrtu v metrech (lze použít i upravenou Z souřadnici), údaje o litologických horizontech a jejich hloubkový dosah.

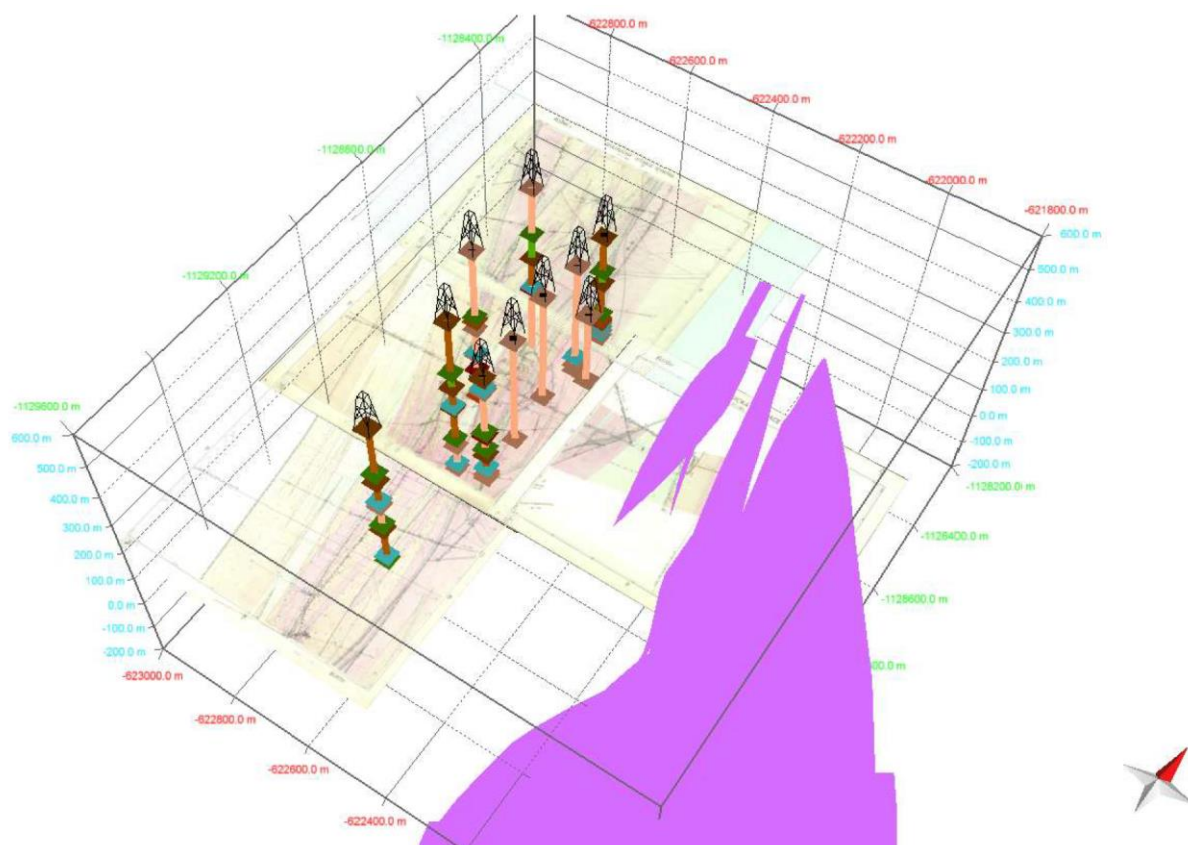
 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

- Import strukturních dat

V programu je možné vkládat a vizualizovat strukturní data různého charakteru, záleží na uživateli, jaké kategorie si zvolí a jaké strukturní prvky bude do programu vkládat. Ve 2D režimu se tektonická znaménka zobrazují v klasické mapové podobě, ve 3D pak jako kruh (čtverec, trojúhelník) orientovaný do směru sklonu a sklonu daného měření. Import dat proběhl přes tabulku ve formátu ASCII (obdobně jako u vrtů) za využití souřadnic místa měření (X, Y), názvu měřeného bodu/lokality a samotných naměřených údajů.

- Import DEM, projekce dat na DEM

Pro horní hranici modelu byl využit digitální model reliéfu (digitální model reliéfu 4. generace, ČÚZK 2013), který byl do modelu importován jako grid, na který byla následně vyprojektována zjednodušená geologická mapa 1 : 10 000 zkompileovaná pro účely 3D strukturně geologického modelu lokality, zlomové linie a další povrchová data.



Obr. 226 Náhled vrtných dat, důlních map a polygonů granulitu z digitalizovaných map od DIAMO s.p., které posloužily pro tvorbu modelu v software MOVE

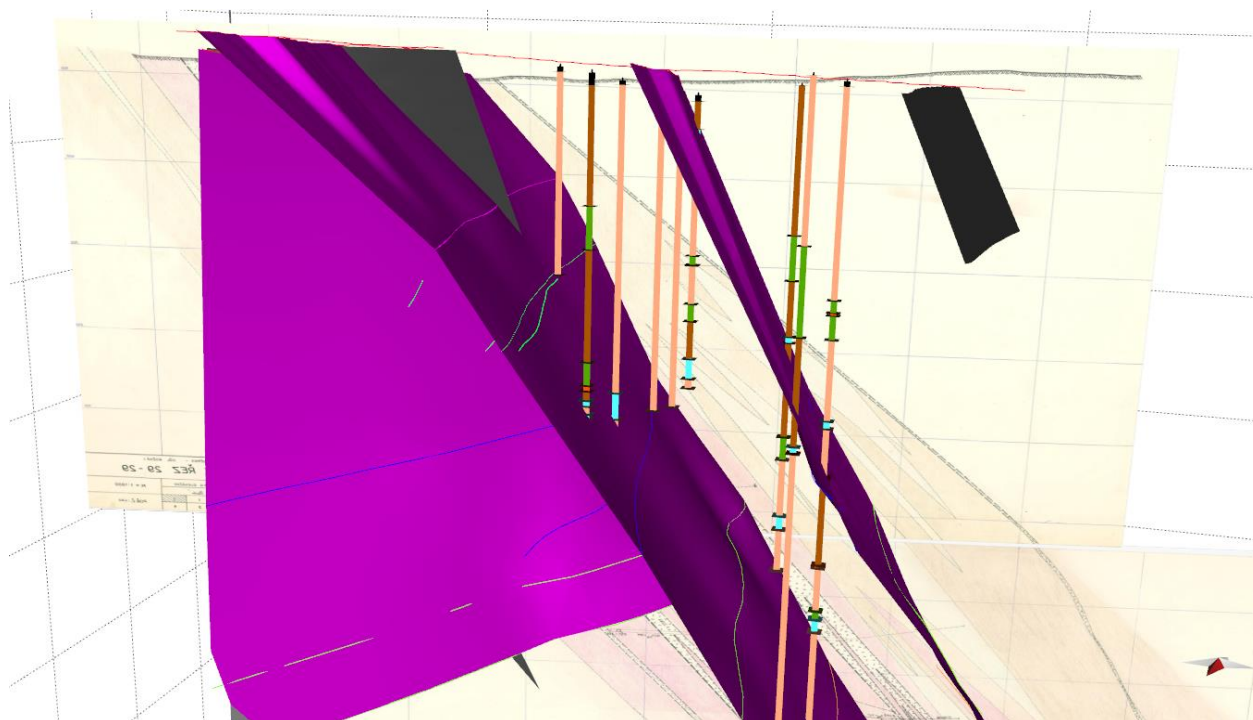
Po importu všech získaných dat do 3D modelu v programu MOVE (Obr. 226) se projeví četné nepřesnosti a případné chyby v jednotlivých datových zdrojích.

Zásadnějšího významu byly rozdíly v případě zlomových ploch. Příkladem může být jedna z hlavních zlomových zón ložiska Rožná, R4, kterou měl tým ČGS možnost ověřit díky ochotě pracovníků DIAMO s.p., na 12. patře. Tato zlomová zóna ověřená četnými rozrážkami z chodby PŠ4-125 (Obr. 227) je v rukopisných patrových mapách lokalizována v souladu se situací dokumentovanou nově v podzemí. V digitalizovaných horizontálních

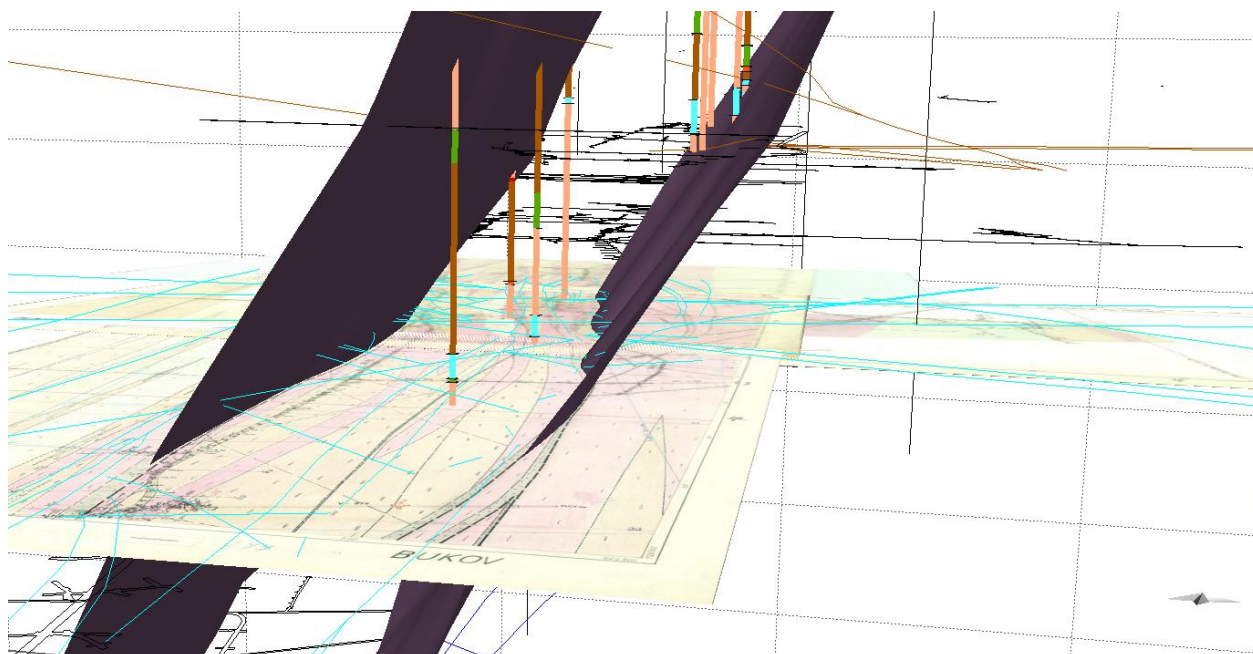
řezech ložiskem se však nachází cca 50 m západně od těchto dokumentovaných výskytů (viz světle modré linie v levé části Obr. 229). Ve vertikálních řezech zájmovou oblastí pak v některých případech chybí úplně, navzdory jejímu zastižení ražbami i vrty (Obr. 228), v jiných řezech má průběh odlišný od průběhu získaného propojením jednotlivých patrových map a povrchové geologické mapy.



Obr. 227 Důl Rožná, 12. patro, chodba PŠ4-125 - výval zóny R4 ze západní stěny chodby



Obr. 228 Příklad nesouladu mezi vertikálním rukopisným řezem, vrtnými daty (světle modrá značí zónu kataklázy) a průběhu hlavních zlomů (fialové plochy) rekonstruovaných na základě patrových map 1 : 1 000. Pohled na jih, pravý zlom reprezentuje zónu R4, levý R1 s jejím podložním „odžilkem“



Obr. 229 Příklad nesouladu mezi patrovou rukopisnou mapou (12. patro) a digitalizovanými horizontálními řezy Rožná-Olší (světle modré linie) vs. vrtná data (světle modrá značí zónu kataklázy) vs. průběh hlavních zlomů rekonstruovaných na základě patrových map 1 : 1 000 (fialové plochy) a průběh ražeb pro ověření zlomů R1 a R4 (černě). Pohled na sever, pravý zlom reprezentuje zónu R1, levý R4

Po vyhodnocení všech těchto aspektů byly pro konstrukci horninových těles a zejména zlomových ploch primárně využívány patrové mapy 1 : 1 000 a povrchová geologická mapa 1 : 10 000 jakožto nejdůvěryhodnější materiály. K dalším datům bylo přihlíženo jako k pomocným zdrojům s určitou mírou nejistoty. Metodiku tvorby geologických fenoménů 3D globálního modelu lze rozdělit na následující etapy:

- Tvorba horninových těles přes horizontální řezy

Samotná tvorba hranic horninových těles byla ve většině případů provedena přes konstrukci horizontálních řezů do hloubky modelu, tj. cca 700 m od zemského povrchu. Obvykle byly konstruovány řezy s krokem cca 100 m, které byly dále doplněny o další podrobnější řezy v místech, kde bylo nutné podrobněji vykreslit složitý průběh jednotlivých těles. V každém řezu byly vykresleny liniemi průběhy geologických těles. Ty byly následně využity pro konstrukci povrchů (meshů) daných těles. Obdobným způsobem byly vytvořeny také meshe tvořící hranice a bázi modelu.

- Tvorba zlomů

Linie zlomů vyprojektované na zemský povrch byly spojeny s liniemi zlomů vektorizovanými dle patrových map, s přihlédnutím k mezoskopickým strukturním měřením z těchto map. Povrchy jednotlivých zlomových ploch pak byly konstruovány jako meshe stejným způsobem jako geologická tělesa. Pro představu o mocnosti hlavních zlomových zón modelu slouží Tab. 69. Zlomy dokumentované v PVP Bukov, které nemají ekvivalent v patrových mapách ani v povrchové mapě, byly vytvořeny jako rovná plocha orientovaná dle mezoskopického strukturního měření daného zlomu v PVP.

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

Tab. 69 Parametry hlavních zlomů odečtené z povrchové a patrových map

Název zlomu	Generelní sklon a směr sklonu, dle tektonických měření	Patro	Mocnost kataklastické výplně
Bukovská dislokace		Povrch	? do 10 m
Bukovská flexurní dislokace	subvertikální, resp. sklony na obě strany	Povrch	33-43 m
R1		Povrch	10-14 m
R1	65-70° k západu	3P	11-16 m
R1 generalizovaná	60-70° k západu	5P	20-36 m anastomózní podrcená zóna
R1	60-80° k západu	9P	10-28 m
R1	50-75° k západu	12P	7-23 m, obvykle 10- 12 m
R1	50-60° k západu	16P	6-15 m
R1	42-49° k západu - údaje jen v severní části modelu	18P	6-33 m - silně variabilní, obvykle cca 10 m
R1 - podložní odžilek	55-65° k západu	9P	1 - 11 m - silně variabilní
R1 - podložní odžilek	?	12P	4-7 m
R1 - podložní odžilek	50-70° k západu	16P	5-6,5 m
R4		Povrch	7-10 m
R4	55-75° k západu - na J menší sklon, k S postupne strmější	9P	8-9 m
R4	60-65° k západu	12P	7,5 - 13 m
R4	55° k západu	16P	3-6 m
R4	45-61° k západu na jihu, 54-81° k západu na severu modelu	18P	2,5-26 m, silně variabilní, obvykle 6 m

3.1.2 Popsatelnost a predikovatelnost geologické stavby

Model širšího okolí PVP Bukov je vymezen povrchovou geologickou mapou v měřítku 1 : 10 000 a jeho hloubkový dosah pak nadmořskou výškou – 150 m (tedy hloubkou cca 700 m). Veškerá tělesa modelu jsou reprezentována meshem – ať se jedná o zlomy, horninová rozhraní nebo průběh překopů PVP.

Zlomová síť pro účely modelu byla vytvořena na základě zlomů z povrchové geologické mapy a byla doplněna z důlní dokumentace. Průběh zlomů byl modelován (v 6 případech) na základě patrových map DIAMO s.p., další 3 zlomy byly doplněny z podzemní dokumentace ČGS z překopu BZ-XIIJ. Dosah zlomů byl opět konstruován z důlní dokumentace nebo odhadnut na základě mocnosti a charakteru zlomů pozorovaných v podzemí. Veškeré zlomy byly ukončeny na hranicích modelu. Orientace zlomů zastoupených v PVP Bukov byly alespoň dle možností ověřeny jejich zastižením ve vrtech S-1 – S-4, s jistotou bohužel nelze jejich detailní průběh interpretovat, obzvláště v případě významného porušení jader S-1 a S-2 a vzhledem ke komplikované situaci a nedostatečným rozsahům podzemních děl v oblasti PVP Bukov.

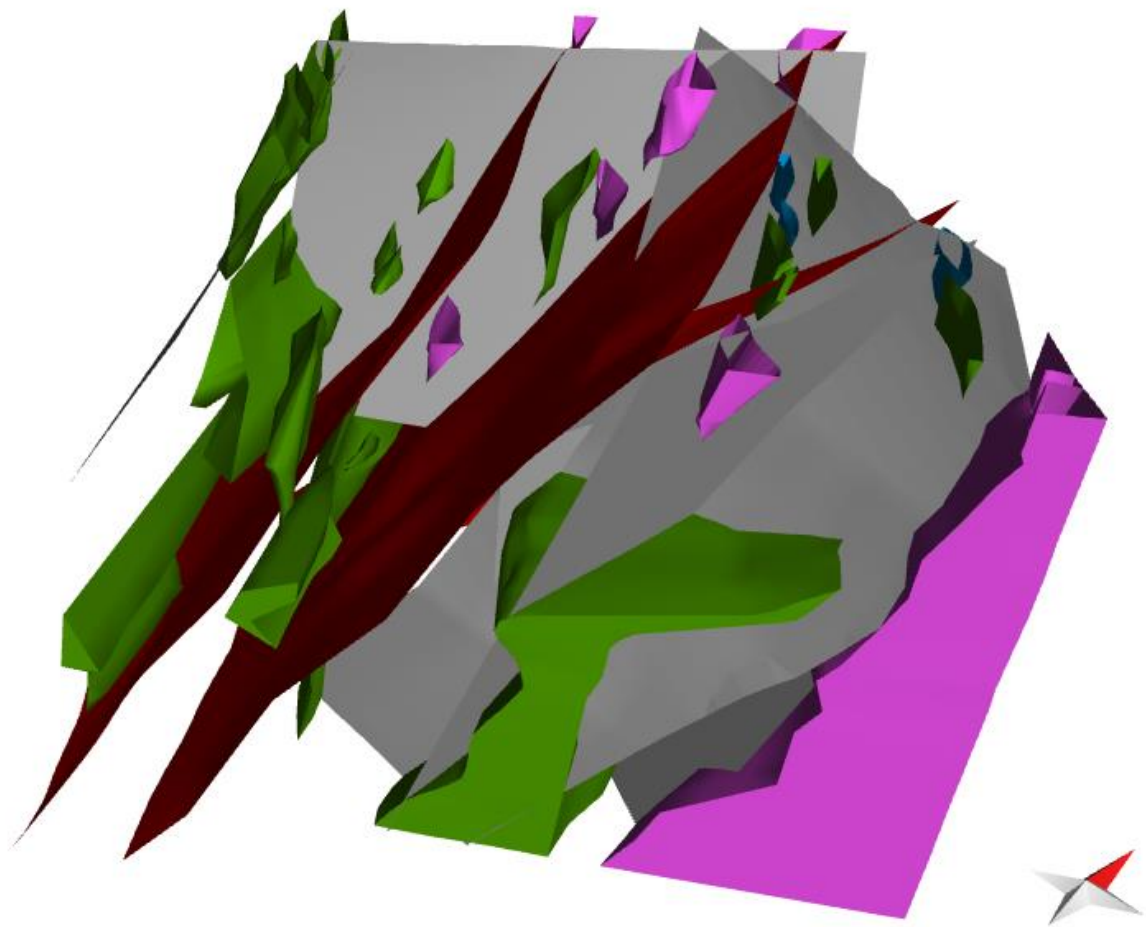
 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

Rozsahy horninových těles byly sestaveny na základě vrtné dokumentace, povrchové mapy, důlních map a vlastní dokumentace ČGS z této zakázky. Objemově nejvýznamnější horninou zastoupenou v modelu jsou pararuly. Zbýlá horninová tělesa jsou vymezena rozhraními s pararulou nebo jiným horninovým typem. Jednotlivá tělesa se skládají obvykle z dvou a více meshů. Při konstrukci modelu byla uvažována veškerá tělesa z povrchové geologické mapy, dále tělesa hornin, která v důlních mapách a dokumentacích mají mocnost 10 m a více. Vzhledem ke značné četnosti střídání litologií a jejich významné variabilitě byla tělesa o menší mocnosti zanedbána. Např. čočky erlanů jsou v modelu zastoupeny pouze při povrchu, neboť v podzemí buď zcela chybí, nebo jejich výskyty nedosahují mocnosti více než 1 m.

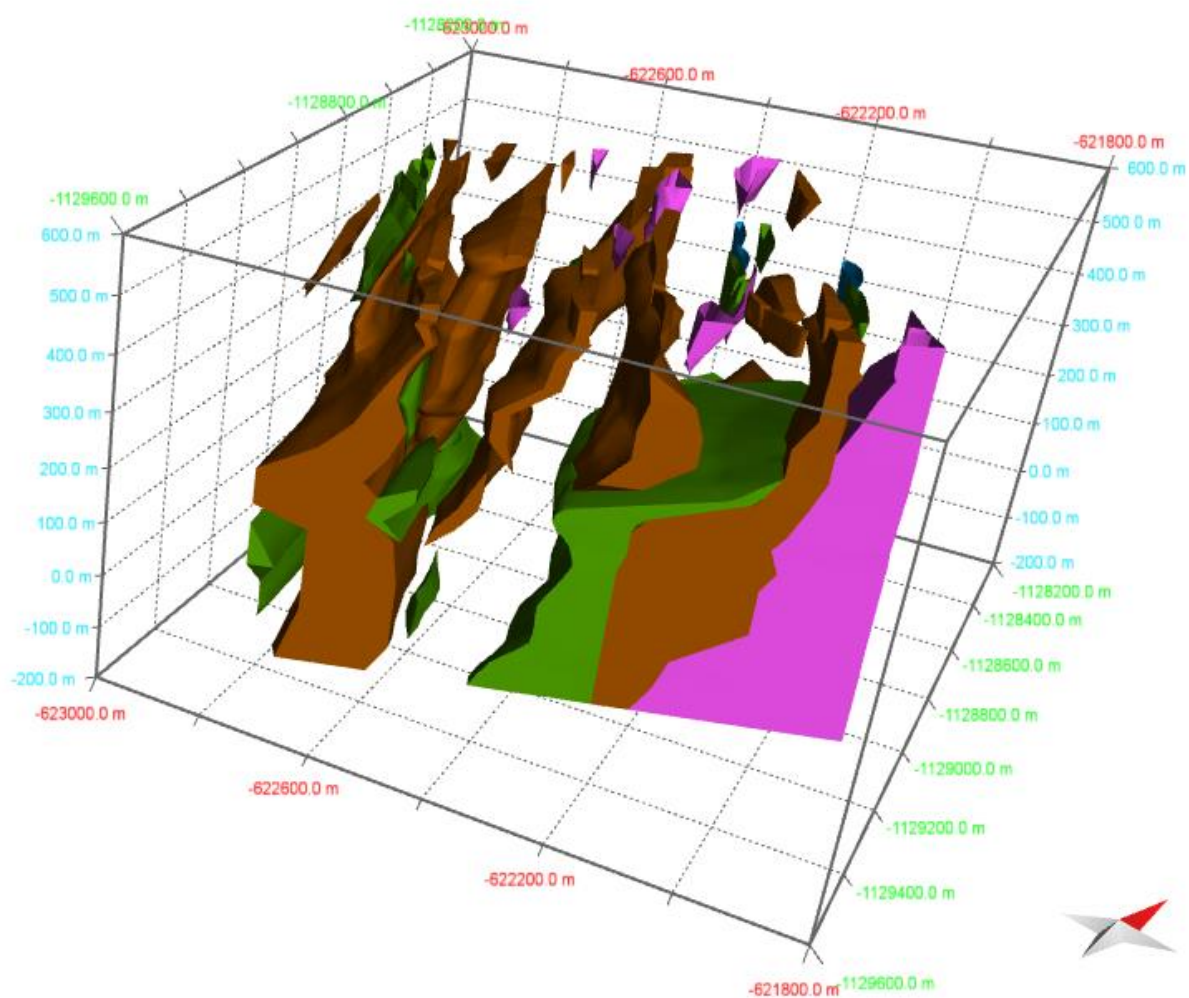
V případě významněji zastoupených migmatitů a amfibolitů, které jsou společně s pararulou v oblasti zavrásněny, spočívala tvorba těles ve sledování průběhů hranic těchto litologií v důlních mapách a ve vrtech. Vzhledem k nedostatku detailnějších podkladů v převážné části modelovaného objemu horninového masívu, a vzhledem k často nejednoznačnému petrografickému zařazení jednotlivých litologických přechodných členů, je průběh horninových těles spíše odhadnut. Dominantní sklon foliačních ploch v oblasti je strmý k ZJZ a podle toho byla také tělesa konstruována. Amfibolity a migmatity tak tvoří čočky nebo i větší tělesa protažená ve směru SSZ–JJV se strmým úklonem. Jen místy lze z důlní dokumentace vyčíst strukturní měření foliace. Celé území je dále charakterizováno heterogenním přetiskem minimálně 2 výrazných duktilních deformačních fází v měřítkách od centimetrů po minimálně vyšší desítky metrů. Ze všech těchto důvodů je komplikovaný průběh horninových těles a celkové geologické stavby oblasti v modelu spíše orientační. Ačkoli migmatity jsou v modelu zastoupeny relativně rovnoměrně, amfibolity tvoří ve východní části modelu větší těleso, jehož rozsah je ale kvůli nedostatku hloubkových dat poměrně spekulativní. V případě granulitů je v modelu několik menších čoček vytvořených na základě povrchové dokumentace a několika důlních map, rozsah většího tělesa granulitu v JV rohu modelu je stanoven pouze na základě výrazně interpretativních map DIAMO s.p. Rozsah tohoto tělesa ať již hloubkový nebo laterální není ověřen žádným vrtem ani jakýmkoli jiným způsobem.

Pro lepší orientaci je v modelu zahrnut také průběh chodeb PVP Bukov ve formě „tunelu“.

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

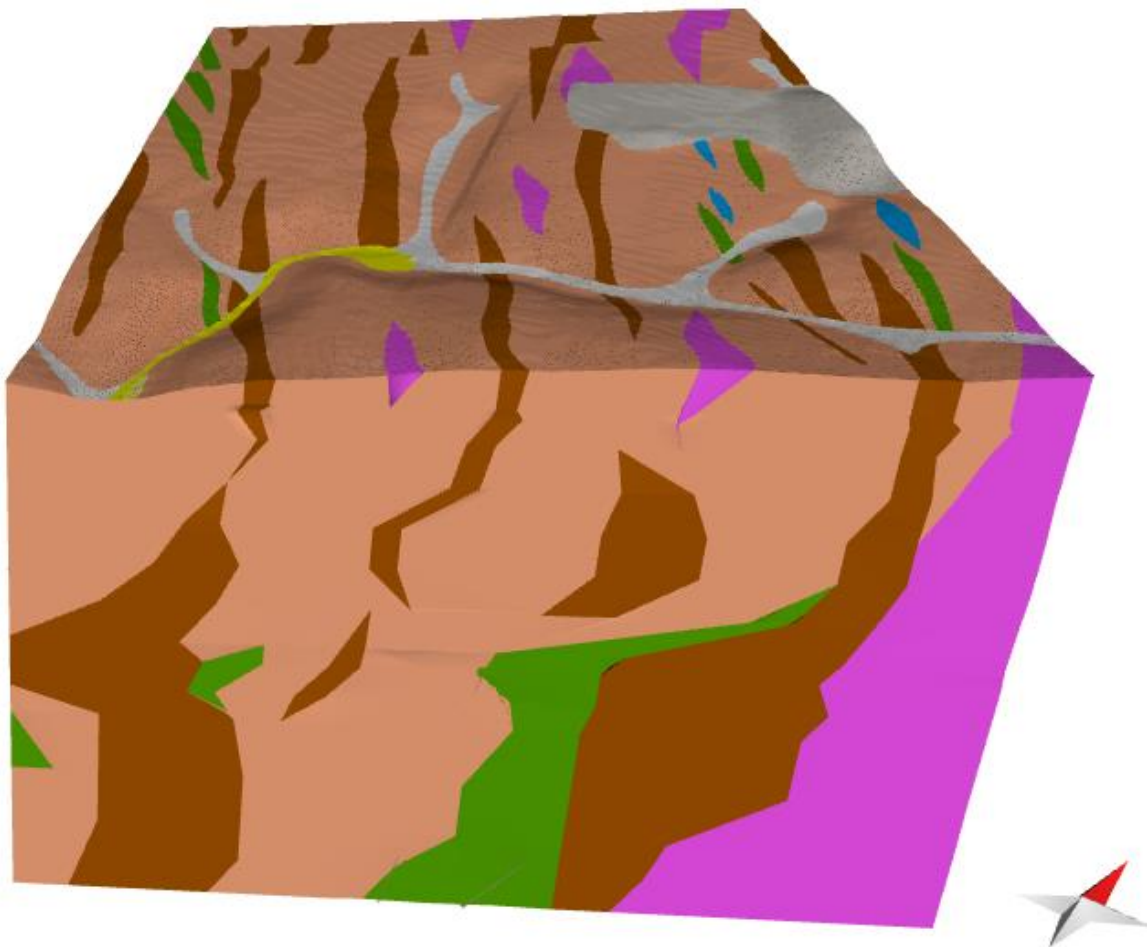


Obr. 230 Zlomy v modelu PVP (červené – významné zlomové zóny, šedé – méně významné zlomy) spolu s tělesy amfibolitů (zelené), granulitů (růžové) a erlanů (modré).



Obr. 231 Globální model PVP Bukov bez zobrazení pararul a zlomů. Hnědá – migmatity, zelená – amfibolity, růžová – granulity, modrá – erlany až krystalické vápence.

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017



Obr. 232 Výsledný globální model PVP Bukov. Běžová – pararuly, hnědá – migmatity, zelená – amfibolity, růžová – granulity, modrá – erlany až krystalické vápence, žlutá – fluviální sedimenty, šedá – splachové sedimenty a antropogenní uložení.

3.1.3 Věrohodnost globálního 3D strukturně – geologického modelu

Okolí PVP Bukov poskytuje dostatečné množství povrchových i hloubkových geologických dat k tvorbě 3D regionálního strukturně geologického modelu jen v západní části modelu. Východní část modelu je zatížena výraznou mírou nejistoty jak při povrchu, tak zejména v hlubších partiích. Míra nejistoty modelu v západní části je pak přímo úměrná kvalitě důlní dokumentace a její důvěryhodnosti. Bohužel jistou míru nedůvěry do těchto dat zanáší i fakt, že patrové důlní mapy DIAMO s.p. v měřítku 1 : 1 000 často neodpovídají digitalizovaným horizontálním geologickým řezům DIAMO s.p. Zájmová oblast je charakteristická častým střídáním litologií, které mezi sebou vytvářejí často plynulé přechody, s množstvím relativně malých horninových vložek. Pro účely tohoto modelu byly tyto litologie zjednodušeny a zanedbány v případě mocností nižších než 10 m. Z hlediska zlomových struktur lze na základě archivních dat velmi dobře charakterizovat průběh struktur především v těžené části ložiska Rožná. Rozsah nejvýznamnějších zlomů zastižených překopem B-XIIJ nelze ověřit jinými daty. Výsledný model je tak vyváženou kompilací výše uvedených dat s interpretacemi na základě znalostí strukturně geologické situace v širším okolí PVP Bukov.

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

3.2 Detailní 3D model PVP

Detailní 3D model PVP Bukov je vytvořen v prostředí software MOVE verze 2017.1 a zobrazuje rozsah podzemních prostor PVP Bukov a také data získaná v podzemí (Obr. 233; Elektronická příloha 20, Elektronická příloha 21).

Po dohodě s objednatelem prací byl model sestaven na půdorysu PVP, na který byl v daném rozsahu naložen laserscan chodeb dodaný objednatelem. Povrch chodeb ve formě laserscanu je tedy v kvalitě odpovídající dodaným datům.

Jednotlivé metráže uváděné v modelu se mohou lišit od aktuálních metráží v podzemním díle v závislosti na čase pořízení dokumentace a označení metráží na stěnách PVP.

V rámci modelu lze zobrazit velké množství informací pořízených v rámci tohoto ZL. Jsou to dle typu 3D dat následující:

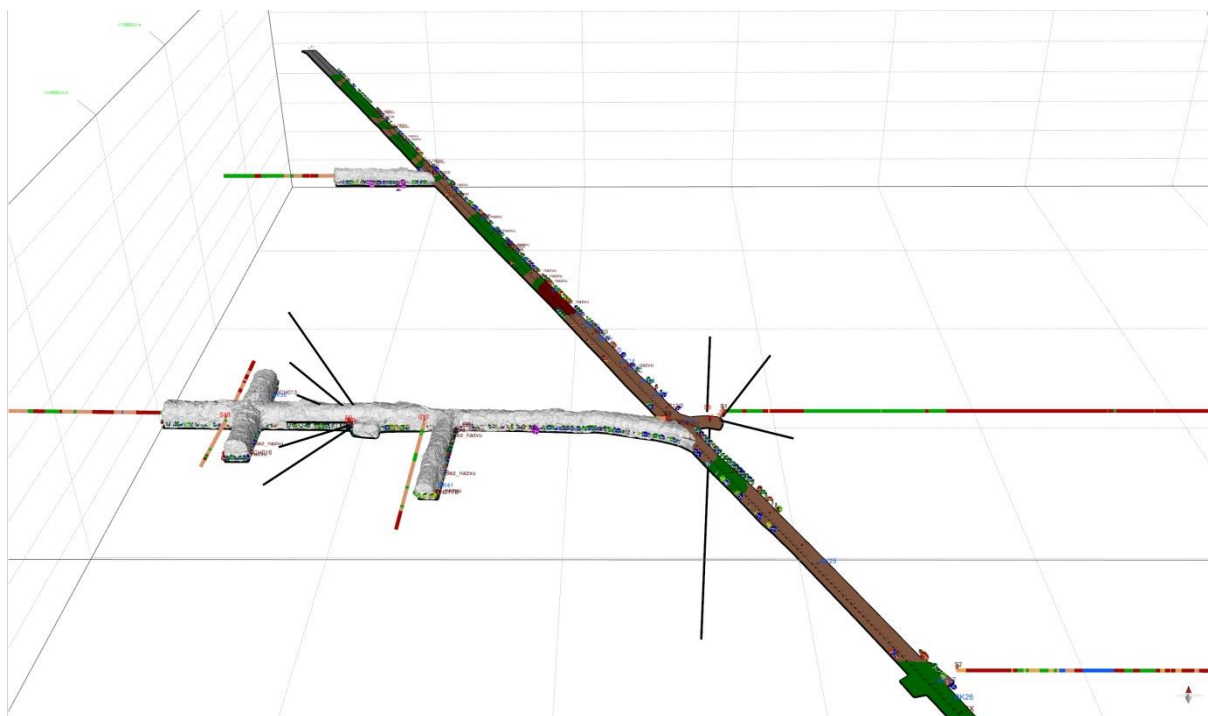
- Point data - bodová data
 - Lineations: zahrnují lineární strukturní data jako vrásové osy, lineace a AMS lineace;
 - Dips: zahrnují plošná strukturní data – tj. orientace foliací, puklin, zlomů, AMS foliace atp.;
 - Points: zahrnují umístění bodů hydrogeologické dokumentace a odběrů vzorků;
- Polyline – liniová data:
 - Půdorys PVP
 - Metráže jednotlivých rozrážek
- Polygons – polygonová data
 - Polygony znázorňující rozsah horninových typů zastižených v chodbách PVP, případně rozsah zapažených úseků chodeb, kde nebylo možné pořídit dokumentaci
- Wells – vrty
 - Zobrazuje rozsah vrtných prací v rámci PVP
- Mesh Surfaces
 - Zahrnují povrchy laserscanu rozčleněné na části díla PVP a 3D zjednodušená geologická mapa.

S modelem lze pracovat ve formátu 3D PDF, který lze otevřít v prohlížečích PDF (např. Adobe Acrobat). V takovém prohlížeči lze v modelu zobrazovat data dle typu objektu a jejich umístění, model ale nelze upravovat. Model lze také zobrazit ve formátu MVE ve freeware prohlížeči MOVE Viewer (<https://www.mve.com/software/moveviewer>). Pro účely exportu do 3D PDF musel být model kvůli rozlišení a možnosti zobrazení dat 1000 krát zvětšen. Proto jakákoli měření provedená v prohlížečích PDF je třeba přepočíst a mít toto na zřeteli. Pro podrobnější práci s modelem jej lze zobrazit v software, ve kterém byl vytvořen a to v různých verzích MOVE (Midland Valley). Pro procházení modelu a jeho jednotlivými součástmi je doporučeno používat program MOVE Viewer, pro prezentační účely pak, vzhledem k míře komprese a softwarové nenáročnosti, lépe poslouží formát 3D PDF. Atributy bodových prvků jako jsou např. strukturní měření nelze ani v jednom ze zmíněných formátů zobrazit jako atributovou tabulku. Tato funkce je nativně v obou formátech zakázána již od výrobce jako nástroj ochrany dat. Jednotlivé atributy lze nicméně v programu MOVE

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

Viewer zobrazit pomocí záložky Labels, kde lze zvolit jednotlivé atributy, které pak budou u daného prvku zobrazeny. Model lze rovněž v programu MOVE Viewer zobrazit jako 2D mapu (Obr. 236) pomocí tlačítka Map View.

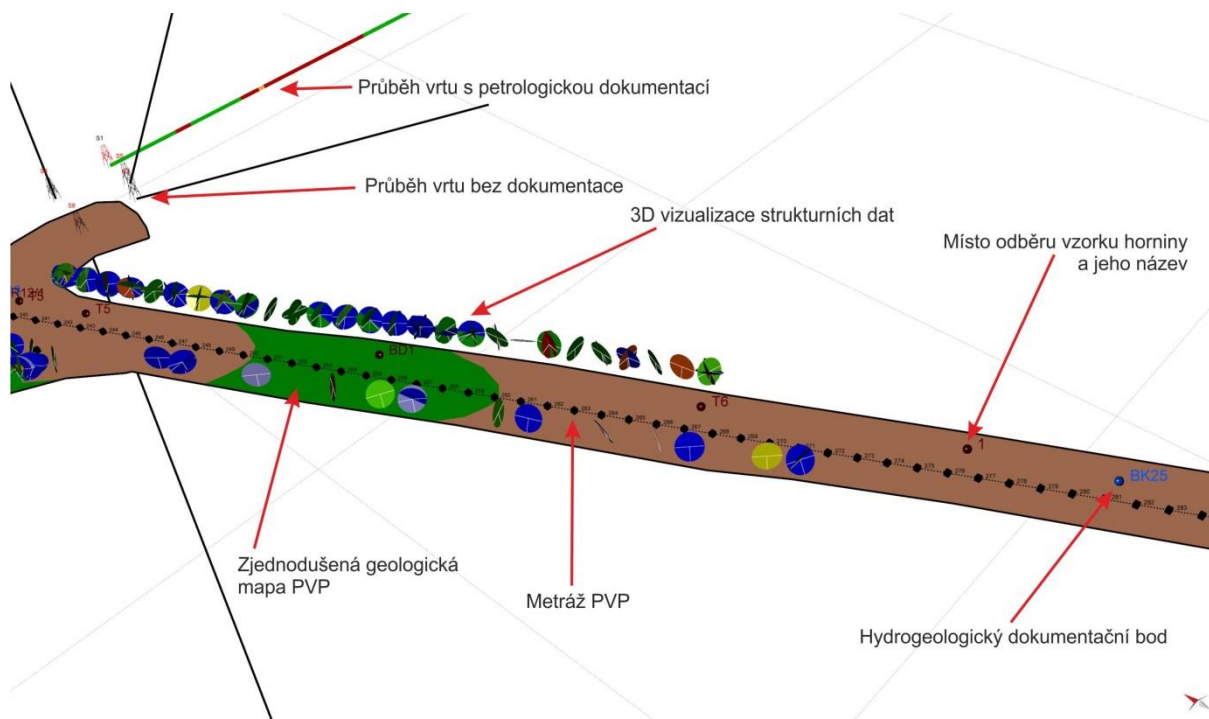
V detailním 3D modelu PVP Bukov jsou data seskupena do jednotlivých celků, např. strukturní data jsou seskupena dle jednotlivých stěn rozrážek a překopů PVP (Obr. 234). Data jsou rovněž vynášena podél stěn jednotlivých částí PVP v konstantní hloubce. Pro detailní přehled strukturních dat s jejich přesným usazením byly vytvořeny podrobné modely strukturní dokumentace ve 3D v kapitole 3.3.



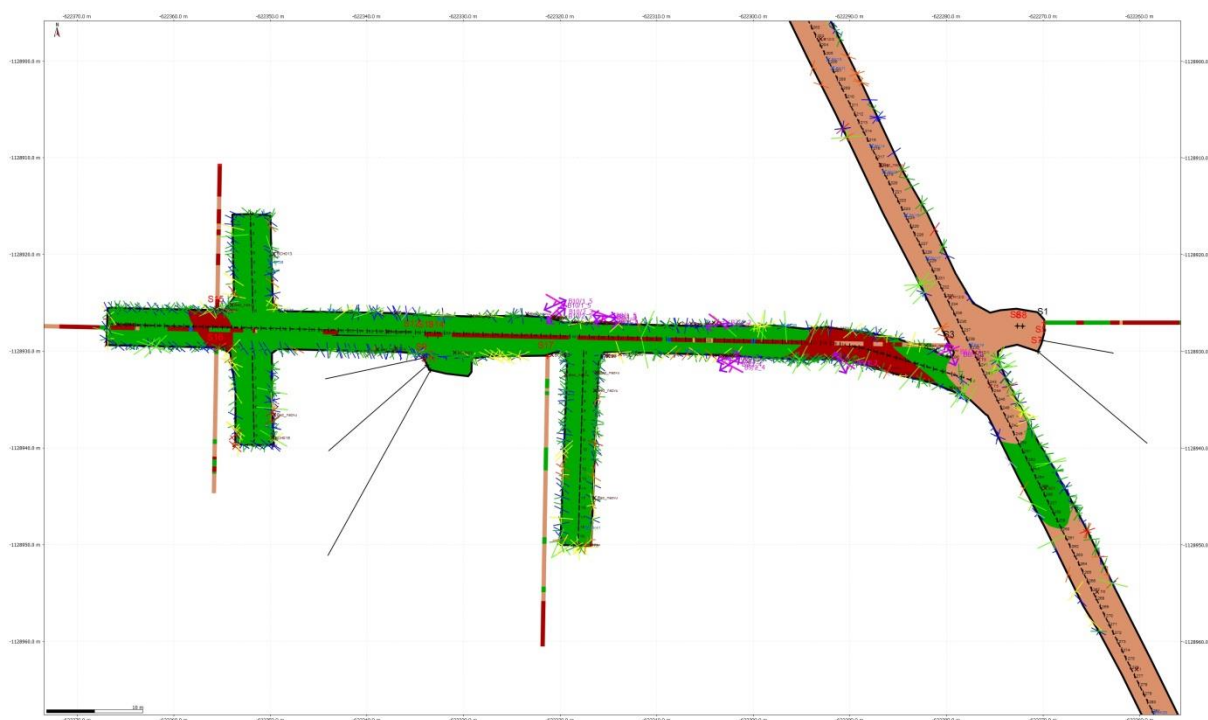
Obr. 233 Celkový pohled na detailní 3D model PVP Bukov (MOVE)

- Horizons (5)
 - amfibolit (28)
 - aplit/pegmatit/granodiorit (2)
 - migmatit (6)
 - pararula (16)
 - zapazeno (2)
- User Defined Set (27)
 - AMS_foliace (18)
 - AMS_lineace (18)
 - Hydrogeologie (30)
 - Kompletni_pudorys_PVP (1)
 - Laserscan_experimentalni_rozrazky (49)
 - Metraze_Bukov_3D_model (12)
 - Petrologie_2D (27)
 - Petrologie_3D (27)
 - SD_BZ1XII_Strukturni_mereni_celba (11)
 - SD_BZ1XII_Strukturni_mereni_jizni_stena (14)
 - SD_BZ1XII_Strukturni_mereni_severni_stena (10)
 - SD_BZXIII_Strukturni_mereni_jihozapadni_stena (10)
 - SD_BZXIII_Strukturni_mereni_severovychodni_stena (9)
 - SD_ZK1_Strukturni_mereni_celba (12)
 - SD_ZK1_Strukturni_mereni_jizni_stena (6)
 - SD_ZK1_Strukturni_mereni_severni_stena (7)
 - SD_ZK2_Strukturni_mereni_celba (15)
 - SD_ZK2_Strukturni_mereni_vychodni_stena (5)
 - SD_ZK2_Strukturni_mereni_zapadni_stena (5)
 - SD_ZK3J_Strukturni_mereni_celba (12)
 - SD_ZK3J_Strukturni_mereni_vychodni_stena (9)
 - SD_ZK3J_Strukturni_mereni_zapadni_stena (6)
 - SD_ZK3S_Strukturni_mereni_celba (8)
 - SD_ZK3S_Strukturni_mereni_vychodni_stena (6)
 - SD_ZK3S_Strukturni_mereni_zapadni_stena (6)
 - Vrty_BUKOV (17)
 - Vzorky_z_rozrazek (2)

Obr. 234 Strom uživatelsky nastavených skupin objektů v detailním modelu PVP Bukov



Obr. 235 Popis jednotlivých prvků v detailním 3D modelu PVP Bukov (MOVE)



Obr. 236 2D vizualizace části detailního modelu PVP Bukov (MOVE)

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

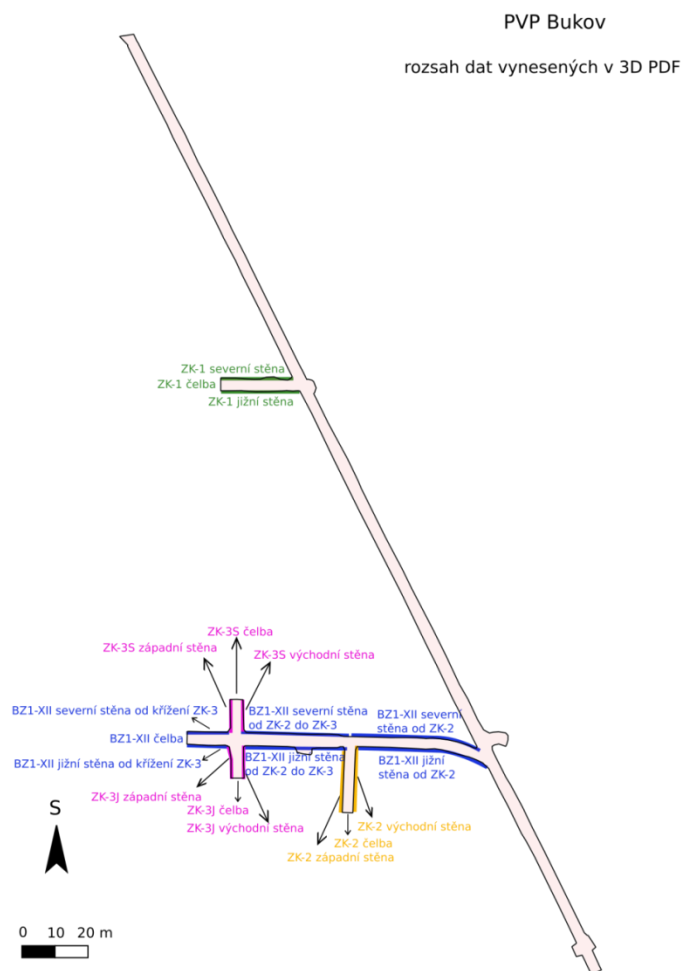
3.3 Vizualizace strukturní dokumentace ve 3D

Pro účely práce v PVP byly vytvořeny malé modely částí jednotlivých rozrážek, ve kterých jsou zobrazena strukturní data sebraná v rámci detailní podzemní dokumentace, na rozdíl od detailního modelu PVP lokalizovaná přesně na místa, kde je bylo možné identifikovat v rámci laserscanu. Data, která tyto modely zobrazují, jsou následující:

- Orientace foliace
- Orientace puklin, střížných puklin, zlomů
- Lokace odběru vzorků
- Lokace hydrogeologických bodů a odběrných míst

Ze všech dílčích modelů byl sestaven jednotný model zahrnující celé PVP. Dílčí části jsou rozčleněny dle níže uvedeného schématu (Obr. 237).

Všechny modely jsou vytvořeny v MOVE verze 2017.1 (Obr. 238; Elektronická příloha 22, Elektronická příloha 24). Ke každému z modelů jsou vytvořeny exporty v 3D PDF a k tomu příslušející atributové tabulky zobrazených dat (Obr. 239; Elektronická příloha 23, Elektronická příloha 25). Pro účelnou práci s těmito daty jsou pak zejména jednotlivé pukliny a zlomy očíslovány a v atributové tabulce k nim lze dohledat údaje o jejich orientaci, výplni, její mocnosti, přítomnosti striací, případně další poznatky získané v podzemí.



Obr. 237 Schéma rozmístění jednotlivých modelů se strukturními daty ve formátu 3D PDF a MVE

[illegible]

280

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

3.4 3D geomechanický model

3.4.1 Tvorba 3D geomechanického modelu v prostředí Midas

V lednu 2016 byl dokončen a předán 3D strukturně geologický model zpracovaný v programu MOVE zahrnující údaje o průběhu povrchu terénu, geologických rozhraních, zlomech, puklinových systémech, hladině podzemní vody atd. Uvedené jednotlivé entity (plochy vymezující rozhraní hornin, zlomy, puklinové systémy apod.) byly dle dohody exportovány do samostatných souborů formátu dxf a datových souborů ve formátu *.xls.

Strukturně geologický 3D model byl dále zpřesňován, s ohledem na časovou náročnost a posloupnost jednotlivých prací byl do 3D geomechanického modelu použit stav 3D strukturního modelu odpovídající znalostem a vyhodnocení výsledků k březnu 2016. S ohledem na samotný princip numerického modelování však tato skutečnost, jak bude dokladováno dále v textu, nemá zásadní vliv na stanovený cíl numerického modelování, tj. zhodnocení vlivu provedeného podzemního díla na stabilitu horninového masivu a stanovení pravděpodobného dosahu deformací od raženého díla.

Na základě jednání řešitelského týmu a zástupce zadavatele zahrnuje 3D geomechanický model oblast vlastních podzemních prostor budované laboratoře a přístupové chodby v délce cca 150 m a horninový masiv v takovém rozsahu, aby okraje modelu neovlivňovaly modelovaný proces, tedy zónu ovlivnění podzemním dílem navýšenou o bezpečnostní přesah. Oblast řešeného 3D geomechanického modelu pak odpovídá kvádru o hranách 300(X)x500(Y)x150(Z) m. Přesná lokalizace 3D geomechanického modelu je určena souřadnicemi v systému JTSK, viz Tab. 70. V této oblasti jsou zastoupeny 3 typy hornin, a to A – amfibolit až biotitický amfibolit, M – stromatitický biotitický až amfibol biotitický migmatit a g – biotitická až amfibol biotitická pararula.

Pro řešení úkolu byl použit pouze jediný software Midas GTS NX verze 2014 v2.1, produktové číslo dle certifikátu U001-09078 ze dne 15.12.2014 Software byl vybrán na základě provedené rešerše dostupných výpočetních softwarů, tak, aby nejlépe vyhovoval cílům řešeného úkolu. V užším kole byly hodnoceny výpočetní programy zaměřené na geotechniku, mechaniku hornin a zemin s možností univerzálnějších řešení v oboru s variabilitou konstitučních vztahů (FLAC 3D, PLAXIS 3D, MIDAS GTS a CESAR LCPC). Kritérii hodnocení pro výběr softwaru byly zejména požadavky na možnost přenosu dat z programu MOVE, import CADovských struktur, uživatelská příjemnost, úroveň grafických výstupů, v další řadě pak vybavení konstitučními vztahy, tester laboratorních zkoušek a v poslední řadě cenová dostupnost softwaru.

Tab. 70 Vymezení 3D geomechanického modelu v souřadnicích S-JTSK

osa	od	do	posun - přepočet do počátku
X	-622 200	-622 500	X + 622 200
Y	-1 128 500	-1 129 000	Y+1 128 500
Z (m n. m.)	-50	100	-

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

Vzhledem k tomu, že bylo nutné datové soubory jednotlivých entit nejdříve upravit, byly s ohledem na velký rozsah dat pro přenos nakonec použity datové soubory ve formátu *.xls – mračna bodů. Úpravy jednotlivých entit spočívaly v posunu souřadnic do počátku a zmenšení souborů na části odpovídající oblasti 3D geomechanického modelu. Ve vymezeném rozsahu modelu se pak jednalo o úpravy ploch označených jako M18C tvořící rozhraní stromatitických biotitických až amfibol-biotitických migmatitů a amfibolitů a plochy A10C rozhraní amfibolitů a biotitických až amfibol biotitických pararul a 4 zlomových struktur. Na základě přenosu celkem 6 entit bylo v 3D geomechanickém modelu vyčleněno 6 bloků migmatitů (M1-M6), 7 bloků amfibolitů (A1-A7) a 5 bloků pararul (P1-P5), které tvořily jednotlivé celky pro vygenerování sítě konečných prvků. V místě rozrážky BZ-XIIJ ve staničení cca 140-170 m a rozrážky ZK-1 ve staničení 8-10 m protíná dílo výrazná zlomová struktura (směr sklonu spádnice 230/sklon spádnice 65). Mocnost porušené zóny v místě průstupu díla v modelu činí okolo 1 m. Struktura protíná výpočetní 3D geomechanický model v celé jeho šířce v úhlu 50° od osy x. Pro potřeby sestavení 3D geomechanického modelu, zejména z hlediska vygenerování sítě konečných prvků byla tato struktura mocnosti 1 m geometricky modelována v celé šířce rozsahu modelu, avšak pouze v odpovídajících partiích byly zavedeny snížené hodnoty fyzikálně-mechanických parametrů hornin. V ostatních částech – vygenerovaných blocích - byly přiřazeny parametry příslušné předpokládanému typu horniny. Geometrie základního geologického modelu po přenosu do programu MIDAS je patrná z Obr. 240.

Na základě výsledků měření fyzikálně-mechanických vlastností zájmových hornin (UGN v rámci tohoto projektu) zpracovaných v roce 2015 byla stanovena základní sada vlastností materiálů (viz Tab. 71) a na ní provedena analýza in situ, tj. stanovení primární napjatosti neporušeného masivu. Tato analýza slouží k testování modelu, tj. ověření správnosti geometrie, vygenerování sítě konečných prvků, kontrole správnosti stanovení vstupních údajů apod. Výsledky této analýzy, respektive hodnoty napětí masivu, jsou výchozím vstupem pro modelování vlivu realizace výrubu na napjatost masivu.

Tab. 71 Fyzikálně-mechanické vlastnosti hornin (výpočetní parametry)

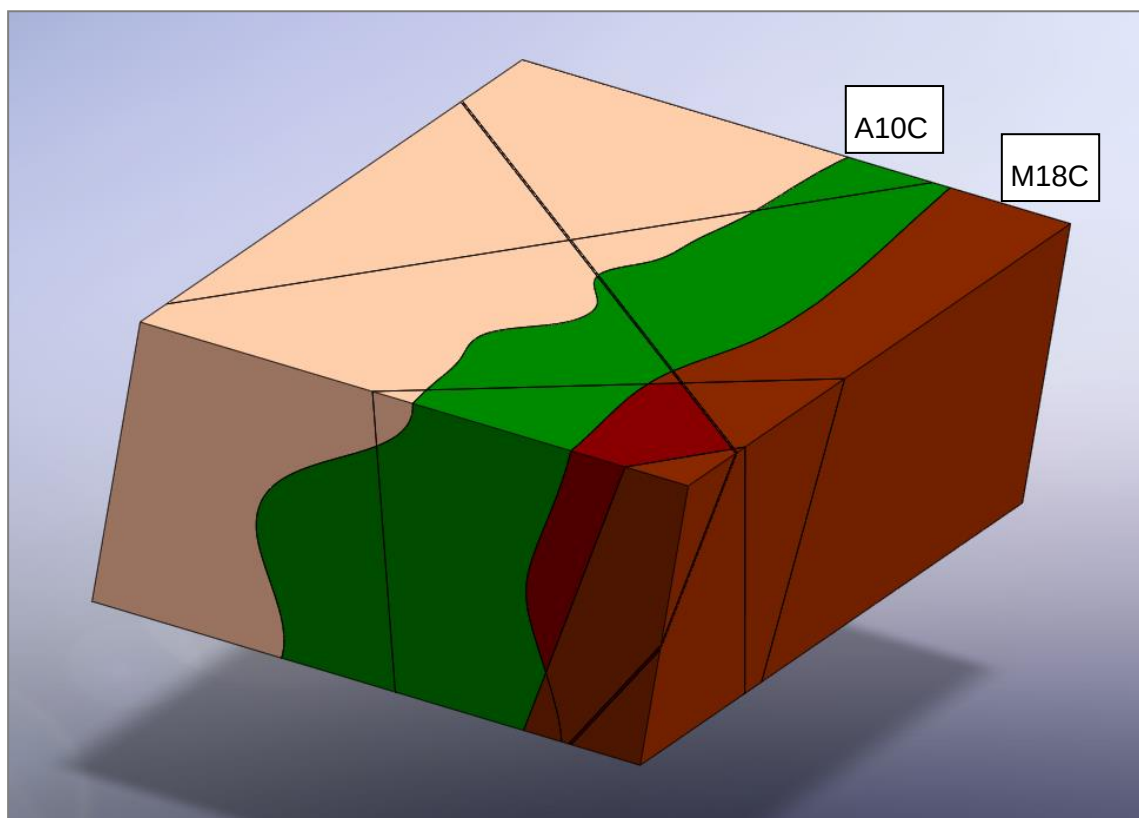
Hornina	γ (kN/m ³)	E_e (GPa)	ν
A - amfibolit	29,02	49,2	0,16
M - migmatit	27,02	38	0,13
g - pararula	28,3	20	0,22

Vysvětlivky k tabulce Tab. 71

γ – objemová tíha

E_e – modul pružnosti

ν -poissonova konstanta



Obr. 240 Model horninového prostředí (300x500x150 m)

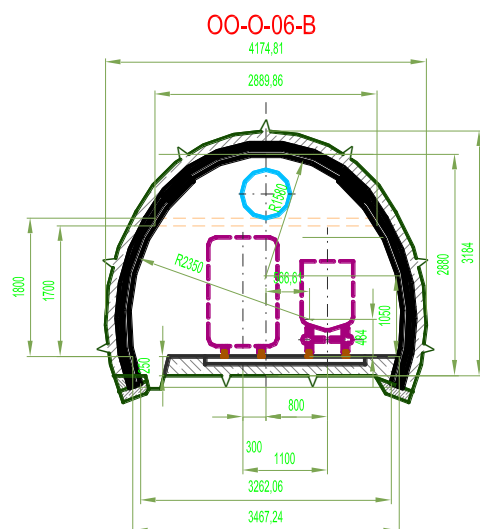
Vysvětlivky k Obr. 240

- | | |
|---|--|
|  | g – pararula (biotitická až amfibol-biotitická pararula místy migmatizovaná) |
|  | A – amfibolit (amfibolit až biotitický amfibolit) |
|  | M – migmatit (stromatitický biotitický až amfibol-biotitický migmatit místy s polohami migmatizovaných amfibolů) |
|  | zlomy, rozhraní hornin |

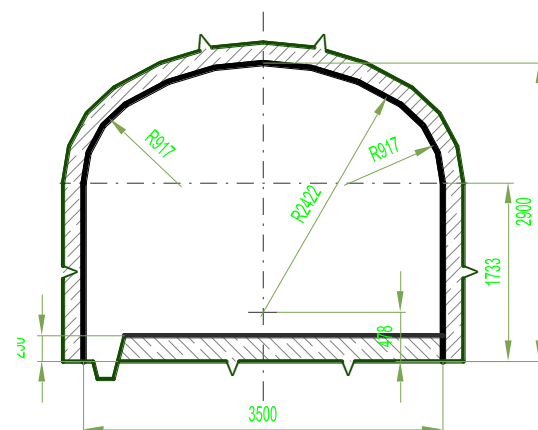
Pozn. Dále v textu je již uváděno jen zjednodušené souhrnné označení hornin, tj. pararula, amfibolit, migmatit.

Základní sada fyzikálně-mechanických vlastností zájmových hornin byla průběžně konfrontována s výsledky dalších doplňujících zkoušek. Vzhledem k tomu, že v geomechanickém modelu nebyly vyčleněny další podskupiny hornin, byla nakonec pro finální analýzy použita tato původní sada. Hodnoty stanovených parametrů hornin odpovídají reprezentativním průměrným hodnotám pro modelované prostředí. Hodnoty použité ve výpočtech jsou spíše konzervativnější než nově zjištěné skutečnosti, výpočty jsou provedeny tedy spíše na straně bezpečnosti.

Do sestaveného otestovaného 3D geomechanického modelu horninového prostředí byla vložena geometrie vyražených podzemních prostor. Jednotlivé štoly byly raženy ve dvou typech profilů. Přístupová chodba – rozrážka BZ-XIIJ byla ražena v profilu o světlé ploše 9,5 m², ostatní rozrážky jsou pak provedeny v profilech o světlé ploše 8,5 a 13,5 m² (viz Obr. 241).

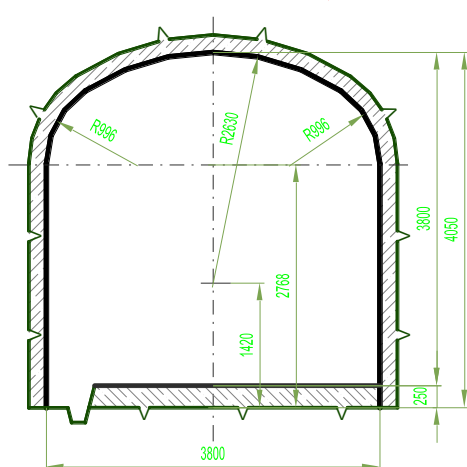


SVĚTLÝ PROFIL 8,50 m²



a)

SVĚTLÝ PROFIL 13,50 m²



b)

c)

Obr. 241 Profily výrubu a) BZ-XIIJ, b) BZ1-XII, ZK-1, c) ZK-2, ZK-3S, ZK-3J

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

Výkresy profilů výrubů byly předány ve formě cad. Tyto soubory byly dále upraveny, aby je bylo možné použít pro přenos tvaru výrubu do programu MIDAS. Celé modelované podzemní dílo bylo vloženo pomocí souřadnic jednotlivých bodů os rozrážek. Souřadnice bodů os jednotlivých rozrážek odečtené z cad-výkresů podzemního díla byly přepočteny k počátku stejnou metodikou jako jednotlivé entity při přenosu 3D strukturně-geologického modelu. Do příslušných bodů v ose rozrážky pak byly vkládány geometrie výrubů (formát dxf 2D wireframe). Takto přenesené plochy výrubů byly dále pomocí funkce programu MIDAS (extrude) aplikované na úsecích příslušné délky odpovídající kroku postupu ražby, či dalších zvolených pomocných bodů.

Z důvodu lepší konvergence výpočtu podmíněné vygenerováním adekvátní funkční sítě konečných prvků výpočetního modelu byly provedeny jisté úpravy a zjednodušení při modelování tvaru skutečných výrubů.

Boční rozrážky, ZK-1, ZK-2, ZK-3S, ZK-3J a překop BZ1-XII byly modelovány větším světlým profilem (Obr. 241c) než samotná chodba – rozrážka BZ-XIIJ, pro kterou je v modelu použit profil menší, b). Tato úprava umožnila snazší vyřešení modelu napojení jednotlivých rozrážek a tím minimalizaci vzniku tvarově nevhodných prvků sítě. Použitý tvar výrubu pro rozrážku BZ-XIIJ ve výpočtu lze z hlediska statického působení považovat za méně příznivý než skutečný, tudíž provedené výpočty jsou na straně bezpečnosti. Pro vyřešení modelu plynulého přechodu vyššího profilu do nižšího, tj. ZK-1 do BZ-XIIJ a BZ1-XII do BZ-XIIJ, bylo v přechodové části, tj. cca na úseku do 10 m boční rozrážky od osy hlavní rozrážky, použito funkce předdefinované v software MIDAS (loft). Tato funkce automaticky propojí obrysy dvou různých profilů do plynulého tělesa na dané vzdálenosti. Jsme si vědomi toho, že použitá metodika tvorby modelu podzemního díla může způsobit jisté odlišnosti od skutečného tvaru provedeného výrubu. Avšak vzhledem k velikosti celého 3D geomechanického modelu jsou drobná zkreslení rozsahu výrubu v řádu několika cm či i desítek cm, nepodstatná. Jak již bylo uvedeno, pro sestavení funkčního výpočetního modelu je nutné provést jistá zjednodušení v geometrii modelu, která umožní vygenerování sítě konečných prvků a vede ke konvergenci prováděných numerických analýz. Navíc ani přesné zaměření tvaru výrubu celého podzemního díla nebylo v době tvorby modelu k dispozici.

Model výrubu je rozdělen na dílčí části odpovídající postupu ražby (viz červené čáry na Obr. 242). Podružné dělení rozrážek potom připadá na vložené pomocné body, které byly použity pouze za účelem co nejpřesnějšího dodržení geometrie výrubu v modelu (viz modré čáry na Obr. 242). Vložený model podzemního díla byl dále rozdělen příslušnými plochami rozhraní hornin a puklinových systémů (viz Obr. 243).

Výrub přístupové chodby BZ-XIIJ je zajištěn pomocí ocelových výztužných prvků v kombinaci se stříkaným betonem. U ostatních rozrážek a překopu je zajištění pomocí svorníků a stříkaného betonu. V numerické analýze bylo ostění modelováno pomocí 2D prvku - skořepiny s ohybovou tuhostí danou mocností vrstvy a fyzikálně mechanickými vlastnostmi materiálu ostění (viz Tab. 72), v kalotě a opěří činí modelovaná mocnost ostění 0,2 m, ve dně pak 0,25 m.

Tab. 72 Fyzikálně-mechanické vlastnosti materiálů (výpočetní parametry)

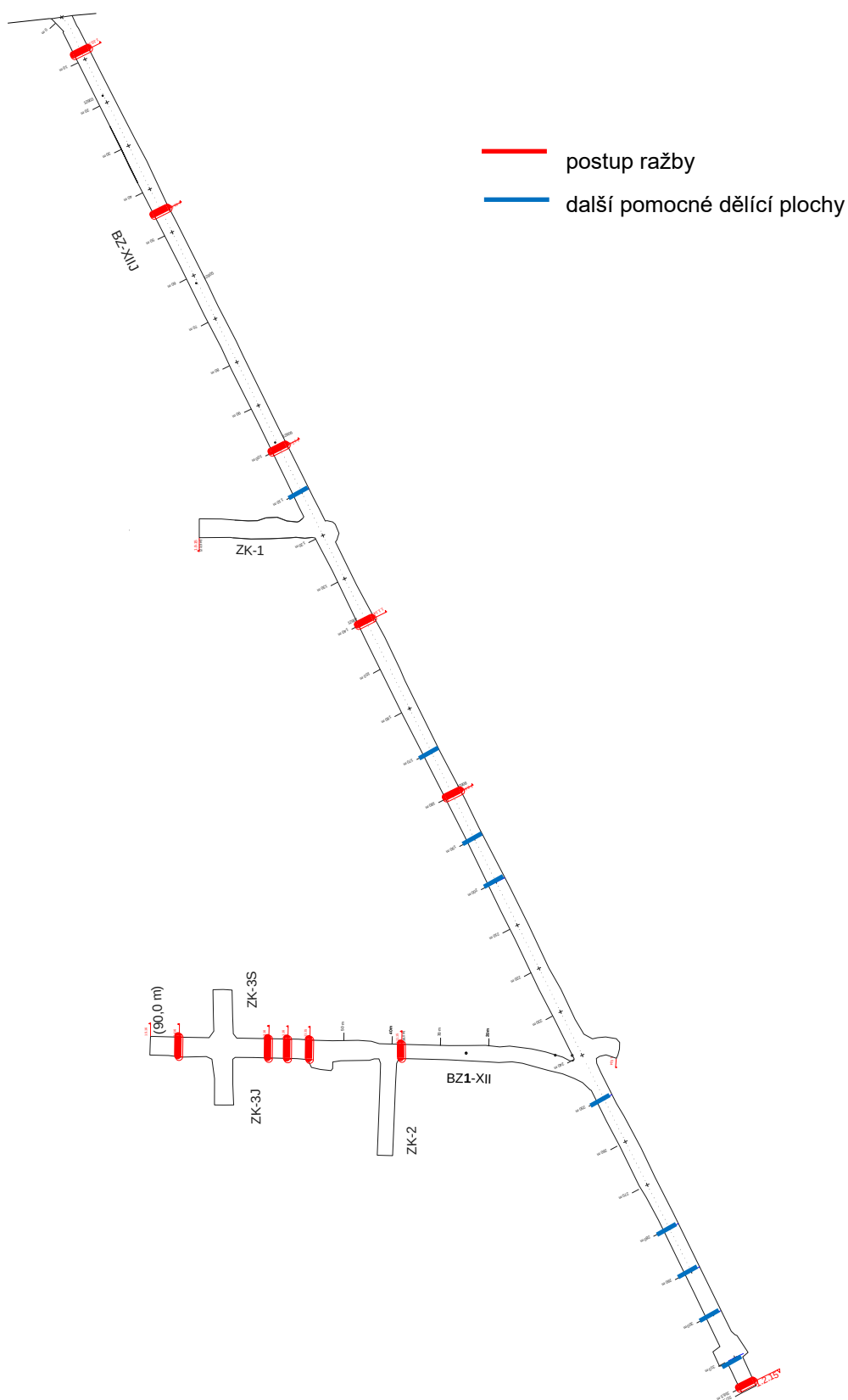
materiál	E_e (MPa)	ν	γ (kN/m ³)
ostění – stříkaný beton	1,5 E+07	0,2	24

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

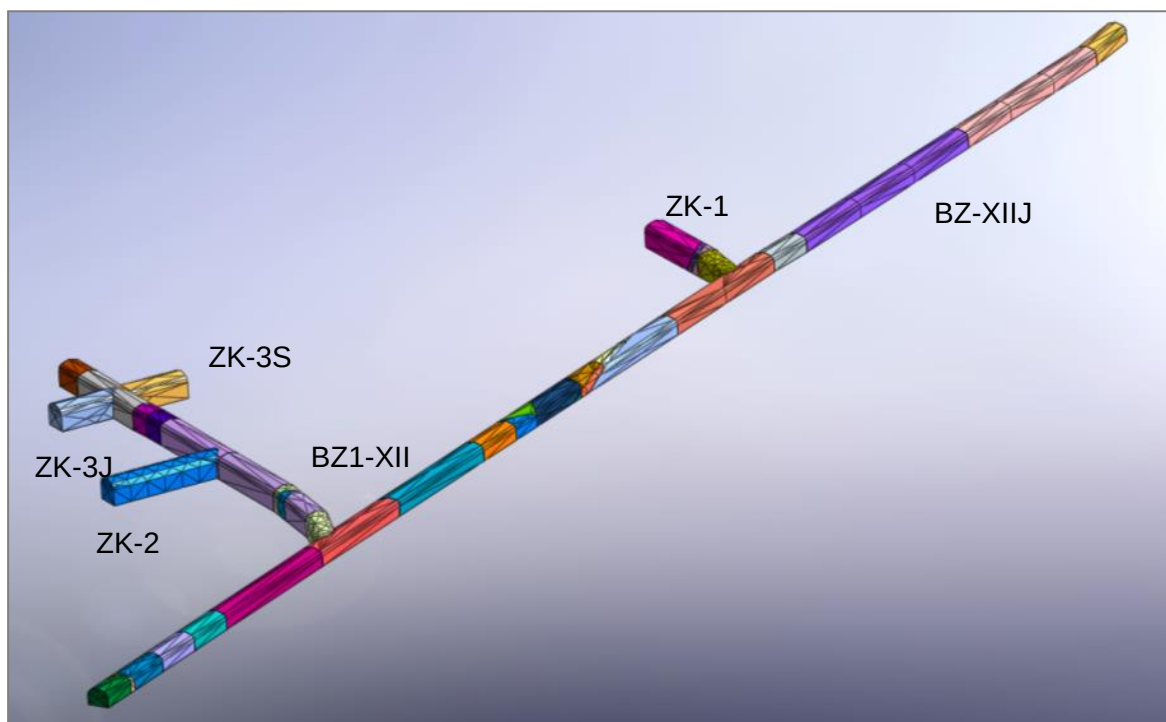
Jednotlivé úseky podzemního díla byly pro potřeby orientace v modelu označeny názvem rozrážky a příslušným staničením, např. BZ-XIIJ-0-10. V případě průniku rozhraní hornin či puklinového systému daným segmentem bylo použito ještě dílčí číslování vzniklých úseků např. BZ-XIIJ-140-170 (1). Poslední dělení vybraných segmentů pak podléhalo pravidlům tvorby sítě konečných prvků, tj. bylo nutné rozdělit partie „nevhodných tvarů“ na části přijatelné pro tvorbu sítě konečných prvků.

Síť konečných prvků byla generována postupně od vzniklých nejmenších segmentů podzemního díla, přes oblast porušené zóny až po samotné bloky jednotlivých hornin. Pro samotné podzemní dílo a okolí výrubu bylo použito jemnější členění sítě než na okraji modelu. Velikost nejmenších elementů podzemního díla v místě porušené zóny činí 0,5 -1 m, zatímco rozměry prvků u vzniklých horninových bloků na okraji modelu daleko za dosahem podzemního díla jsou až 31 m. 3D geomechanický model s vygenerovanou sítí konečných prvků je patrný z Obr. 244 a Obr. 245. Členění na jednotlivé bloky hornin vzniklo zohledněním zlomových struktur v modelu, např. masiv amfibolitu je rozdělen do 7 bloků označených jako A1-A7, pararula do 5 bloků: P1-P5 a migmatit do 6 bloků: M1-M6, a umožňuje zadání odlišných mechanicko-fyzikálních vlastností hornin v daných blocích, např. v závislosti na přítomných puklinových systémech apod. Vzhledem k tomu, že z časových důvodů byl pro tvorbu modelu použit geologický strukturní model z března 2016, nebylo již možné novější poznatky o tektonické stavbě v modelu uplatnit. Avšak z hlediska samotného principu numerického modelování nemá tato skutečnost zásadní vliv na cíle numerického modelování, tj. zhodnocení vlivu provedeného podzemního díla na stabilitu horninového masivu a stanovení pravděpodobného dosahu deformací od raženého díla.

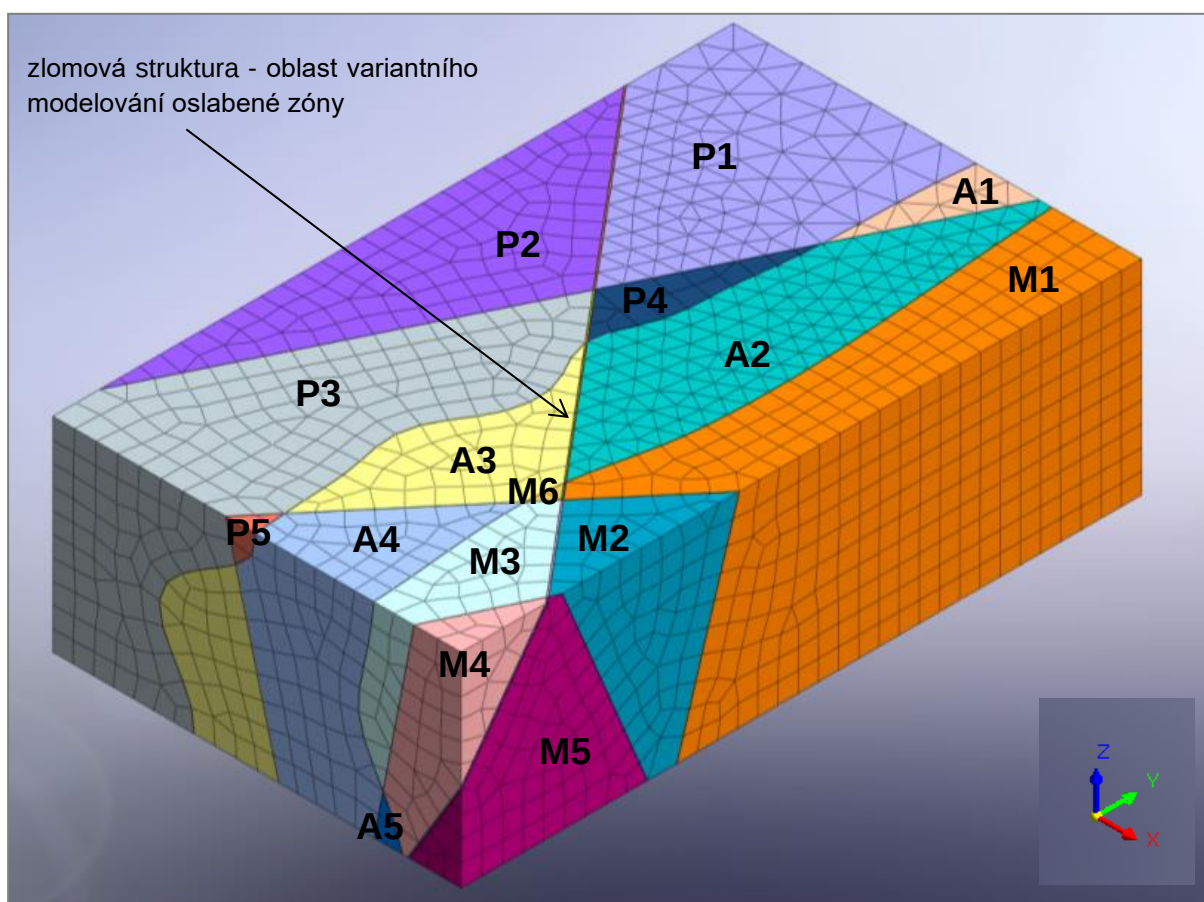
Podrobněji je tato tematika rozebrána v následující kapitole v programu a metodice prováděných analýz.



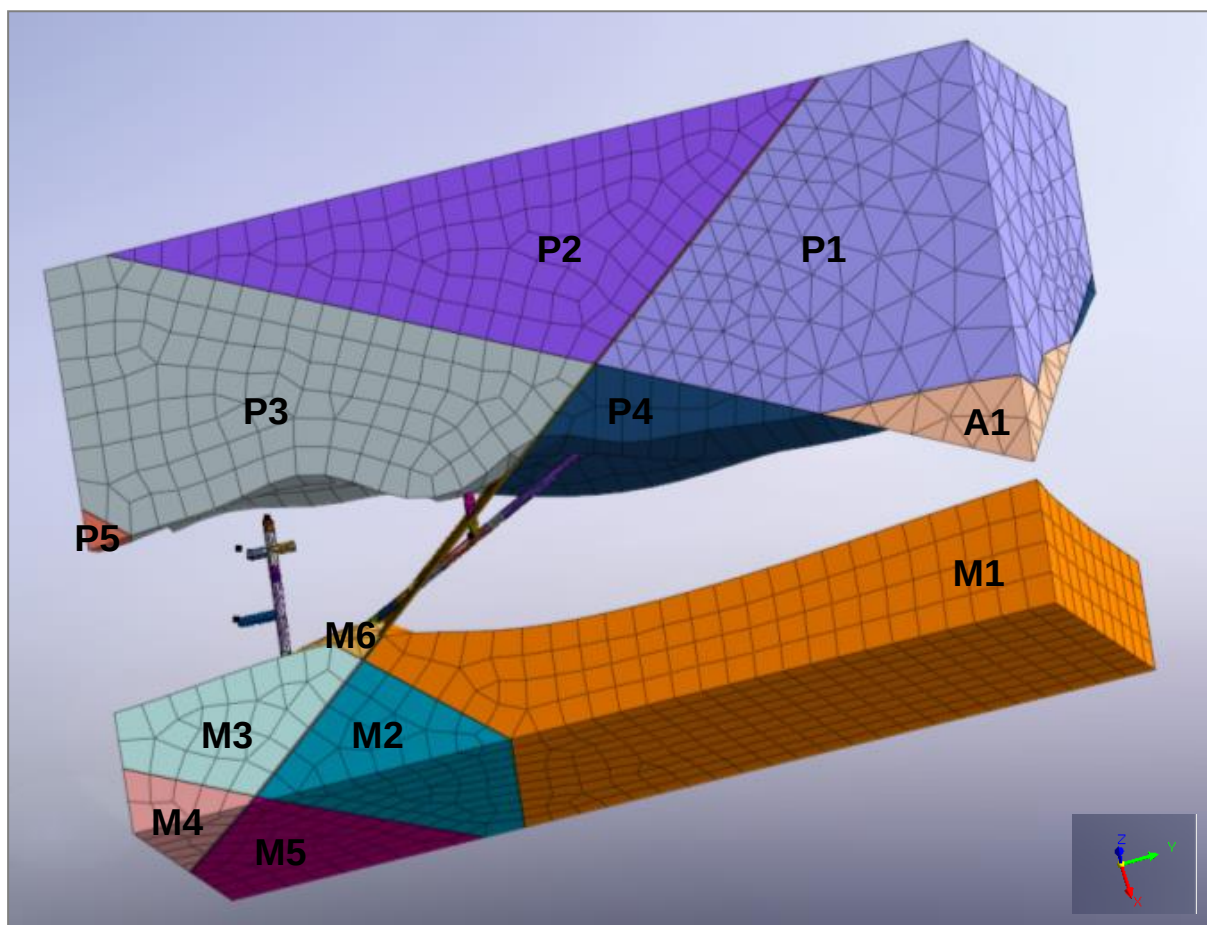
Obr. 242 Schéma členění rozrážek ve výpočetním modelu



Obr. 243 Pohled na 3D model výrubu (jednotlivé segmenty odpovídají členění dle modrých a červených čar dle Obr. 242, včetně zohlednění rozhraní hornin a zlomových struktur viz Obr. 244, barvy jsou generovány náhodně)



Obr. 244 Schéma vygenerované sítě konečných prvků s členěním dle typu hornin a zlomových, puklinových systémů (pararula P1-P5, amfibolit A1-A7, migmatit M1-M6)



Obr. 245 Pohled na model horninového prostředí s podzemním dílem shora

3.4.2 Metodika provedených analýz

Za účelem modelování vlivu výrubu na napjatost horninového masivu, zhodnocení vlivu provedeného podzemního díla na stabilitu horninového masivu a stanovení pravděpodobného dosahu deformací od raženého díla a posouzení účinků seismického zatížení na stabilitu horninového masivu s podzemním dílem byl sestaven následující postup analýz:

- in situ
- napěťo-deformační analýza (variantně)
- dynamická analýza

Analýza „in-situ“

Jak již bylo uvedeno analýza in-situ slouží ke stanovení primární napjatosti horninového masivu. Mechanicko-fyzikální vlastnosti hornin jsou popsány lineárně-elastickým konstitučním vztahem (parametry viz Tab. 71 v kapitole 4.3.1). Napětí in-situ jsou stanovena na základě vlastní objemové tíhy hornin a případně koeficientu bočního tlaku K_0 ($K_0 = \sigma_h / \sigma_v$, tj. horizontální napětí/vertikální napětí). V rozsahu 3D geomechanického modelu se terén území pohybuje v nadmořských výškách cca 513,5–541 m n. m., zatímco horní hrana modelu odpovídá nadmořské výšce 100 m n. m. Je tedy nutné započítat i vlastní tíhu nadloží mocnosti 413,5–441 m. S ohledem na rozdílnou mocnost nadloží modelu a různé

objemové hmotnosti hornin pak tíha nadloží vyvozuje tlak na horní hranu modelu v rozmezí hodnot cca 10 751-12 789 kPa. Po otestování vlivu modelování tíhy nadloží byla pro další série analýz použita analýza in-situ s cca průměrnou hodnotou přitížení od nadloží 11 770 kPa.

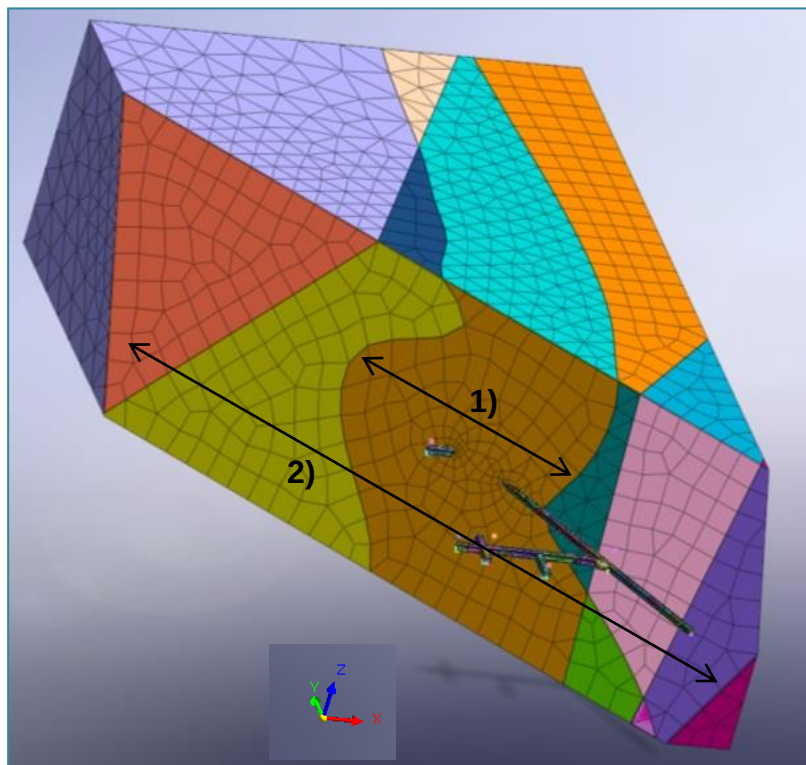
Napěťo-deformační analýza

Je stěžejní analýzou pro stanovení vlivu realizace výrubu na napjatost horninového masivu a zjištění předpokladu dosahu a velikosti případných deformací masivu v okolí výrubu.

Jak již bylo uvedeno, štolu BZ-XIIJ a ZK-1 protíná zlomová struktura, kdy mocnost porušené zóny činí okolo 1 m. Vzhledem k tomu, že nebyl k dispozici dostatečný soubor laboratorních zkoušek pro horninu v této porušené zóně, byly fyzikálně-mechanické vlastnosti porušené horniny zavedeny do výpočtu variantně (viz Tab. 73). Variantně byl rovněž modelován rozsah poruchy mimo podzemní dílo, a to 1) pouze v oblasti vzniklého přilehlého bloku k podzemnímu dílu (dáno velikostí bloku pro tvorbu sítě) a 2) v plném rozsahu v celé šíři geomechanického modelu (viz Obr. 246). Avšak lze spíše předpokládat, že vzhledem k velmi malému rozměru výrubu vůči modelu (průměr tunelu je setina šířky modelu) se již vliv rozsahu poruchy na vlivu realizace výrubu na napjatost a deformace masivu v okolí podzemního díla dále neprojeví.

Tab. 73 Výpočetní parametry pro porušenou zónu (parametrická studie)

γ (kN/m ³)	E_e (GPa)	ν
25	5	0,33
	10	0,3
	15	0,28
	18	0,25



Obr. 246 Schéma variant modelu porušené zóny

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

Vzhledem k předpokládané vyšší propustnosti porušené zóny byla tato modelována nejen jako suchá, ale i plně zvodnělá, tj. bylo modelováno vystavení pórového tlaku v porušené zóně na plnou výšku modelu.

Výsledky provedených analýz byly srovnávány s veličinami měřenými in-situ. V provedeném podzemním díle byly zrealizovány čtyři konvergenční stanice, KS-1 v BZ-XIIJ 200-205 m, KS-2 v BZ-XIIJ 260-269 m, KS-3 v BZ1-XII 53-61 m a KS-4 v křížení BZ1-XII a ZK-3J. U KS-1 a KS-2 se generelní vývoj hodnot konvergencí za celé období měření v subhorizontálních směrech pohybuje v intervalu -0,5 mm až -2,5 mm, tj. dochází ke zkrácení záměr. U KS-2 byla ojediněle zaznamenána i kladná hodnota, kdy na záměře v opěří profilu 1 došlo k prodloužení záměry o 1,5 mm, tj. indikace posunu směrem vně výrubu. V subvertikálních směrech byly všeobecně naměřeny menší hodnoty konvergencí, a to v rozmezí -0,35 až -1,2 mm. U KS-3 a KS-4 dosahují konvergence v horizontálních směrech až -11 mm, ve vertikálních pak -6,5 mm. Vyšší hodnoty konvergenčních měření jsou u KS-4 dány polohou v křížení dvou rozrážek a tím větším profilem výrubu.

V tabulce Tab. 74 uvádíme stručný přehled naměřených maximálních deformací, které odpovídají zkrácení uvedených záměr v konvergenčním profilu. Tato čísla byla použita pro srovnání vypočtených hodnot v konkrétních místech odpovídajících lokalizaci měření a poloze v 3D geomechanickém modelu. Vzhledem k tomu, že modelovaná porucha prochází dílem BZ-XIIJ ještě před konvergenční stanicí KS-1, lze předpokládat, že v těchto místech mohou být reálné deformace ještě o něco vyšší než měřená maxima.

Tab. 74 Přehled měřených maximálních deformací při konvergenčních měřeních

konvergenční stanice	vodorovné deformace		svislé deformace	
	záměra	mm	záměra	mm
KS-1 BZ-XIIJ 200-205 m	21*- 24	2,4	24*- 23	0,4
KS-2 BZ-XIIJ 260-269 m	31*- 35	2,4	25*- 23	1,3
KS-3 BZ1 XII 53 – 61 m	31*- 33	5,5	21*- 22	4,5
KS-4 křížení BZ-XII a ZK-3J	11*- 13	11	13*- 12	6,5

Dynamická analýza

Při dynamické analýze, respektive hodnocení vlivu seismicity na stabilitu podzemního díla, je nutné pro potřeby výpočtů stanovit parametry charakterizující chování horniny při dynamickém zatížení. Tyto parametry lze rozdělit do dvou skupin. První skupina obnáší souhrn parametrů týkajících se přímo chování zeminy, a to **smykový modul G** a průběh smykového modulu při cyklickém zatížení, respektive jeho pokles. Smykový modul se stanovuje přepočtem z modulu pružnosti E_e dle vztahu:

$$G = \frac{E_e}{2(1+\nu)} \quad (28)$$

kde ν - poissonova konstanta

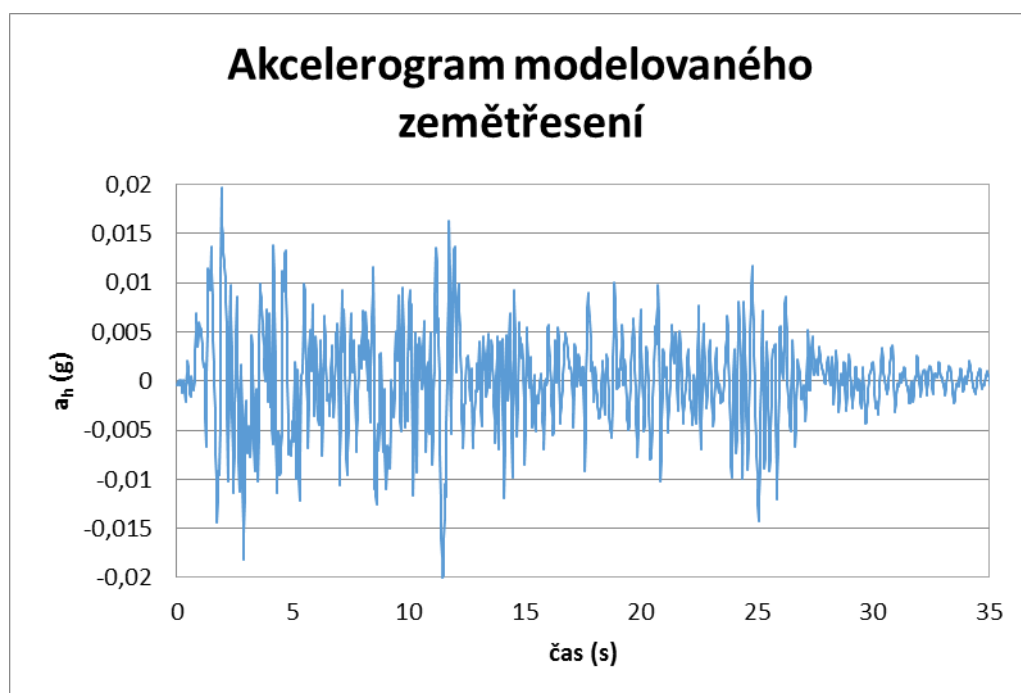
Do druhé skupiny parametrů řadíme schopnost horniny dissipovat energii seismického zatížení vyjádřené pomocí veličiny nazvané **útlum**.

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

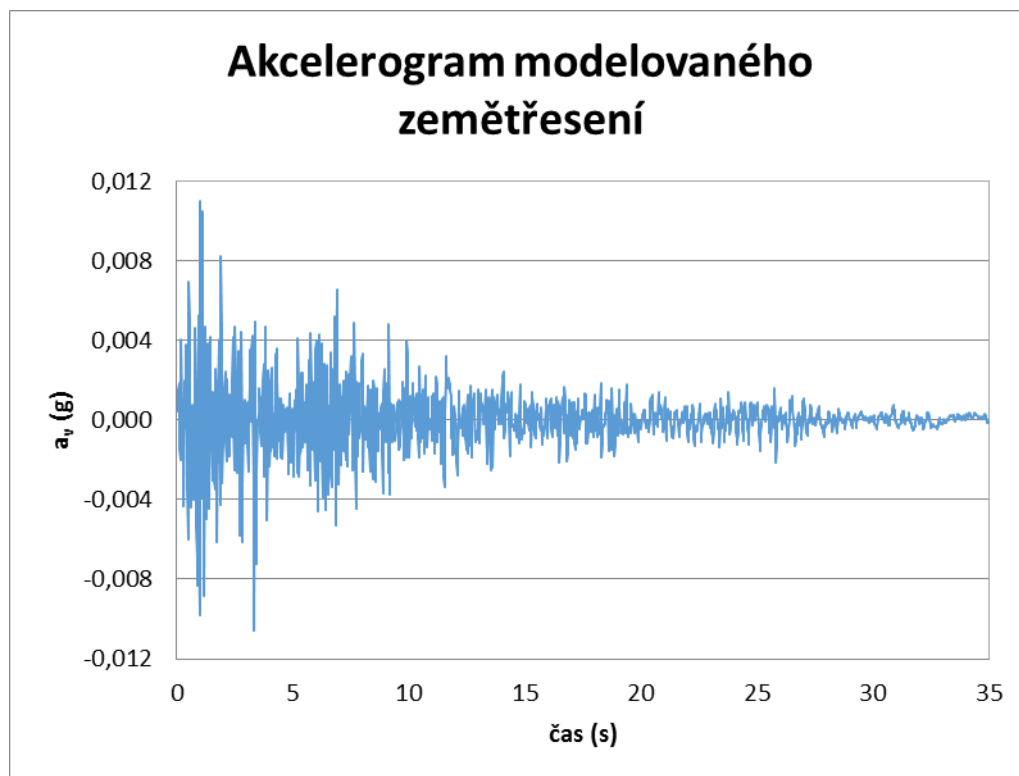
V současné době je pro posuzování seismických účinků platná norma ČSN EN 1998 Navrhování konstrukcí odolných proti zemětřesení, konkrétně část 1 – Obecná pravidla, seismická zatížení a pravidla pro pozemní stavby a část 5 – Základy, opěrné a zárubní zdi a geotechnická hlediska. V této normě je uvedena mapa seismických zatížení pro jednotlivé okresy. Pro dotčený okres Brno – venkov, Žďár nad Sázavou je stanoveno rozmezí návrhového zrychlení 0,02-0,04 g.

Pro konstrukci zatěžovacího akceleroogramu byly využity záznamy zemětřesení z databáze záznamů zemětřesení zabudované v programu Midas. Vybrán byl záznam, při kterém je maximálních amplitud dosaženo až s určitým odstupem od začátku zemětřesení. Tomuto požadavku dobře vyhověl záznam zemětřesení 1940 El Centro Site, ve vodorovném směru (180 deg) s maximální amplitudou 0,2142 (g) a ve vertikálním (vertical) s max. amplitudou 0,2468 (g) a dobou trvání 53,46 s. V našem případě, v poměrech České republiky, byly stanoveny jako maximální reálné hodnoty akcelerací $a_h = 0,020$ (g), $a_v = 0,01$ (g). Proto byl vybraný záznam poměrově upraven tak, aby odpovídal reálným hodnotám pro Českou republiku. Průběh doby zemětřesení byl modelován po dobu 35 s. Modelovaný průběh zemětřesení je patrný z následujících grafů.

Pozn. Záznam zemětřesení „El Centro“ v Kalifornii u hranice s Mexikem, magnitude 6,9 (Mercalli intensity scale), hloubka 16 km, type – strike-slip.



Obr. 247 Modelovaný akceleroogram v horizontálním směru



Obr. 248 Modelovaný akcelerogram ve svislém směru

Pro zajištění adekvátního výsledku výpočtů při dynamické analýze vlivu seismických účinků je nezbytné dobré vygenerování tzv. okrajových podmínek na hranách modelu. Tyto představují schopnost horninového prostředí disipace = útlumu energie dynamického zatížení. Jsou definovány jako hodnoty útlumu ve směrech x, y, z pro příslušné typy hornin na základě vztahu:

$$\text{pro P-vlny} \quad C_p = \gamma \cdot A \cdot \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\gamma}} \quad (29)$$

$$\text{pro S-vlny} \quad C_s = \gamma \cdot A \cdot \sqrt{\frac{G}{\gamma}} \quad (30)$$

$$\text{kde } \lambda = \frac{\nu \cdot E_e}{(1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)}, \quad G = \frac{E_e}{2(1 + \nu)} \quad (31)$$

E_e – modul pružnosti, G – smykový modul, ν – poissonova konstanta, A – plocha
 γ – objemová tíha λ – objemový modul

Z praktického hlediska si toto lze představit jako soustavu jakýchsi „pružin“ na hranách modelu s tuhostí definovanou hodnotou útlumu.

Ke „kalibraci“ modelu pro dynamickou analýzu se používá v programu MIDAS tzv. eigenvalue analýza, kdy jsou vygenerovány inherentní dynamické vlastnosti horninového prostředí s podzemní konstrukcí, jako jsou tvar deformace a režim vibrací, vlastní frekvence, modální faktor podílu horninového prostředí a konstrukce. Tyto vlastnosti jsou určeny hmotností a tuhostí konstrukce. Modální faktor je hmotnostní zlomek, který udává jaký podíl má konstrukce na vibracích a stanovuje se pro všechny režimy vibrací. Například, v případě, že v prvním režimu činí modální faktor podílu 60%, 60% z celkové hmotnosti konstrukce se

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

podílí na prvním režimu. Z tohoto důvodu jsou v seismických analýzách uvažovány právě režimy s vysokým hmotnostním faktorem podílu.

Dalším důležitým faktorem v dynamické analýze je uvažování „útlumu kmitání konstrukce“ (damping ratio). Žádná reálná konstrukce nemůže kmitat nekonečně, postupně dochází ke ztrátě energie na úrovni molekul, či vlivem interakce jednotlivých komponentů konstrukce, které způsobí pokles vibrací konstrukce. Konkrétně, při simulaci blízké vlastní frekvenci má útlum zásadní vliv na výsledky dynamické analýzy. V programu MIDAS je tento efekt zohledněn ve výpočtu koeficientem „modal damping ratio“. Pro železobetonové konstrukce se pohybuje v intervalu 4-7 %, v našem případě byl do výpočtu zaveden hodnotou 0,05.

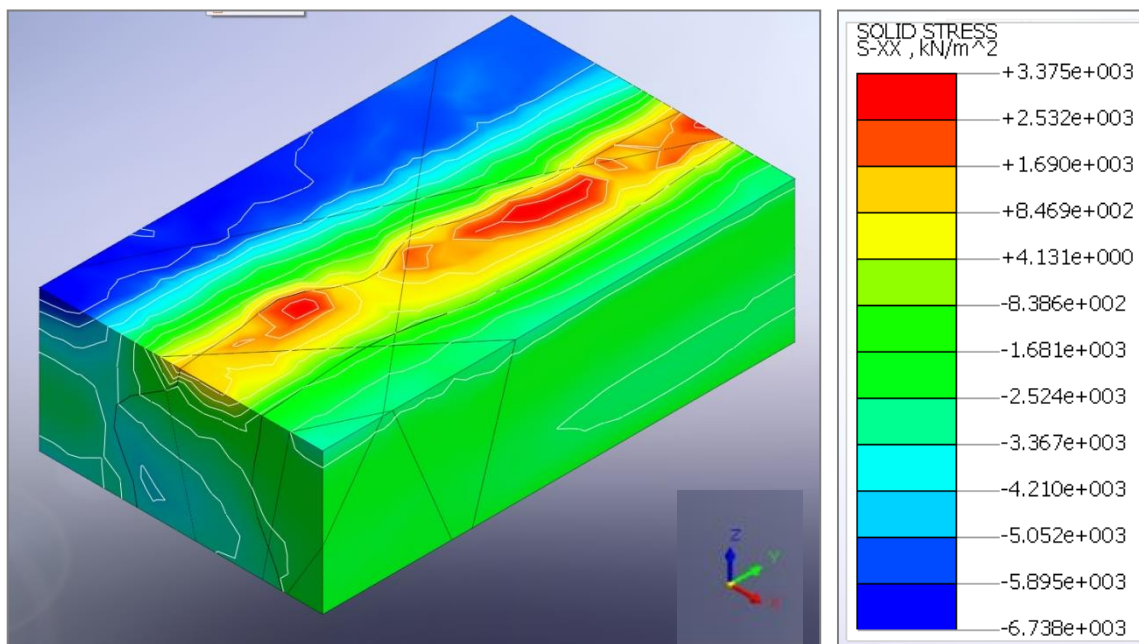
V následující tabulce (Tab. 75) je uveden přehled všech provedených výše popsanych analýz.

Tab. 75 Přehled provedených analýz

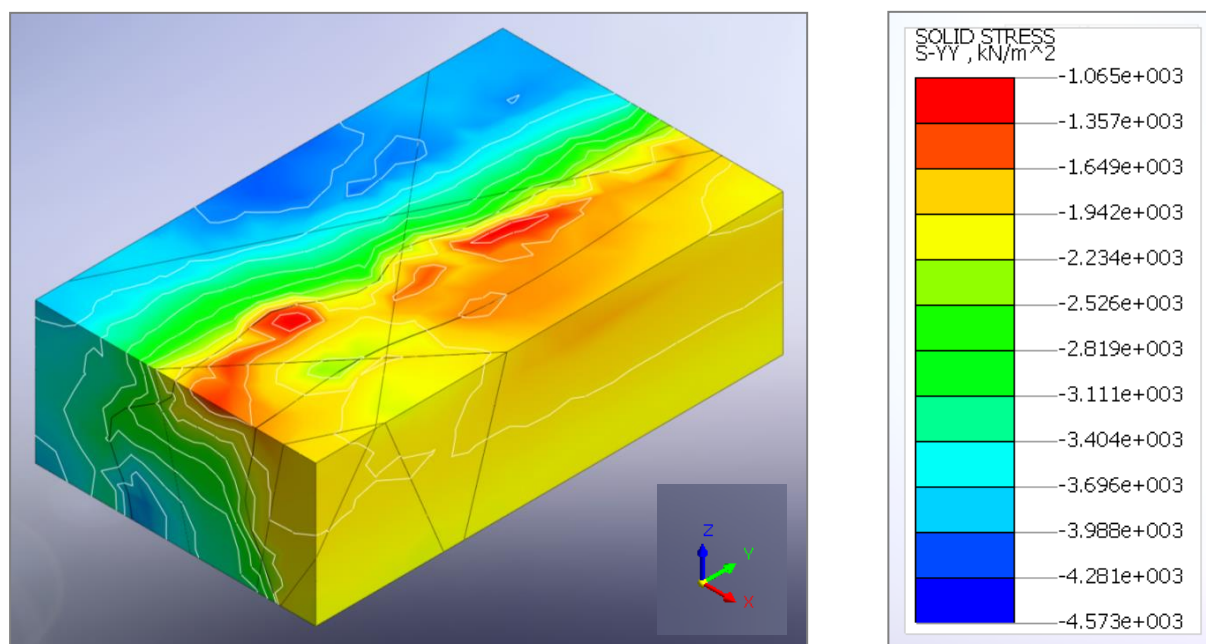
model	voda	model poruchy	označení analýzy
bez poruchy	suchý	-	BP
	suchý	seismická analýza	BP_seis
	nasycení	-	BPv
porucha v celém rozsahu modelu	suchý	$E_{def} = 5 \text{ MPa}, \nu = 0,33$	PC_5
		$E_{def} = 10 \text{ MPa}, \nu = 0,3$	PC_10
		$E_{def} = 15 \text{ MPa}, \nu = 0,28$	PC_15
		$E_{def} = 18 \text{ MPa}, \nu = 0,25$	PC_18
	nasycení poruchy	$E_{def} = 5 \text{ MPa}, \nu = 0,33$	PCv_5
		$E_{def} = 10 \text{ MPa}, \nu = 0,3$	PCv_10
		$E_{def} = 15 \text{ MPa}, \nu = 0,28$	PCv_15
		$E_{def} = 18 \text{ MPa}, \nu = 0,25$	PCv_18
porucha v přilehlém bloku amfibolitů u podzemního díla	suchý	$E_{def} = 5 \text{ MPa}, \nu = 0,33$	PA_5
		$E_{def} = 10 \text{ MPa}, \nu = 0,3$	PA_10
		$E_{def} = 15 \text{ MPa}, \nu = 0,28$	PA_15
		$E_{def} = 18 \text{ MPa}, \nu = 0,25$	PA_18
	nasycení poruchy	$E_{def} = 5 \text{ MPa}, \nu = 0,33$	PAv_5
		$E_{def} = 10 \text{ MPa}, \nu = 0,3$	PAv_10
		$E_{def} = 15 \text{ MPa}, \nu = 0,28$	PAv_15
		$E_{def} = 18 \text{ MPa}, \nu = 0,25$	PAv_18

3.4.3 Výsledky

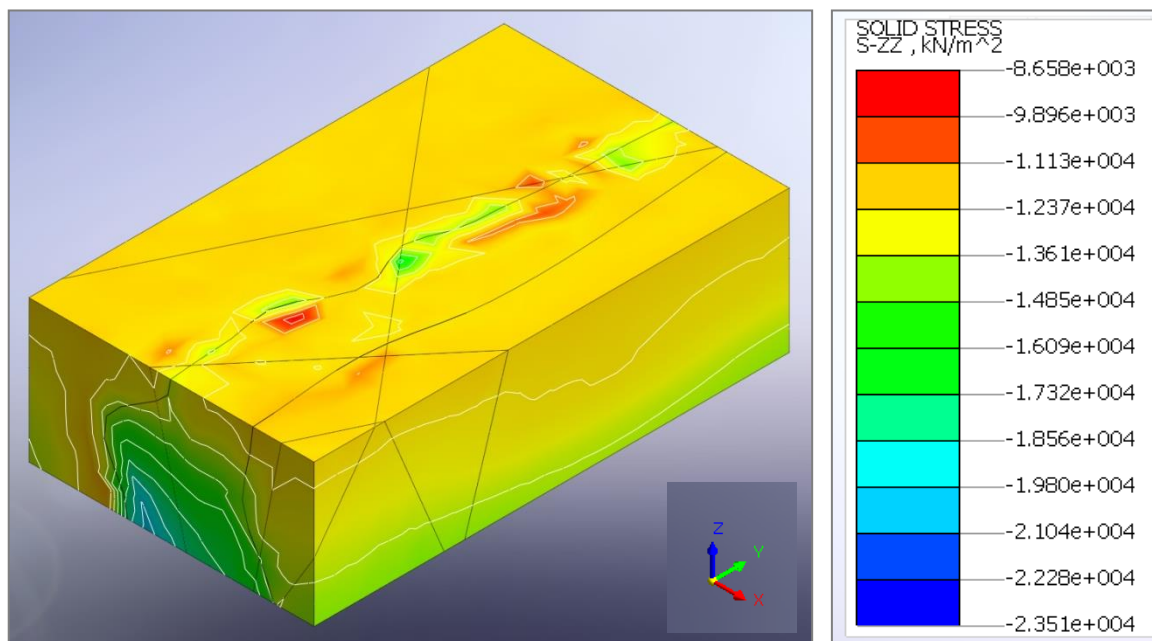
Jak již bylo uvedeno, pro účely stanovení primární napjatosti masivu byla provedena analýza in-situ. Průběh vygenerovaných napětí je patrný z následujících obrázků. Podrobněji jsou výsledky doloženy v Elektronická příloha 27.



Obr. 249 Vodorovné napětí XX – analýza in-situ



Obr. 250 Vodorovné napětí YY – analýza in-situ



Obr. 251 Svislé napětí ZZ – analýza in-situ

Pro stanovení vlivu realizace výrubu na napjatost horninového masivu a případných deformací byl proveden soubor napěťo-deformačních analýz s variantními vstupy do výpočtů (viz Tab. 75).

V tabulce Tab. 76 jsou uvedeny výsledky parametrické studie s variantním zavedením poruchové zóny do výpočtu pro analýzy bez vlivu podzemní vody, respektive přehled vypočtených maximálních hodnot deformací pro jednotlivé analýzy. Vzhledem k rozsáhlosti modelu bylo obtížné zvolit názorně vypovídající kritérium pro srovnání výsledků jednotlivých analýz. Za rozhodující při realizaci díla, a tím pádem i vhodným vypovídajícím kritériem pro prezentaci výsledků, považujeme etapu výstavby při průchodu podzemního díla poruchovou zónou a po vyražení celého díla. Maximální vypočtené hodnoty deformací se rovněž soustředily do míst přechodu porušenou zónou. Proto pro účely demonstrace srovnání výsledků výpočtů v rámci jednotlivých analýz a výsledků výpočtů se skutečností byly vybrány 2 modelované kroky výstavby:

- etapa výstavby vyrubání úseku BZ-XIIJ ve staničení 140-170 m před instalací ostění,
- dokončení výstavby celého podzemního díla včetně ostění;

a celkem 4 typy deformací:

- pokles v kalotě na ostění,
- zdvih dna výrubu,
- posun ve směru x na povrchu ostění,
- posun ve směru y na povrchu ostění.

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

Tab. 76 Srovnání maximálních vypočtených deformací výrubu pro variantní modely porušené zóny bez vlivu podzemní vody

rozsah zóny	E (GPa)	maximální vypočtená hodnota deformace				časový krok
		z – pokles kaloty	z – zdvih dna	x – posun *	y – posun *	
bez porušené zóny		0,0044 m	0,0023 m	0,0006 m	0,0006 m	1)
		0,0051 m	0,0024 m	0,0021 m	0,0020 m	2)
v celém rozsahu modelu	5	0,0035 m	0,0014 m	0,0004 m	0,0008 m	1)
		0,0060 m	0,0024 m	0,0026 m	0,0049 m	2)
	10	0,0041 m	0,0017 m	0,0005 m	0,0008 m	1)
		0,0058 m	0,0024 m	0,0029 m	0,0037 m	2)
	15	0,0043 m	0,0018 m	0,0005 m	0,0008 m	1)
		0,0060 m	0,0023 m	0,0029 m	0,0031 m	2)
	18	0,0044 m	0,0020 m	0,0005 m	0,0007 m	1)
		0,0060 m	0,0022 m	0,0029 m	0,0029 m	2)
v oblasti přilehlého bloku	5	0,0034 m	0,0013 m	0,0004 m	0,0008 m	1)
		0,0058 m	0,0024 m	0,0025 m	0,0049 m	2)
	10	0,0041 m	0,0017 m	0,0005 m	0,0008 m	1)
		0,0058 m	0,0024 m	0,0029 m	0,0036 m	2)
	15	0,0043 m	0,0019 m	0,0005 m	0,0008 m	1)
		0,0060 m	0,0023 m	0,0029 m	0,0031 m	2)
	18	0,0044 m	0,0019 m	0,0005 m	0,0007 m	1)
		0,0060 m	0,0022 m	0,0029 m	0,0029 m	2)

Vysvětlivky k Tab. 76:

1) po vyrobání BZ-XIIJ 140-170, maximální deformace odečteny v poruše v segmentu BZ-XIIJ 140-170

2) po dokončení podzemního díla (včetně ostění), maximální deformace odečteny v poruše v rozrážce ZK-1

* odečet v opěři nebo kalotě

kladná deformace u x, y – posunů značí posun ve směru osy

Uvedené hodnoty výsledků napěťo-deformační analýzy bez vlivu podzemní vody v tabulce (Tab. 76) vcelku dobře korespondují s hodnotami měřenými pomocí konvergenčních měření (Pozn. Konvergenční měření jsou prováděna v rámci směru podzemního díla, zatímco vypočtené vodorovné deformace odpovídají směřům os x a y.). Stanovené hodnoty deformací dosahují pouze několika mm. Jak jsme předpokládali, ve výsledcích se rozsah modelované porušené zóny v rámci modelu výrazně neprojeví na stanovených deformacích výrubu. Hodnoty deformací výrubu stanovené pro 2 různé rozsahy porušené zóny (v celém rozsahu modelu a pouze v přilehlém vygenerovaném bloku) jsou téměř identické.

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

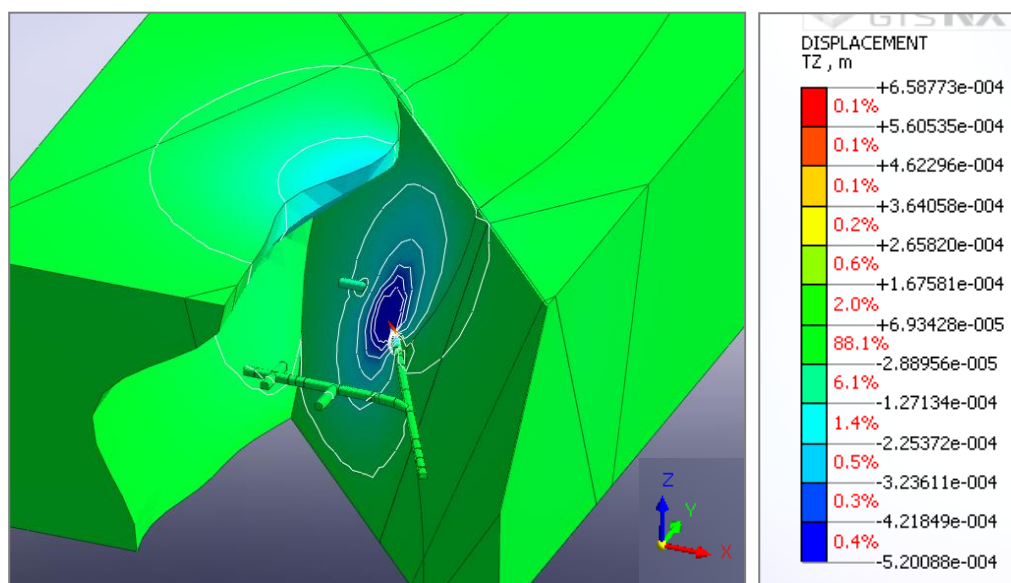
Zavádějícím by mohl být trend částečně vyplývající z tabulky, že při zvýšení kvality horniny v porušené zóně nejsou vždy vypočtené deformace výrazně nižší, ale lokálně i nepatrně vyšší. Avšak v tomto případě se jedná o velmi malé rozdíly řádu desetin mm, které mohou být způsobeny zaokrouhlením v jednotlivých krocích výpočtů v rámci konvergence výpočtu v celém rozsáhlém modelu.

Pro ověření tohoto faktu jsme provedli ještě kontrolní, čistě účelové, analýzy, kdy byla modelována porucha v rozsahu dominantního vygenerovaného bloku (označený na Obr. 244 jako A2), a srovnávací analýzy pro snížení kvality horniny v celém rozsahu modelu. Výsledky těchto analýz potvrdily trend nárůstu hodnot deformací výrubu při poklesu kvality horniny.

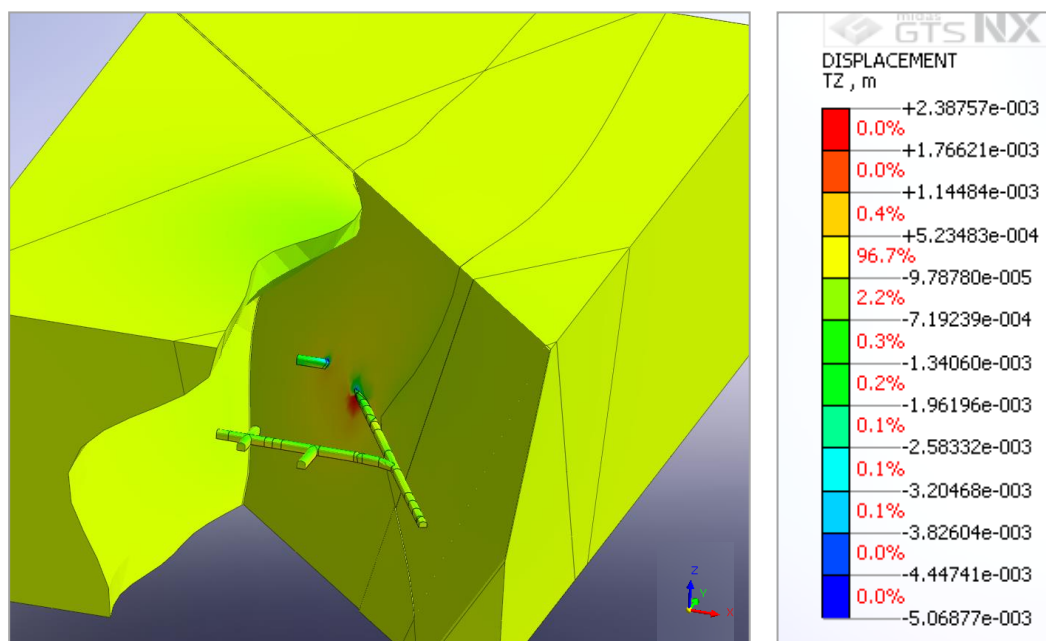
Z provedených výpočtů lze konstatovat, že realizovaný 3D geomechanický model je rozměrově příliš velký vůči provedenému podzemnímu dílu a rozsahu poruchy, aby mohl být proveden detailnější rozbor vlivu poruchy na deformace výrubu a zejména pak pro návrh ostění. Pro detailnější rozbor předpokládaných deformací výrubu a stanovení sil namáhajících ostění výrubu by bylo nutné sestavení rozměrově menších modelů, umožňující zahrnutí více detailů do výpočtu. Vstupem do těchto detailnějších modelů, tj. okrajovými podmínkami, by byly právě veličiny (zejména napětí) získané z realizovaného 3D geomechanického modelu.

Nicméně na výsledcích provedených výpočtů lze dobře demonstrovat vliv, potažmo dosah vlivu, realizace podzemního díla. V tabulce (Tab.) je uveden přehled dosahu deformací pro jednotlivé horniny, včetně modelové porušené zóny. Pro potřeby srovnání byly spočtené deformace v masivu rozděleny do dvou skupin, a to deformace velikosti nad 1 mm indikované v blízkosti výrubu a deformace do 1 mm, jejichž dosah je výrazně vyšší.

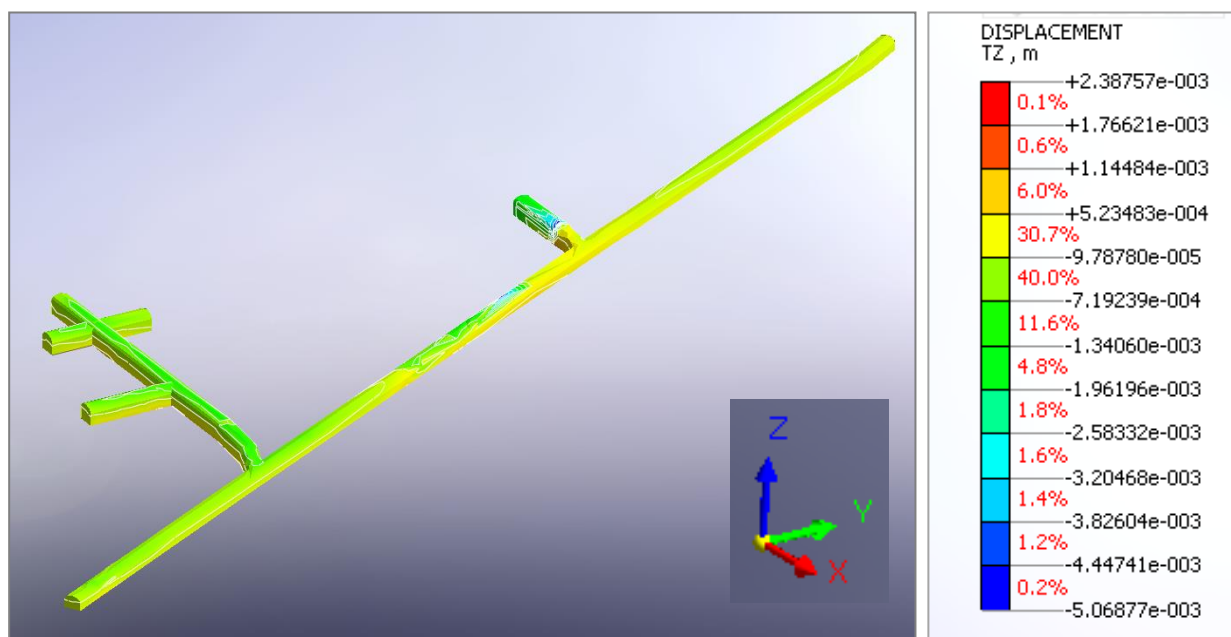
Vybrané příklady výsledků napěťodeformační analýzy bez vlivu podzemní vody uvedených v tabulce Tab. 76 jsou znázorněny na obrázcích Obr. 252 - Obr. 254. Z uvedených obrázků jsou i dobře patrné dosahy deformační zóny. Detailněji jsou výsledky doloženy v grafické příloze Elektronická příloha 27.



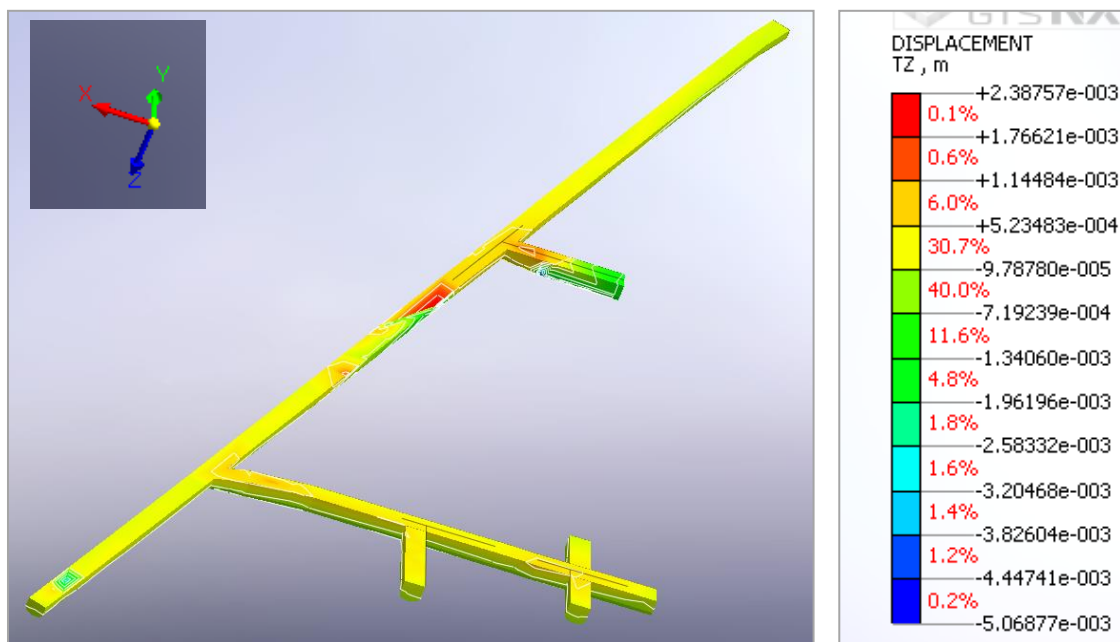
Obr. 252 Izolinie svislých deformací po vyrobání segmentu BZ-XIIJ 140-170 před instalací ostění (bez porušené zóny, bez podzemní vody)



Obr. 253 Izolinie svislých deformací po vyrubání celého podzemního díla včetně instalace ostění (bez porušené zóny, bez podzemní vody)



Obr. 254 Izolinie konečných deformací na povrchu podzemního díla – pohled shora (model bez poruchy a vlivu podzemní vody)



Obr. 255 Izolinie konečných deformací na povrchu podzemního díla – pohled zdola (model bez poruchy a vlivu podzemní vody)

Tab. 90 Zóny dosahu deformací od výrubu bez vlivu podzemní vody

typ horniny	velikost deformace	rozsah zóny deformací		
		posun x	posun y	posun z
amfibolit	do 1 mm	deformace 0-0,4 mm v ostění	v ostění	4 m (oj. 7 m)
migmatit	do 1 mm	v ostění	v ostění	4 m (ojediněle deformace až 1,7 mm), (ojediněle dosah 11 m)
porucha (model 5 GPa, blok)	do 1 mm	62 m	13 m	50 m
	nad 1 mm	7,4 m (1-2,5 mm)	2 m (1-4,9 mm)	7,2 m (1-5,8 mm)
porucha (model 18 GPa, blok)	do 1 mm	22 m	19 m	25,3 m
	nad 1 mm	4,5 m (1-2,9 mm)	2,5 m (1-2,9 mm)	7,4 m (1-6 mm)
porucha (model 5 GPa, celá)	do 1 mm	48-57 m	15,2 m	11 m nahoru 17 m dolů
	nad 1 mm	0,7 m (1-2,6 mm)	0,7 m (1-5 mm)	4,5 m (zdvih 1-2,4 mm) 1,2 m (pokles 1-6 mm)
porucha (model 18 GPa, celá)	do 1 mm	15,5 m	13,9-58 m	30 m
	nad 1 mm	1,7 m (1-3 mm)	1,2 m (1-3 mm)	6,5 m (zdvih 1-2,4 mm) 1,4 m (pokles 1-6 mm)

Vysvětlivky:

7,4 m (1-2,5 mm) – dosah zóny deformací (hodnoty deformací v zóně)

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

Z uvedeného přehledu rozsahu a hodnot deformací lze konstatovat, že v neporušených horninách je dosah deformací velmi malý. Vodorovné deformace se kumulují v bezprostřední blízkosti výrubu a dosahují maximálních hodnot cca do 1 mm. Svislé deformace dosahují hodnot 1 mm v dosahu do 4 m. Ojediněle byly zjištěny dosahy deformací vyšší, a to zejména v místech přechodu hornin, cca 7-11 m. Rovněž v místě přechodu amfibolitů do migmatitů na výrazně zakřivené ploše byly zjištěny hodnoty deformací vyšší až 1,7 mm. V tomto případě však nelze zcela vyloučit vliv zaokrouhlení při konvergenci výpočtu na zakřivené ploše. Tento trend vlivu deformací lze předpokládat v neporušených horninách při dané velikosti výrubu stálého průměru. Při větším výrubu, či v místech křížení mohou být deformace vyšší a s větším dosahem. Větší dosah deformací při zvětšení výrubu je dobře patrný z uvedených grafických výsledků, kdy v oblasti nad křížením překopu BZ1-XII a příčných rozrážek ZK-3J a ZK-3S, případně i ZK-2 jsou na povrchu modelu dobře patrné velmi malé deformace řádu setin až desetin mm a to bez ohledu na parametrický model porušené zóny (barevné rozlišení).

V místech přechodu porušenými zónami jsou hodnoty deformací a jejich dosahu výrazně vyšší než v oblastech zdravých hornin. Dosah a velikost deformací je dána zvoleným modelem poruchy. Deformace velikosti do 1 mm lze u porušených zón očekávat v oblastech 10-60 m od hranice výrubu. Maximální svislé deformace výrubu dosahují cca 6 mm v dosahu do cca 7 m od výrubu. Maximální vodorovné deformace výrubu činí do 5 mm s dosahem převážně 2,5 m, ojediněle 7 m od výrubu.

Dále následují výsledky analýz provedených za předpokladu plného nasycení porušené zóny vodou se stejným variantním řešením porušené zóny jako v předchozích analýzách.

Tab. 77 Srovnání maximálních vypočtených deformací výrubu pro variantní modely porušené zóny plně nasycené vodou

rozsah zóny	E (GPa)	maximální vypočtená hodnota deformace v m				časový krok
		z – pokles kaloty	z – zdvih dna	x – posun **	y – posun **	
bez porušené zóny		0,0044	0,0023	0,0006	0,0006	1)
		0,0051	0,0024*	0,0021	0,0022	2)
v celém rozsahu modelu	5	0,0035	0,0014	0,0005	0,0008	1)
		0,0060	0,0024	0,0026	0,0049	2)
	10	0,0041	0,0017	0,0005	0,0008	1)
		0,0058	0,0024	0,0029	0,0037	2)
	15	0,0043	0,0019	0,0004	0,0008	1)
		0,0060	0,0023	0,0029	0,0031	2)
	18	0,0044	0,0020	0,0005	0,0007	1)
		0,0060	0,0022	0,0029	0,0029	2)
v oblasti přilehlého bloku	5	0,0034	0,0013	0,0004	0,0008	1)
		0,0058	0,0024	0,0025	0,0049	2)
	10	0,0041	0,0017	0,0005	0,0008	1)
		0,0058	0,0024	0,0029	0,0037	2)

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

	15	0,0043	0,0019	0,0005	0,0008	1)
		0,0059	0,0023	0,0029	0,0031	2)
	18	0,0044	0,0020	0,0005	0,0007	1)
		0,0060	0,0022	0,0029	0,0029	2)

Vysvětlivky k Tab. 77:

1) po vyrobání BZ-XIIJ 140-170, maximální deformace odečteny v poruše v segmentu BZ-XIIJ 140-170

2) po dokončení podzemního díla (včetně ostění), maximální deformace převážně odečteny v poruše v rozrážce ZK-1

* odečet v segmentu BZ-XIIJ 140-170 v kroku 2)

** odečet v opěří nebo kalotě

kladná deformace u x, y – posunů značí posun ve směru osy

Výsledky analýzy s plně nasycenou porušenou zónou vykazují obdobné trendy a hodnoty jako v případě předchozího řešení bez vody. Opět se zde potvrzuje skutečnost, že pro detailnější rozbor předpokládaných deformací výrubu a případné stanovení sil namáhajících ostění výrubu je model příliš rozsáhlý.

Názornější pro stanovení vlivu realizace podzemního díla na horninové prostředí je přehled zjištěných zón dosahu deformací v jednotlivých horninách uvedený v tabulce Tab. 78. Pro potřeby srovnání jsou deformace rovněž členěny do skupin do a nad 1 mm.

Tab. 78 Zóny dosahu deformací od výrubu pro model plně nasycené porušené zóny

typ horniny	velikost deformace	rozsah zóny deformací		
		posun x	posun y	posun z
porucha (model 5 GPa, blok)	do 1 mm	53 m	13,3 m	10,5 m nahoru 18 m dolů
	nad 1 mm	0,7 m	1 m	1,5 m nahoru (1-6 mm) 5 m dolů (1-2,4 mm)
porucha (model 18 GPa, blok)	do 1 mm	15 m	12-50 m	28 m dolů 36,6 m nahoru
	nad 1 mm	1,5 m (1-2,9 mm)	1,2 m	4,5 m dolů (1-2,2 mm) 1,8 m dolů (1-6 mm)
porucha (model 5 GPa, celá)	do 1 mm	9,6 m	14 m	18,4 m dolů 13 m nahoru
	nad 1 mm	0,6 m (1-2,6 mm)	0,8 m (1-4,9 mm)	1,2 m nahoru (pokles 1-6 mm) 5,5 m dolů (zdvih 1-2,4 mm)
porucha (model 18 GPa, celá)	do 1 mm	14,3 m	58 m	32 m
	nad 1 mm	1,1 m (1-2,9 mm)	1,2 m (1-3 mm)	1,5 m nahoru (pokles 1-6 mm) 6,4 m dolů (zdvih 1-2,2 mm)
amfibolit	do 1 mm	na ostění (setiny mm)	na ostění (setiny mm)	2,8 m
migmatit	do 1 mm	do 0,3 mm na ostění	na ostění (setiny mm)	14 m dolů 6,5 m nahoru

Vysvětlivky:

1,5 m (1-2,9 mm) – dosah zóny deformací (hodnoty deformací v zóně)

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

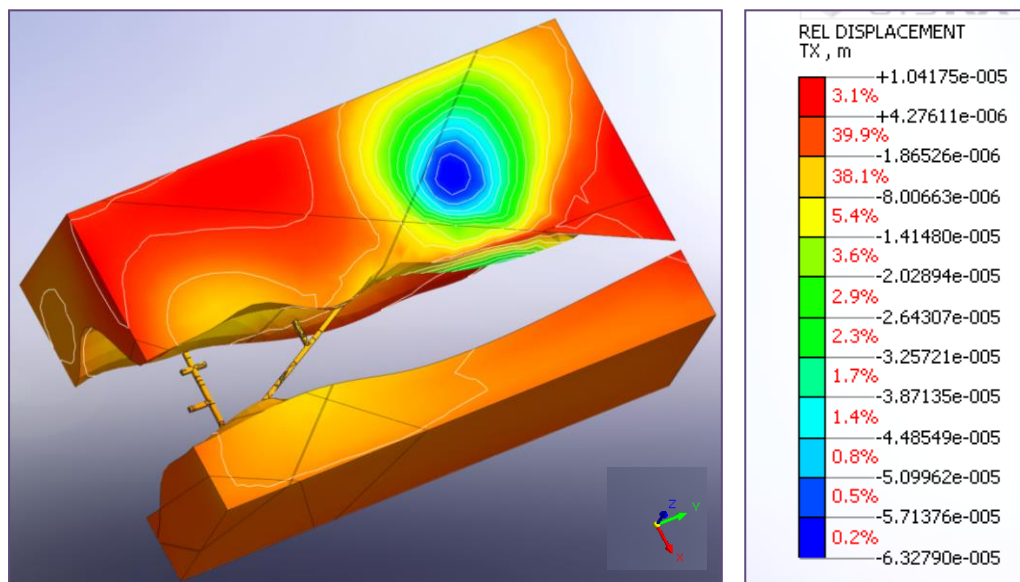
V neporušených horninách je jako u předchozích analýz dosah deformací velmi malý. Vodorovné deformace se kumulují v bezprostřední blízkosti výrubu a dosahují maximálních hodnot maximálně do 1 mm, spíše nižších.

K největším deformacím a jejich dosahu samozřejmě dochází v porušené zóně. Maximálních vodorovných deformací je dosaženo na ostění v místech poruchy směrem do výrubu, nicméně úplné odeznění vlivu deformací nastává až ve vzdálenosti několika desítek metrů v závislosti na modelu poruchy. V pásmu porušené horniny je vliv deformací patrný do vzdálenosti několika desítek metrů.

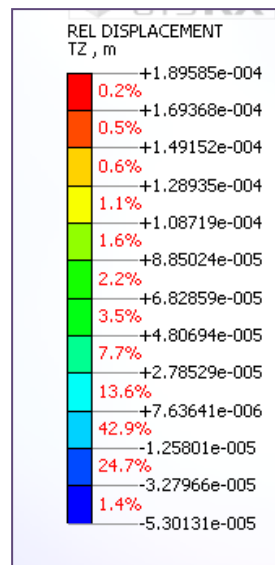
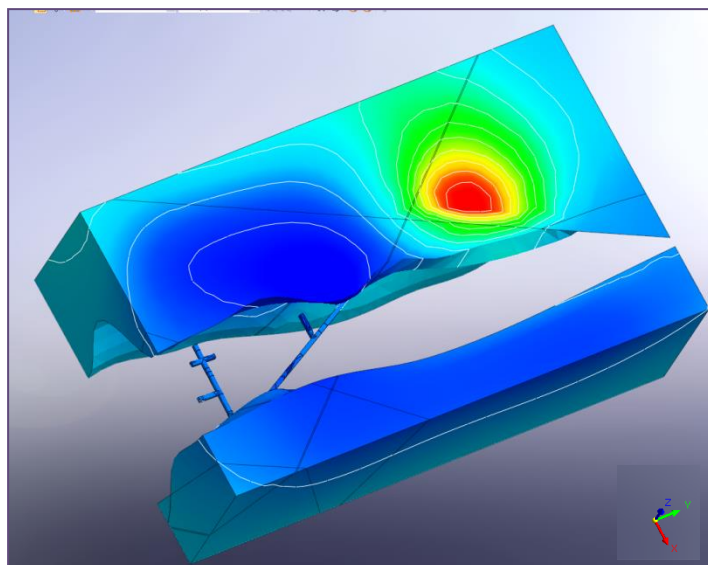
V přilehlé části neporušených hornin k poruše (např. okrajová část bloku A2) se ještě vliv porušené zóny projevívá zvýšeným dosahem deformací, na rozdíl od odlehlé části bloku A3, kde jsou dosahy deformací již zanedbatelné. Hodnoty deformací a jejich dosahu v tabulkách odpovídají spíše částem neovlivněných modelovanou poruchou.

I v tomto případě uvedené závěry platí pro modelovaný rozměr výrubu. V oblasti křížení příčných rozrážek ZK-3J, ZK-3S a ZK-2 s překopem BZ1-XII jsou i v případě modelu plně nasycené poruchy vodou na povrchu modelu dobře patrné velmi malé deformace řádu setin až desetin mm a to bez ohledu na parametrický model porušené zóny (barevné rozlišení na povrchu modelu).

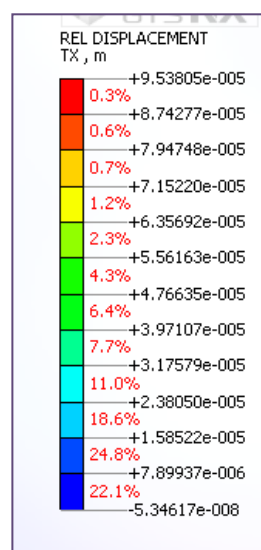
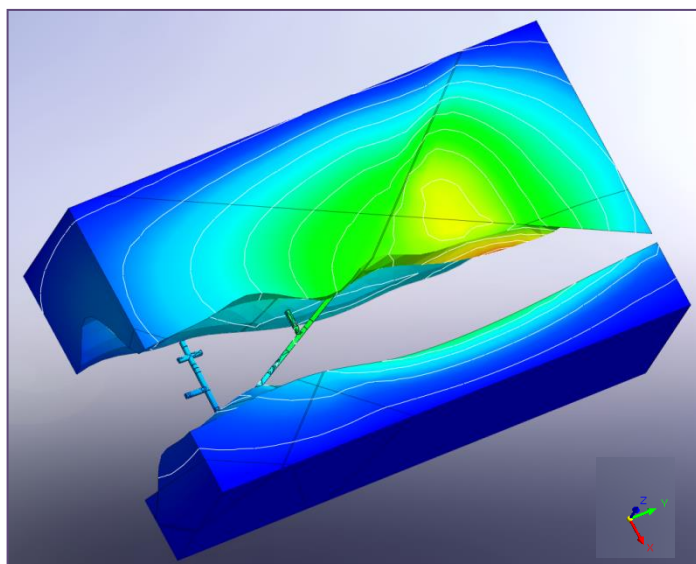
Dále byl testován vliv seismického zatížení na chování horninového masivu s výrubem. Pro tuto simulaci dynamického zatížení byl využit záznam zemětřesení El Centro. Podrobněji je velikost zatížení a způsob aplikace rozebrán v předchozí kapitole 4.3.2 s metodikou provedených analýz. Na následujících obrázcích Obr. 256 - Obr. 259 jsou uvedeny příklady výsledků seismické analýzy pro zaznamenané maximální 2 amplitudy akcelerace.



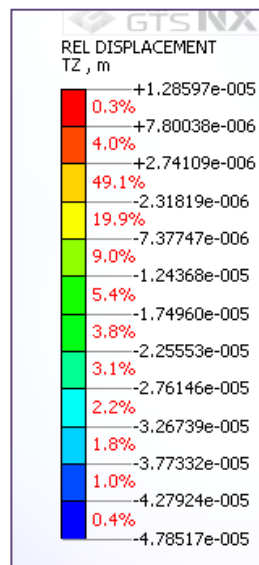
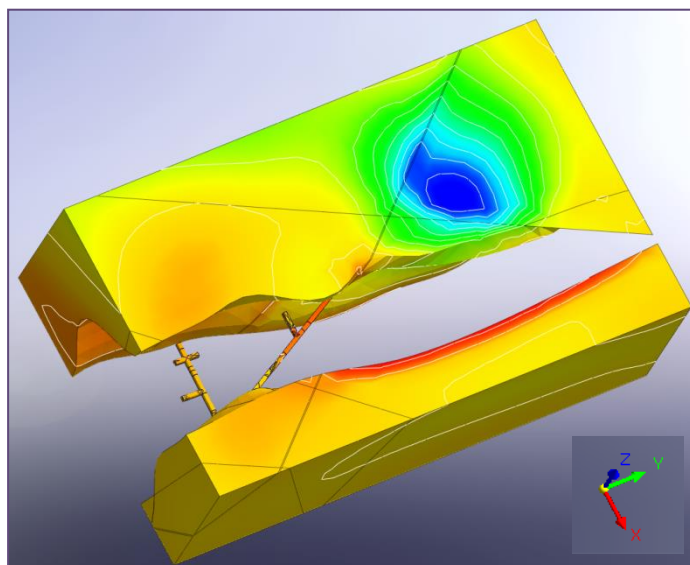
Obr. 256 Izolinie vodorovných deformací ve směru x – 1,9 s od počátku



Obr. 257 Izolinie svislých deformací – 1,9 s od počátku



Obr. 258 Izolinie vodorovných deformací ve směru x – 11,5 s od počátku



Obr. 259 Izolinie svislých deformací – 11,5 s od počátku

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

Na základě výsledků provedené analýzy lze konstatovat, že při simulaci seismického zatížení $a_h = 0,020$ (g), $a_v = 0,01$ (g) po dobu 35 s jsou deformace výrubu malé. Pro maximální amplitudy vychází vodorovné i svislé deformace v řádech tisícín až setin mm.

Resumé matematické modelování

V případě neporušených hornin, v našem případě souhrnně označených jako amfibolity a migmatity, lze na základě výsledků provedených analýz předpokládat, že k ovlivnění horninového prostředí při realizaci výrubu dojde pouze v okolí výrubu do vzdálenosti 4 m, v ojedinělých méně příznivých případech jako jsou přechody hornin, drobná oslabení masivu apod. lokálně až 11 m. V případě vodorovných deformací lze předpokládat posuny v místě výrubu v řádu desetin mm. V tabulce Tab. 79 je uveden souhrn výsledků, tj. předpokládaný dosah deformační zóny, včetně velikosti předpokládaných deformací.

Tyto závěry platí pro modelovaný tvar a velikost výrubu, tj. do velikosti světlého profilu 8,5-13,5 m². Při větším rozsahu výrubu, křížení apod. mohou být hodnoty deformací a deformační zóny vyšší, lze předpokládat hodnoty blízké hodnotám stanoveným pro porušenou zónu, cca do 6 mm (viz komentář v textu výsledků a barevné grafické přílohy).

Tab. 79 Stanovení dosahu deformační zóny

typ horniny	velikost deformace	rozsah zóny deformací		
		posun x	posun y	posun z
amfibolit	do 1 mm	0-0,4 mm v ostění	v ostění	4 m (oj. 7 m)
migmatit	do 1 mm	v ostění	v ostění	4 m (ojediněle 11 m), velikost 1,7 mm,
porucha	do 1 mm	15-62 m	13-58 m	11-50 m
(variantní modely)	nad 1 mm	0,7—7,4 m (1-3 mm)	0,7-2,5 m (1-5 mm)	1,2-7,4 m (1-6 mm)

Vysvětlivky:

0,7-7,4 m (1-3 mm) – dosah deformace (velikost deformace)

Co se týče vlivu seismického/dynamického zatížení na stabilitu výrubu lze předpokládat, že pro seismické zatížení odpovídající podmínkám České republiky, je vliv na stabilitu výrubu téměř zanedbatelný. Pro maximální amplitudy vychází deformace výrubu v řádech tisícín až setin mm.

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

4 Závěrečné shrnutí komplexní geologické charakteristiky PVP Bukov

Předložená závěrečná zpráva shrnuje výsledky geologického výzkumu v oblasti PVP Bukov (ZL PB-2014-ZL-U2301-004-BUKOV), který byl proveden v období 01/2015 až 05/2017. Hlavním cílem výzkumu bylo komplexní zhodnocení geologického prostředí připravované podzemní laboratoře. Provedený výzkum byl zaměřen na analýzu petrologického a geochemického složení hornin včetně charakteristiky minerálních výplní tektonických (alteračních) zón a odhadu teplotně-tlakových podmínek metamorfního vývoje, zhodnocení základních petrofyzikálních vlastností hornin, spektrální analýzu vybraných částí vrtných jader a radiometrické datování hlavních geologických procesů. Dále byla provedena komplexní strukturní analýza prvků duktilní a křehké tektoniky včetně aplikace metody anizotropie magnetické susceptibility (AMS). Další studium zahrnuje výsledky hydrogeologického mapování a stanovení transportních charakteristik v horninovém prostředí. Na základě sady pořízených dat byly zpracovány 3D geovědní modely, a to strukturně-geologický, geomechanický model horninového prostředí PVP Bukova 3D vizualizace podzemních prostor PVP Bukov.

Na základě souboru archivních geologických dat a nového geologického mapování povrchové části zájmového území PVP Bukov byla dále vytvořena základní geologická mapa v měřítku 1 : 10 000, která je nedílnou součástí vstupního datového souboru pro tvorbu 3D modelů.

Prostředí PVP Bukov je tvořeno vysoce metamorfovanými horninami severovýchodního okraje strážeckého moldanubika. V prostředí PVP Bukov byly mapovány migmatitizované biotit-amfibolické pararuly s polohami amfibolitů, amfibolických a biotitických migmatitů. Intenzita migmatitizace je variabilní, dominují stromatitické migmatity, místy s přechody do nebulitických migmatitů. V migmatitech je vzácně možné pozorovat tenké vložky vápenatosilikátových hornin. Poměrně častá je přítomnost žil a žilek pegmatitů, granitů a hydrotermálních žilek. Jedná se zejména o křemenné nebo křemen-karbonátové žíly s akcesorickým množstvím sulfidů. Horniny v okolí tektonických poruch často nesou znaky sekundárních minerálních změn (sericitizace, kaolinizace a hematitizace živců, chloritizace biotitu a amfibolů), draselné metasomatózy a epidotizace. V dominantně zastoupených migmatitizovaných amfibolických rulách a amfibolitech jako hlavní minerál převažuje amfibol, který svým chemickým složením odpovídá magneziohornblendu, ferroedenitu až hastingsitu. Přítomný plagioklas složením odpovídá oligoklasu až andezínu. Biotit svým chemickým složením většinou leží na hranici mezi flogopitem a annitem. Z pohledu geochemického a mineralogického složení přítomné metamorfované horniny můžeme interpretovat jako původní část vulkanosedimentárního komplexu se střídáním poloh bazických až intermediálních hornin ($\text{SiO}_2=44,1\text{--}65,3$ hmot. %). Bazické amfibol-biotitické a amfibolické migmatity mají metaluminické složení ($A/\text{CNK}=0,68\text{--}0,81$). Složení leukosomu leží při hranici mezi metaluminickými a peraluminickými horninami ($A/\text{CNK}=1,0\text{--}0,95$). Biotitické migmatity pak mají peraluminické složení ($A/\text{CNK}=1,13\text{--}1,22$). Chemické složení migmatitizovaných amfibolitů indikuje, že protolit hornin je chemicky blízký bazaltům z vulkanických oblouků. Biotitické pegmatity vykazují ve srovnání s biotitickými migmatity mírné nabohacení Eu, podobné obsahy HREE a zvýšené obsahy LREE. Biotitické pegmatity zároveň mají nízké obsahy Y, Ti a P. Amfibolický pegmatit a leukosom amfibolického migmatitu má ve srovnání s amfibolickými migmatity vyšší obsahy REE, Sr, Pb a U. Tyto výsledky naznačují poměrně složitou redistribuci prvků během parciálního tavení. Analýza chemického složení

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

sekundárních mineralizací a výplní tektonických zón (novotvořený pyrit na puklinách, křemenné žíly pegmatitového složení a hydrotermální povahy, karbonátové, křemen-karbonátové žíly) ukázala, že se jedná o produkt alteračních procesů. Laboratorní analýzy mineralogického složení, stabilních izotopů a fluidních inkluzí naznačují, že mineralizace vznikla za poměrně nízkých teplotních podmínek z vícezdrojových roztoků. Svým charakterem a složením tyto žíly odpovídají post-uranovým křemen-karbonát-sulfidickým žilám z uranového ložiska Rožná. Stáří illitu ze vzorku BUKOV-2 bylo stanoveno na 287 až 307 Ma, stáří illitu ze vzorku BUKOV-3 bylo stanoveno v rozmezí 250 až 256 Ma (Tab. 2). Tyto údaje spadají na počátek, resp. na konec vývoje rudního stádia uranové mineralizace na ložisku Rožná, které bylo datováno na 280 až 260 Ma (Kříbek a Hájek eds. 2005).

Na vybraných částech vrtných jader vrtů S-1 a S-2 byla dále na pracovišti GFZ Potsdam provedena minerální klasifikace hornin s využitím obrazových hyperspektrálních dat. S využitím senzoru HySpex byly pořízeny obrazové skeny (radiance a reflektance), které byly následně analyzovány pomocí nového toolboxu na pracovišti ČGS. Automaticky klasifikované třídy obrazového spektra byly diskutovány s výsledky petrologického studia. Na základě spektrální analýzy byly identifikovány jak minerály mající přímé spektrální projevy v optické části EMS (0,4–2,5 μm), tak minerály s absencí specifických absorpcí v této části EMS, jako je například křemen. Vedle vlastních minerálů byly identifikovány také jejich alterační produkty s výskytem sekundárních minerálů (chlorit, biotit a sericit).

Skupina studovaných vzorků z prostorů PVP Bukov představuje z petrofyzikálního hlediska málo homogenní soubor různých petrografických typů, jejichž klasifikace a další zpracování je tím pádem ztížena. Úzký vztah mineralogických hustot a magnetické susceptibility ukazuje na významnou závislost těchto parametrů na minerálním složení horninových typů a oba tyto látkové parametry lze využít k dobré identifikaci horninového typu. Pórovitosti jsou u základních typů hornin velmi nízké, až na hranici citlivosti metody a jistě ovlivňují významným způsobem další zkoušky (propustnosti, transportní kapacity apod). Obsahy e_{Th} , e_{U} a K jsou relativně nízké zejména u hornin klasifikovaných jako amfibolity, s narůstající migmatizací, eventuálně s rostoucími obsahy biotitu až několikrát vyšší. Vztah U a e_{U} (matematický poměr) naznačuje, že v recentní a subrecentní době nedocházelo k migraci uranu, jak by v této oblasti bylo možné očekávat. S nízkými obsahy zejména uranu souvisí i nízké hodnoty vypočtené tepelné produkce. Směrové parametry, jako jsou rychlosti elastických vln a elektrická konduktivita, indikují předpokládanou závislost – anizotropii měřených vzorků vůči směrům „foliací“, zároveň prokazují vzájemné korelace. Docílené petrofyzikální výsledky představují měření všech parametrů tzv. „metodou jednoho vzorku“ a nejsou tedy ovlivněny různorodostí horninového materiálu. O to více je zřejmé, že mezi jednotlivými lokalitami a i v hloubkových profilech jednotlivých jader je patrná výrazná látková variabilita. Fyzikální parametry mezi sebou vzájemně souvisí a lze je v podstatě rozdělit na látkové (hustoty, magnetická susceptibilita, radioaktivita) a „směrové“ (anizotropie magnetické susceptibility, rychlosti elastických vln a elektrická konduktivita). Je zřejmé, že při přípravě vzorků pro výzkumné postupy je nutné výběru vzorků věnovat mimořádnou pozornost, tak aby komplex metod byl prováděn pokud možno na petrograficky i fyzikálně homogenním vzorku. Jinak docílené výsledky mohou být do jisté míry zavádějící.

Z pohledu duktilní tektoniky lze v prostředí PVP Bukov pozorovat heterogenní superpozici (převrácení) dvou regionálních metamorfních foliací. Relativně starší foliace mají subvertikální orientaci v průběhu SSZ-JJV až SSV-JJZ s mírně převažujícím sklonem k JJZ. Tyto foliace byly heterogenně transponovány do ploch mírného až středního úklonu k JJZ až JV. Metamorfní lineace obou regionálních foliací upadají převážně pod mírnými úhly k JJZ až

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

J. Vrásové osy mají mírný až střední sklon k JZ až JV. Z pohledu křehké tektoniky byly v oblasti PVP Bukov identifikovány systémy dvou dominantních skupin křehkých struktur s pohybovými indikátory (zlomů a střížných puklin). Převažující skupinou jsou struktury upadající pod strmými až středními úhly k JJV až VJV s převažujícími indikátory poklesové kinematiky. Druhou skupinou jsou zlomy a střížné pukliny upadající převážně pod strmými úhly k JZ s indikátory poklesové nebo pravostranné kinematiky. Systémy extenzních puklin vykazují ortogonální charakter v průběhu SZ-JV a SV-JZ s hlavními maximy odpovídající strmému sklonu k SV a SZ.

Hydrogeologický výzkum v PVP Bukov přinesl řadu důležitých informací o charakteru a časových změnách proudění a chemického složení podzemních vod v puklinovém prostředí pevných hornin v hloubkách odpovídajících plánovanému HÚ. Byla vybudována hydrogeologická monitorovací síť, která umožní dlouhodobé sledování režimu podzemních vod v okolí důlního díla. Proudění podzemní vody v oblasti je vázáno na dva dominantní směry struktur, a to SV-JZ a SSZ-JJV. Tyto dva systémy vodivých struktur se projevíly při hydrogeologickém mapování v povrchové části lokality i při dokumentaci vodivých poloh v dole Rožná. U přítoků do PVP Bukov byl zaznamenán při primární dokumentaci pouze systém propustných puklin a zlomů SV-JZ a VSV-ZJZ, později došlo ke vzniku nových přítoků respektive k přesunu některých stávajících na systém poruch ve směru SSZ-JJV. K otevření puklin tohoto systému došlo sekundárně vlivem odlehčení masivu v okolí výrubu.

Režim podzemní vody v okolí důlního díla není stacionární, v průběhu času dochází k výrazným změnám. Obecně v průběhu ražby a úpravy prostoru PVP docházelo k poklesu vydatnosti přítoků podzemní vody. U několika přítoků se vydatnost v průběhu měření zvýšila nebo silně kolísala, měnila se také místa přítoků podzemní vody do PVP, docházelo k sekundárnímu otevírání puklin. V mělkých částech krystalinika se přirozeně vyskytuje podzemní voda typu Ca-HCO_3 , v hlubších částech převažuje typ Na-HCO_3 . V geologicky pestrém, ložiskovém prostředí Rožné se v prostoru dolu nevyskytují podzemní vody typu Ca-HCO_3 (s výjimkou čerstvě vyraženého PVP Bukov), pouze vody Ca-SO_4 . U stabilních přítoků se odchylky obsahů jednotlivých hlavních kationtů a aniontů od průměrné hodnoty v převážné většině pohybují do 10 až 20 %, výjimečně do 50 % s výjimkou chloru, kde je variabilita vysoká. U přítoků ovlivněných oxidací může být změna až ve stovkách % během několika let.

Studium transportních parametrů hornin bylo zaměřeno na posouzení vlastností hornin ve vztahu k migraci radionuklidů v horninovém prostředí, tj. k procesům difúze a sorpce a jejich ovlivnění vlastnostmi horniny (složení, hustotní parametry a struktura). Na tyto činnosti úzce navazovala i charakterizace horninových vzorků metodou měření anizotropie magnetické susceptibility (AMS). Přestože byly studovány vzorky různých horninových litologií a variabilní vnitřní stavbou, naměřené hodnoty efektivních difúzních koeficientů ^3H spadají do poměrně úzkého rozmezí ($0,9 \times 10^{-13}$ – $3,1 \times 10^{-13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$). Vyšší hodnoty difúzních koeficientů byly zjištěny u vzorků s přítomností fraktur (puklin), kdy hodnoty D_e byly cca 4 krát vyšší oproti vzorkům neporušené horniny. Hodnoty difúzních koeficientů ^3H u vzorků s přítomností fraktur se pohybovaly od $3,1 \times 10^{-13}$ do $8,6 \times 10^{-13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Výraznější rozdíly v difuzivitě hornin než u tricia jsou patrné na difúzi aniontu (^{36}Cl a ^{125}I). Toto ukazuje na různou míru vlivu aniontové exkluze jednotlivých horninových typů. Nejodlehlejší hodnoty v difúzních parametrech byly sledovány u vzorků amfibolitů, především pak pro anionty (^{36}Cl , ^{125}I), kdy byly hodnoty D_e nižší než u ostatních typů hornin. Změny difúzních parametrů mezi horninovými vzorky jsou pravděpodobně více závislé na mineralogickém složení a stupni následné přeměny než na vnitřní struktuře horniny - nebyl prokázán výrazný vliv usměrnění

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

magnetické foliace na difúzní koeficienty. Difúze je pravděpodobně ovlivněna sekundárními přeměnami horninových minerálů (nahrazení biotitu chloritem v amfibolitech a seritizace živců). V porovnání s ostatními zkoumanými lokalitami (s výjimkou části vzorků z podzemní laboratoře Josef) vzorky z oblasti PVP Bukov vykazují výrazně nižší difuzivitu jak pro ^3H , tak pro anionty ^{36}Cl a ^{125}I . Sorpce vybraných radionuklidů (Cs, Sr, U, Se) byla sledována na drcených horninových vzorcích. Tyto vzorky se od sebe vzájemně lišily svým mineralogickým složením. Z hlediska sorpčního chování jednotlivých vzorků byl významný zejména variabilní obsah biotitu a amfibolu. Sorpce cesia, jakožto kationtového, sorbujícího se radionuklidu, byla pozorována na všech studovaných vzorcích z PVP Bukov. Nejvyšších hodnot K_d bylo dosaženo na vzorku 2S4-2 a na vzorcích S3-3, S3-4 a S4-3. Tyto vzorky se vyznačovaly přítomností slíd a amfibolů, přičemž se potvrdila původní hypotéza srovnatelné sorpce cesia na vzorky s podobným mineralogickým složením S3-3, S3-4 a S4-3. Nejnižší záchyt cesia byl pozorován na vzorku 2S4-4, s vysokým obsahem magneziohornblendu (frakce C: $K_d \sim 40\text{--}9 \text{ ml g}^{-1}$; frakce D: $K_d \sim 110\text{--}8 \text{ ml g}^{-1}$). Stroncium patří mezi slabě se sorbující radionuklidy, což bylo pozorováno rovněž na vzorcích z PVP Bukov. Výsledné hodnoty K_d byly cca 10 krát nižší než v případě cesia a nebyl pozorován významný rozdíl v sorpci stroncia na jednotlivé horninové vzorky. Vyšší obsah slídových minerálů nevedl k vyššímu záchytu stroncia (frakce C: $K_d \sim 6,7\text{--}3,6 \text{ ml g}^{-1}$; frakce D: $K_d \sim 5\text{--}1,6 \text{ ml g}^{-1}$). Seleničitan patří mezi slabě se sorbující aniontové radionuklidy. Jeho záchyt je dán přítomností Fe-minerálů (pyrit, siderit, magnetit, hematit, atd.) ve struktuře hornin. Vzhledem k tomu, že jedinými Fe-minerály ve studovaných vzorcích byly slídy, jichž bylo velice omezené množství, odpovídal tomuto faktu i nízký záchyt seleničitanu. Rovněž nebyly pozorovány výrazné rozdíly v sorpci na jednotlivé vzorky z PVP Bukov (frakce C: $K_d \sim 4,4\text{--}2,4 \text{ ml g}^{-1}$; frakce D: $K_d \sim 1,5\text{--}0,7 \text{ ml g}^{-1}$). Uran patří spolu se selenem mezi redox-senzitivní prvky, jejich sorpční chování závisí na aktuální speciaci. Vzhledem k tomu, že experimenty s uranem byly prováděny za aerobních podmínek při pH ~ 8 , odpovídá těmto podmínkám výskyt uranu v oxidačním stavu +VI, který v prostředí podzemních vod tvoří nesorbující se karbonátové komplexy. Z tohoto důvodu nebyl na horninových vzorcích pozorován prakticky žádný záchyt uranu a výsledné hodnoty distribučních koeficientů se pohybovaly v rozmezí $0\text{--}1 \text{ ml g}^{-1}$ bez ohledu na mineralogické složení vzorků.

V průběhu výstavby podzemního výzkumného pracoviště (PVP) Bukov byla získána geologická data, která umožnila komplexní charakteristiku horninového prostředí a tvorbu 3D modelů geologické stavby zájmového objemu horninového masivu. 3D strukturně geologické modely pracoviště zohledňují (a) regionální úroveň s vizualizací struktury širšího okolí pracoviště PVP Bukov, včetně zpracované archivní dokumentace DIAMO, s.p., a (b) detailní strukturní vizualizaci pracoviště, která je založena na datech získaných během ražeb laboratoře. Plošný rozsah globálního modelu je shodný s rozsahem nově vytvořené povrchové geologické mapy 1:10 000. Hloubkový dosah globálního modelu je cca 700 m, v závislosti na nadmořské výšce terénu. PVP Bukov a jeho okolí poskytuje dostatečné množství povrchových i hloubkových geologických dat k tvorbě globálního 3D strukturně geologického modelu jen v jeho západní části. Východní část modelu je tak zatížena výraznou mírou nejistoty jak při povrchu, tak zejména v hlubších partiích. Zájmová oblast je charakteristická častým střídáním horninových litologií s výskytem relativně malých horninových vložek. Pro účely tohoto modelu byly tyto litologie zjednodušeny a zanedbány v případě mocností nižších než 10 m. Z hlediska znalosti křehkého porušení masivu lze na základě archivních dat dobře charakterizovat průběh struktur především v těžené části ložiska Rožná (západní části modelu), ačkoli rozsah nejvýznamnějších zlomů zastižených v překopu B-XIIJ nelze ověřit v archivních materiálech. Výsledný model je vyváženou

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

kompilací archivních a nových dat s interpretacemi na základě znalostí strukturně geologické situace v širším okolí PVP Bukov. Hlavním cílem detailní vizualizace PVP Bukov je zjednodušené vyobrazení horninového prostředí podzemní laboratoře pro potřeby plánování a následného vyhodnocení jednotlivých experimentů.

Na základě 3D strukturně geologického modelu byl dále sestaven 3D geomechanický model PVP Bukov. S ohledem na časovou náročnost a posloupnost prováděných prací byl použit model odpovídající znalostem a vyhodnocení prací k březnu 2016. Nejnovější poznatky o tektonické stavbě a geomechanických vlastnostech horninového prostředí nebylo možné z časových důvodů v 3D geomechanickém modelu uplatnit. Vzhledem k samotnému principu provedeného numerického modelování nemá však tato skutečnost zásadní vliv na vytyčený cíl numerického modelování, kterým bylo zhodnocení vlivu provedeného podzemního díla na stabilitu horninového masivu a stanovení pravděpodobného dosahu deformací od raženého díla. Numerický model byl sestaven tak, aby konzervativní formou reprezentoval zjištěné poznatky, zejména s ohledem na bezpečnost. Výsledky provedených numerických analýz byly porovnávány s výsledky provedených konvergenčních měření. V tomto směru byla konstatována dobrá shoda vypočtených a měřených deformací horninového prostředí. Numerické analýzy byly prováděny užitím metody konečných prvků pomocí softwarového vybavení Midas GTS NX. Simulací postupu ražby podzemního díla byl zhodnocen vliv provedení podzemního díla na stabilitu horninového masivu a stanoven pravděpodobný dosah deformací od raženého díla. Pro zhodnocení vlivu možného výskytu zóny porušené horniny byla provedena parametrická studie s variantním modelem porušené zóny. Následně bylo v numerickém modelu na dokončeném podzemním díle aplikováno seismické zatížení relevantní pro podmínky České republiky za účelem posouzení účinků seismického zatížení na stabilitu horninového masivu s podzemním dílem. V případě neporušených hornin (amfibolity a migmatity), lze na základě výsledků provedených analýz předpokládat ovlivnění horninového masivu při realizaci výrubu v okolí výrubu do vzdálenosti 4 m. V ojedinělých méně příznivých případech, jako jsou litologické přechody hornin a přítomnost tektonického porušení masivu, lze předpokládat dosah svislých deformací lokálně až 11 m. V případě vodorovných deformací lze předpokládat posuny v místě výrubu v řádu desetin mm. Tyto závěry platí pro modelovaný tvar a velikost výrubu (světlého profilu do 13,5m²). Při větším rozsahu výrubu, křížení a podobně mohou být hodnoty deformací a deformační zóny vyšší. Co se týče vlivu dynamického zatížení na stabilitu výrubu lze předpokládat, že pro seismické zatížení odpovídající podmínkám České republiky je vliv na stabilitu výrubu téměř zanedbatelný. Pro uvažované maximální amplitudy vychází deformace výrubu v řádech tisícín až setin mm.

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

5 Seznam literatury a použitých podkladů

- ADAMS J. A. S.; GASPARINI P. (1970): Gamma Ray Spectrometry of Rocks (Methods in Geochemistry and Geophysics, 10). Published by Elsevier Publishing Co., Amsterdam / New York, 1970
- ALLARD B., KARLSSON M. (1983): Ion exchange capacities and surface areas of some major components and common fracture filling materials of igneous rocks. Technical Report 83-64. – SKB, Stockholm, Sweden.
- AMBROŽ ed. (1973): Ložisko Rožná Západní část. Geologická mapa 1 : 10.000. – MS archiv oz. GEAM. Dolní Rožínka.
- ANDERS E., GREVESSE N. (1989): Abundances of the elements: Meteoric and solar. – *Geochim. Cosmochim. Acta*, 53, 1, 197–214.
- ANDERSON, J. L., SMITH, D. R. (1995): The effect of temperature and oxygen fugacity on Al-in-hornblende barometry. *American Mineralogist* 80, 549-59.
- ANDERSSON K., TORSTENFELT B., ALLARD B. (1983): Sorption of radionuclides in geologic systems. Technical Report 83-63. – SKB, Stockholm, Sweden.
- ARAPOV J. A., BOJCOV V. J., ČESNOKOV N. I., DJAKONOV A. V., HALBRŠTÁT J., JAKOVJENKO A. M., KOLEK M., KOMÍNEK J., KOZYREV V. E., KREMČUKOV G. A., LAŽANSKÝ M., MILOVANOV I. A., NOVÝ V., ŠORF F. (1984): Československá ložiska uranu. – Československý uranový průmysl, koncern. Příbram. 365 p.
- BAKKER R.J., DIAMOND L.W. (2000): Determination of the composition and molar volume of H₂O-CO₂ fluid inclusions by microthermometry. – *Geochim Cosmochim Acta*, 64, 1753–1764.
- BARJUŠKIN I. M., HEJTMÁNEK J., GURVIČ M. J. U., IVANOV P. A., JURGENSON B. P. (1981): Petrologie a mineralogie ložisek rožensko-olšínského rudního pole. Závěrečná zpráva. – MS archiv oz. GEAM. Dolní Rožínka.
- BARTOŠEK J. (1977): Citlivá metoda stanovení obsahu přirozeně radioaktivních prvků v horninách. – Kandidátská disertační práce, Geofyzika n.p., Brno.
- BARTOŠEK J., HROUDA F., JANÁK F., ONDRA P., PELLANT K., UHMANN J. (1975): Aplikace petrofyzikálních metod pro užitou geologii, závěrečná zpráva za etapu 1975. Geofyzika Brno, výzkumný ústav Brno. GF P025408.
- BARTOŠEK J., CHLUPÁČOVÁ M., KAŠPAREC I., MAŠEK J., ZEMČÍKOVÁ J. (1980): Aplikace petrofyziky pro užitou geologii. – Závěrečná zpráva OFTR č.76–68. MS Geofyzika s.p. Brno.
- BECKER R. H., CLAYTON R. N. (1976): Oxygen Isotope Study of a Precambrian Banded Iron-Formation, Hamersley Range, Western-Australia. – *Geochimica et Cosmochimica Acta* 40, 1153–1165.
- BLUNDY, J. D., HOLLAND, T. J. B. (1990): Calcic amphibole equilibria and a new amphibole-plagioclase geothermometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 104, 208-24.
- BLYTH A. R., FRAPE S. K., TULLBORG E. L. (2009): A review and comparison of fracture mineral investigations and their application to radioactive waste disposal. – *Applied Geochemistry*, 24, 821–835.
- BODNAR R. J., VITYK M. O. (1994): Interpretation of microthermometric data for H₂O-NaCl fluid inclusions. In: De Vivo B, Frezzotti ML (eds.): Fluid inclusions in minerals: Methods and applications. Short course of the working group „Inclusions in Minerals„. Blacksburg, VA, Virginia Polytechnic Institute, 117–130.

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

- BOYNTON, W. V. (1984): Chapter 3. Cosmochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies. – In: Henderson, P., (ed): Rare Earth Element Geochemistry, pp. 115–152. – Developments in Geochemistry 2, Elsevier, Amsterdam.
- BROŽ M., NOVÁKOVÁ L., ŠTRUNC J. (2009): Metodiky geofyzikálního hodnocení granitového prostředí geofyzikálními metodami. Etapová zpráva o řešení projektu v roce 2009. Výzkum vlivu mezizrné propustnosti granitů na bezpečnost hlubinného ukládání do geologických formací a vývoj metodiky a měřicí aparatury, FR-TI1/367. - Ústav struktury a mechaniky hornin AV ČR, Praha.
- BRUKER AXS (2015, 2014): Diffrac.Eva, 4.1. – Karlsruhe, Germany.
- BRUTHANS, J. (2014): Vyhodnocení chemického a izotopického složení podzemní vody Bukov. – MS SÚRAO, Praha.
- BRUTHANS J. (2006): Využití přirozených stopovačů (^{18}O ; ^3H , freony; SF_6) a dalších metod pro zhodnocení doby zdržení vod a charakteru proudění v krasových oblastech ČR), Disertační práce. PŘF UK. Praha. 207 s.
- BUKOVSKÁ Z., NAHODILOVÁ R., SOEJONO I., VERNER K. (2015) Strukturní mapování důlních děl a vrtů PVP Bukov, Technická zpráva za 2. čtvrtletí 2015. – Česká geologická služba.
- BURIÁNEK, D., VERNER, K., HANŽL, P., KRUMLOVÁ, H. (2009): Petrochemical and microstructural comparison between Cambro-Ordovician metagranites and migmatites of the Svatka Unit and the Orlice-Sněžník Unit. – Journal of Geosciences, 54, 181–200.
- BUZEK F., HLADÍKOVÁ J., LEGIERSKI J., ŠMEJKAL V. A VOKURKA K. (1985): Metody zjišťování stabilních a radiogenních izotopů. – MS ČGÚ, Praha.
- BYEGARD, J., JOHANSSON H., SKÅLBERG M., TULLBORG, E.L. (1998): The interaction of sorbing and non-sorbing tracers with different Aspo rock types. SKB Technical Report TR 98-18.
- CARBOL P., ENKVIST I. (1997): Compilation of radionuclide sorption coefficients for performance assessment. SKB rapport R-97-13. – SKB, Stockholm, Sweden.
- CRAIG, H. (1961): Isotopic variations in meteoric waters. Science, 133, 1702–1703.
- CRAWFORD J., NERETNIEKS I., MALMSTRÖM M. (2006): Data and uncertainty assessment for radionuclide K_d partitioning coefficients in granitic rock for use in SR-Can calculations. Report R-06-75. – SKB, Stockholm, Sweden.
- ČERNÝŠEV, V.V. (1959): Vysvětlivky ke geologické mapě rudního pole Rožná-Olší. – MS archiv oz. GEAM. Dolní Rožínka.
- ČERNÝŠEV, V.V., ed (1958): Terénní geologická mapa okolí úseků Rožná a Olší. – MS archiv GEAM. Dolní Rožínka.
- ČERVINKA R., VOPÁLKA D., ADAM R., BRÁZDA L., DRTINOVÁ B., HOFMANOVÁ E., KITTNEROVÁ J., RAMEŠOVÁ L., REIMITZ D., ŠIMÚTHOVÁ Z., ŠTAMBERG K., VETEŠNÍK A. (2015): Transport radionuklidů z úložiště / Vstupní parametry a procesní modely pro hodnocení transportu radionuklidů přes inženýrské bariéry, 1. průběžná zpráva projektu Výzkumná podpora pro bezpečnostní hodnocení hlubinného úložiště, SÚRAO.
- ČERVINKA R., GONDOLLI J., HAVLOVÁ V., RUKAVIČKOVÁ L. (2016): Výběr reprezentativních podzemních vod a příprava jejich syntetických ekvivalentů, TZ 41/2016, SÚRAO.
- DAVIS D. W., LOWENSTEIN T. M., SPENCER R. J. (1990): Melting behavior of fluid inclusions in laboratory-grown halite crystals in the systems $\text{NaCl-H}_2\text{O}$, $\text{NaCl-KCl-H}_2\text{O}$, $\text{NaCl-MgCl}_2\text{-H}_2\text{O}$, and $\text{NaCl-CaCl}_2\text{-H}_2\text{O}$. – Geochim. Cosmochim. Acta, 54, 591–601.
- DEBON F, LE FORT P (1983) A chemical–mineralogical classification of common plutonic rocks and associations. – Trans Roy Soc Edinb, Earth Sci 73: 135–149.
- DĚDÁČEK K., FROLKA J., GNOJEK I., HANÁK J., HRUŠKOVÁ L., HUDEČKOVÁ E., CHLUPÁČOVÁ M., MATĚJ F., ONDRA P., ONDRÁK J., RŮŽIČKOVÁ M. SEDLÁK J., SUCHÝ P., ŠRÁMEK J.(2003): Pořádání a využívání geofyzikálních dat pořízených nákladem státního rozpočtu, etapa

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

2003. – MS závěrečná zpráva, Geofyzika a.s. 128 stran, Brno, Ministerstvo životního prostředí, Praha, Geofond GF P107500.
- DEMEK J., MACKOVČIN P. (2006): Zeměpisný lexikon ČR. Hory a nížiny – Agentura ochrany přírody a krajiny České republiky, Brno, 590 s.
- ENGLER T.W. (2012): Electrical properties of rocks. Chapter 2. Lecture notes for PET 370. Spring 2012. N. Mechico.
- FEDIUK F., PEŠKOVÁ J., REZEK V. (1973): Mineralogicko-geologické a petrografické vyhodnocení ložiska Rožná. – MS archiv oz. GEAM. Dolní Rožínka.
- FRANĚK J., BINKO R., BUKOVSKÁ Z., ČÍŽEK D., ČOPJAKOVÁ R., DOBEŠ P., DRAHOTA J., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ B., GADAS P., HALADOVÁ I., HANÁK J., HOLEČEK J., JANOUŠEK V., JELÉNEK J., KLOMÍNSKÝ J., KOŠULIČOVÁ M., LEXA O., MARTÍNEK K., NAHODILOVÁ R., PERTOLDOVÁ J., RUKAVIČKOVÁ L., SEDLÁČEK J., SOEJONO I., SVÍTIL R., ŠTĚDRÁ V., ŠVAGERA O., TRUBAČ J., VERNER K., VRÁNA S., ŽÁČEK V., ŽÁČKOVÁ E., BÍLÝ P., KASÍKOVÁ J., LACHMAN V., NOVÁK P., ZUNA M., BLÁHA P., BLÁHOVÁ J., FIALA Z., HANZLÍKOVÁ I., HERLE V., CHÝLE A., KOCOUREK R., KOHOUŠEK I., MÁCA M., MALÝ V., NAJSER J., SOSNA K., ŠTEFAN M., VOJTĚCHOVSKÁ A., VYSOKÁ H., ZÁRUBA J., BALVÍN A., CÁDROVÁ L., ACKERMAN L., BROŽ M., ČERNÍK M., FRYDRYCH D., HOKR M., KUDLÁČEK V., KVAPILOVÁ Š., LAUFEK F., RÁLEK P., VALENTA J. (2012): Roční zpráva 2012 projektu FR-TI 3/325: Výzkum termální zátěže hornin – perspektivy podzemního skladování tepelné energie. – MS Česká geologická služba. Praha.
- FRANĚK J. (2013): Výzkum termální zátěže hornin – perspektivy podzemního skladování tepelné energie. Roční zpráva za 2013 – III. etapa. – Česká geologická služba. Praha. (RZ 2013).
- FRANĚK J. (2014): Výzkum termální zátěže hornin – perspektivy podzemního skladování tepelné energie. Závěrečná zpráva, 541 s. MS Česká geologická služba. (RZ 2013)
- GARCÍA-GUTIÉRREZ, M., CORMENZANA, J. L., MISSANA, T., MINGARRO, M., MOLINERO, J. (2003): Overview of laboratory methods employed for obtaining diffusion coefficients in FEBEX compacted bentonite. – J. of Iberian Geology 32, 37-53.
- GEHÖR S., KAERKI A., TAIKINA-AHO O., KARHU J., LOEFMAN J., PITKAENEN P., RUOTSALAINEN P. (2002): Fracture calcites at Olkiluoto – Evidence from quaternary infills for palaeohydrogeology. – Posiva Reports, 118, Helsinki.
- GOETZ A. F. H. (2009): Three decades of hyperspectral remote sensing of the Earth: A personal view - Remote Sensing of Environment 113, 5-16.
- GOETZ A. F. H., LAWRENCE C. R., KINGSTON M. J. (1982): Mineral identification from orbit: initial results from the shuttle multispectral infrared radiometer - Science 218.4576, 1020-1024.
- GOSMAN, A., JECH, Č. (1989): Jaderné metody v chemickém výzkumu. Academia, Praha.
- GRÉGOIRE V., DE SAINT BLANQUAT M., NÉDÉLEC A., BOUCHEZ J. L. (1995): Shape anisotropy versus magnetic interactions of magnetite grains: experiments and application to AMS in granitic rocks. - Geophysical Research Letters, 22(20), 2765-2768
- GRINĚNKO V. A. (1962): Prigotovlenije dvoukisi sery dlja izotopnogo analiza. – Ž. neorg. chimiji, 7, 2479, Moskva.
- HAGER, B., FOELSCH, U. (2015): Stable isotope composition of precipitation in Austria. Austrian Journal of Earth Sciences 108 (2), 2-13.
- HÁJEK A. (1987): Souběžné výsledky průzkumu a celkový charakter vývoje polymetalického zrudnění na uranovém ložisku Rožná (1957-1986). – MS archiv oz. GEAM. Dolní Rožínka.

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

- HÁJEK A., JURGENSON B. P., (1982): Petrologie metamorfovaných hornin moldanubika v rudním poli Rožná - Olší. – Sbor. Hornická Příbram ve vědě a technice, sekce nerostných surovin, 42–68.
- HÁJEK, A., UHLÍK, Z. (1987): Vývoj uranové mineralizace v rudním poli Rožná-Olší. In: Mineralógiá uránových a s nimi súvisiacich nerastných surovín. – Sborník Semináře, 96-106, Spišská Nová Ves.
- HAKANEN M., ERVANNE H., PUUKKO E. (2014): Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto. POSIVA 2012-41. – Posiva Oy, Eurajoki, Finland.
- HANÁK J. (2016): Stanovení petrofyzikálních charakteristik horninového prostředí pro území potenciálních lokalit HÚ. Průběžná zpráva. SÚRAO Praha, 38 str.
- HANÁK J., ONDRA P., HAVLOVÁ V. (2015): Rešerše petrofyzikálních dat pro území potenciálních lokalit HÚ, MS, SÚRAO, Praha zpráva č. 3.2. příloha Průběžná technické zprávy č. 4 projektu Výzkum procesů pole vzdálených interakcí HÚ vyhořelého jaderného paliva a vysoce aktivních odpadů, sdružení Geobariéra. – Registrační číslo Geofundu 1291/2007.
- HANÁK J., BREITER K., RUKAVIČKOVÁ L., ONDRA P., SOSNA K., NOVÁK P., HAVLOVÁ V., NOVÁKOVÁ L., VEČERNÍK P. (2010a): Výzkum vlivu mezizirnné propustnosti granitů na bezpečnost hlubinného ukládání do geologických formací a vývoj metodiky a měřicí aparatury. Odběr jádra z archivních vrtů. – Závěrečná zpráva, 67 s. MS ČGS Praha.
- HANÁK J., BREITER K., RUKAVIČKOVÁ L., CHLUPÁČOVÁ M., ONDRA P., SOSNA K., NOVÁK P., HAVLOVÁ V., NOVÁKOVÁ L. (2010b): Výzkum vlivu mezizirnné propustnosti granitů na bezpečnost hlubinného ukládání do geologických formací a vývoj metodiky a měřicí aparatury. Odběr jádra ze srovnávacích vrtů. – Závěrečná zpráva, 64 s. MS Česká geologická služba Praha.
- HANUSOVÁ I., VENCL M. (2013): Stanovení původu a stáří vody z vrtu V-13 z uranového ložiska Rožná. – MS SÚRAO, Praha.
- HANŽL P., ČECH S., BUBÍK M., BURIÁNEK D., HRDLÍČKOVÁ K., HROCH T., KREJČÍ Z., LEXA O., MARTÍNEK K., NÝVLT D., PERTOLDOVÁ J., PETÁKOVÁ Z., PETROVÁ A., RAJCHL M., RAPPRICH V., STÁRKOVÁ M., SKÁCELOVÁ Z., ŠEBESTA J., VÍT J., VERNER K., ŽÁČEK V. (2014): Metodické pokyny ke Směrnici pro sestavení Základní geologické mapy ČR 1 : 25 000, II geologie. – 107 str., MS, Čes. geol. služba, Praha.
- HANŽL P., ČECH S., DOLEŽALOVÁ Š., DUŠEK K., GÜRTLEROVÁ P., KREJČÍ Z., KYCL P., MAN O., MAŠEK D., MIXA P., MORAVCOVÁ O., PERTOLDOVÁ J., PETÁKOVÁ Z., PETROVÁ A., RAMBOUSEK P., SKÁCELOVÁ Z., ŠTĚPÁNEK P., VEČEŘA J., ŽÁČEK V. (2009): Směrnice pro sestavení Základní geologické mapy České republiky 1 : 25 000. – 45 s. Čes. geol. služba. Praha.
- HAVLOVÁ V., VOPÁLKA D. (2010): Tritium (HTO) as a conservative tracer used for characterization of contaminant migration in porous rock environment. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry 286, 785-791.
- HAVLOVÁ V., ZUNA M., TRPKOŠOVÁ D., BRÁZDA L., KOLOMÁ K., GVOŽDÍK L., MILICKÝ M., SOSNA K., KOHOUŠEK I., SMUTEK J., ROLL M., STAŠ L., SOUČEK K. (2017): Výzkumná zpráva o postupu prací a dosažených výsledků za rok 2016. Výzkumná práce projektu TA402P098 Přenos hodnot migračních parametrů granitických hornin z mikroměřítko do reálného měřítko horninového masivu (PAMIRE). ÚJV Řež, a.s, 2017
- HAZDROVÁ M., ČERMÁK V., JURÁNEK J., JURZA F., MATOLÍN M., PAČES T., SLEPIČKA V. (1981): Geotermální energie a její využití. Knihovna Ústředního ústavu geologického, 56, 127 p.,
- HEJTMAN B. (1962): Petrografie metamorfovaných hornin. – ČSAV, Praha. 532 s.

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

- HOLLOCHER, K., ROBINSON, P., WALSH, E., ROBERTS, D. (2012): Geochemistry of amphibolite-facies volcanics and gabbros of the Støren Nappe in extensions west and southwest of Trondheim, Western Gneiss Region, Norway: a key to correlations and paleotectonic settings. – American Journal of Science, v. 312, p. 357-416.
- HORNEMAN A., STUTE. M, SCHLOSSER P., SMETHIE W., SANTELLA N., HO D. T., VAN GEEN A. (2008), Degradation rates of CFC-11, CFC-12 and CFC-113 in anoxic shallow aquifers of Arai-hazar, Bangladesh. Journal of contaminant hydrology 97(1), 27-41.
- HRKALOVÁ ed. (2011): Zhodnocení existujících geologických a dalších informací z území mezi ložisky Rožná a Olší z hlediska vymezení horninového masivu potencionálně vhodného po vybudování hlubinného úložiště. SÚRAO - Aquatest. 27 str.
- HROUDA F. (1982): Magnetic anisotropy of rocks and its application in geology and geophysics. Geophys. Surv., 5, 37-82.
- HROUDA F., JELÍNEK V., HRUŠKOVÁ L. (1990): A package of programs for statistical evaluation of magnetic data using IBM-PC computers. EOS transactions. – Am. Geoph. Union, SF, 1289.
- CHADIMA. M., JELÍNEK V. (2008): Anisoft 4.2 - anisotropy data browser. Contrib. Geophys. Geodesy 38, 41. Special Issue.
- CHAPMAN, N. A., MCKINLEY, I. G. (1987): The geological disposal of nuclear waste. – J. Wiley and Sons, 1987.
- CHLUPÁČ I., ŠTORCH P. (1992): Regionálně geologické dělení Českého masívu na území České republiky – Čas. Mineral. Geol. 37, 257–275.
- CHVÁTAL M. (2005): Úvod do systematické mineralogie. – Silikátový svaz, Praha.
- ICDD (2002): PDF-2 Database, International Centre for Diffraction Data, Newton Square, USA.
- IAEA/WMO (2015): Global Network of Isotopes in Precipitation. The GNIP Database. Accessible at: <http://isohis.iaea.org>.
- IRVINE T., BARAGAR W. (1971) A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. – Can J Earth Sci 8: 523–548.
- INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS COMMISSION ON TESTING METHODS (ISRM) (1978): Suggested methods for determining sound velocity, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 15, 53-58 s. - Pergamon Press Ltd.
- JAKOB, A. (2004): Matrix diffusion for performance assessment - experimental evidence, modelling assumptions and open issues. PSI Report Nr. 04-08.
- JANOUSEK V., ROGERS G., BOWES D. R. (1995): Sr-Nd isotopic constraints on the petrogenesis of the Central Bohemian Pluton, Czech Republic. – Geol. Rdsch., 84, 520–534.
- KAŠPAREC I., BARTOŠKOVÁ L., CHLUPÁČOVÁ M., HROUDA F., WOHLGEMUTH J. (1988): Výzkum v oboru petrofyziky - ložiskové a regionální aplikace, etapová zpráva za léta 1986 a 1987. Geofyzika Brno, výzkumný ústav Brno. GF P069101.
- KIM S. T., O'NEIL J. R. (1997): Equilibrium and nonequilibrium oxygen isotope effects in synthetic carbonates. – Geochimica et Cosmochimica Acta, 61, 3461-3475.
- KNĚŽ J. (1997): Elektrické vlastnosti hornin, str. 77-108 In: M. Kobr, ed., Petrofyzika. Univerzita Karlova, Karolinum, Praha.
- KOBR M., HRÁCH S., CHLUPÁČOVÁ M., KNĚŽ J., MAREK F., MATOLÍN M. (1997): PETROFYZIKA. – PF UK Praha, 1997.
- KOERTING F., ROGASS C., KAEMPF H., LUBITZ C., HARMS U., SCHUDACK M., ALTENBERGER U. (2015): Drill Core Mineral Analysis by Means of the Hyperspectral Imaging Spectrometer HySpex, XRD and Asd in Proximity of the MÝTINA Maar, Czech Republic.

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

- The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 40(1), 417.
- KOPAČKOVÁ V., KOUČKÁ, L. (2014): Mineral mapping based on automatic detection of multiple absorption features - EARSeL eProceedings, 13(S1): 95-99. DOI:10.12760/02-2014-1-17
- KOPAČKOVÁ V., VERNER K., FRANĚK J., MARTÍNEK K., ŠEBESTA J., VONDROVIC L. (2011): Geologické výzkumné práce v části VÚ Boletice k vymezení potenciálně vhodného území pro umístění hlubinného úložiště: TEKTONICKÁ ANALÝZA A INTERPRETACE DRUŽICOVÝCH SNÍMKŮ. Závěrečná zpráva, 43 s. MS SÚRAO, Aquatest, ČGS.
- KOŠLER J., KONOPÁSEK J., SLÁMA J., VRÁNA S. (2014): U–Pb zircon provenance of Moldanubian metasediments in the Bohemian Massif – Journal of the Geological Society, 171, 83–95.
- KRÁLOVCOVÁ J. ed. (2012): Model Kraví Hora. Závěrečná zpráva. Technická univerzita Liberec. 104 str.
- KRÁSNÝ, J., KNĚŽEK, M., ŠUBOVÁ, A., DAŇKOVÁ, H., MATUŠKA, M., HANZEL, V. (1982): Odtok podzemní vody na území Československa. – ČHMÚ, Praha, 50 s.
- KŘÍBEK B., HRAZDÍRA P., SIXTA V., ŠIKL J., MIKŠOVSKÝ M., VENERA Z., SOBOTKA M. (1997): Strukturní, hydrogeologické a geochemické zhodnocení horninového prostředí ložiska Rožná s ohledem na uložení odkalištních vod. – ČGÚ, Praha.
- KŘÍBEK, B., HÁJEK, A. eds. (2005): Uranové ložisko Rožná, model pozdně variských a povariských mineralizací. – Česká geologická služba. Praha. 1–98.
- KŘÍBEK B., ŽÁK K., DOBEŠ P., LEICHMANN J., PUDILOVÁ M., RENÉ M., SCHARM B., SCHARMOVÁ M., HÁJEK A., HOLECZY D., HEIN U., LEHMANN B. (2009): The Rožná uranium deposit (Bohemian Massif, Czech Republic): shear zone-hosted, late Variscan and post-Variscan hydrothermal mineralization. – Mineralium Deposita, 44, 1, 99–128.
- KUKAL Z. (1985): Návod k pojmenování a klasifikaci sedimentů. – Metodická příručka 2. ÚUG. Praha. 80s.
- 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., MARESCH, W. V., NICKEL, E. H., ROCK, N. M. S., SCHUMACHER, J. C., SMITH, D. C., STEPHENSON, N. C. N., UNGARETTI, L., WHITTAKER, E. J. W., YOUZHI, G. (1997): Nomenclature of amphiboles: Report of the subcommittee on amphiboles of the international mineralogical association commission on new minerals and mineral names. – Mineralogical Magazine, 61, 2, 295–321.
- LEVER, D. A., WOODWARK, D. R. (1990): Radionuclide transport by groundwater flow through geosphere. Current status 1989. Nirex Safety Series NSS/G 113. Harwell Lab., Didcot, UK.
- LÖFGREN M. (2004): Diffusive properties of granitic rock as measured by in situ electrical methods. PhD thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- LÖFGREN, M., NERETNIEKS, I. (2002): Formation factor logging in situ by electrical methods. Background and methodology. SKB Technical Report TR-02-07.
- MATOLÍN M. (1970): Radioaktivita hornin Českého masívu. Academia, Praha, 99 str.
- MANOVÁ M., MATOLÍN M. (1995): Radiometrická mapa České republiky 1 : 500 000. – Česká geologická služba, Praha, 19 s.
- MCCREA, J. M. (1950): On the isotopic chemistry of carbonates and a paleotemperature scale. – Journal of Chemical Physics, 18, 849–857. Washington.
- MCDONOUGH W.F., SUN S.S. (1995): The Composition of the Earth. – Chemical Geology, 120, 223-253.

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

- MELICHAR, R. (1995): The structural analysis of the Polička and Svratka units. – Unpublished PhD thesis. Charles University. Prague. 1–271.
- MELNYK T. W., SKEET A. (1986): An improved technique for determination of rock porosity. – Can. J. Earth Sci. 23, 1068 - 1074.
- MESHEDE, M. (1986): A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram. – Chem Geol 56: 207–218.
- MÍSAŘ, Z., DUDEK, A., HAVLENA, V., WEISS, J. (1983): Geologie ČSSR I. – SPN. Praha. 1–333.
- MISSANA T., GARCÍA-GUTIÉRREZ M. (2012): Summary of the experiments for EC-CROCK Project. Part 2. Caesium adsorption onto biotite. Technical Report CIEMAT/CROCK/2/2012. – CIEMAT, Madrid, Spain.
- MORENO, L., ARVE, S., NERETNIEKS, I. (1989): SKB WP-Cave Project. Transport of escaping radionuclides from WP-Cave repository to the biosphere. SKB Technical Report TR 89-05, Sweden.
- MORIMOTO, N., FABRIES, J., FERGUSON, A. K., GINZBURG, I. V., ROSS, M., SEIFERT, F. A., ZUSSMAN, J., AOKI, K., GOTTARDI, G. (1988): Nomenclature of pyroxenes. – Mineral. Mag., 52, 535–550.
- NAVRÁTILOVÁ V. (2011): Zhodnocení existujících geologických a dalších informací z území mezi ložisky Rožná a Olší z hledisk a vymezení horninového masivu potencionálně vhodného pro vybudování hlubinného úložiště. Závěrečná zpráva 115 s.
- NERETNIEKS, I. (1990): Solute transport in fractured rock - Applications to radionuclide waste repositories. SKB Technical Report TR 90-38, Sweden.
- OHLSSONS, Y., NERETNIEKS, I. (1995): Literature survey of matrix diffusion theory and of experiments and data including natural analogues. SKB Technical Report TR 95-12 , Sweden.
- OLHOEF G.R. (1981): Electrical properties of rocks. In: Physical Properties of Rocks and Minerals, McGraw-Hill Comp., Ed. Touloukian, 1981.
- ONDŘÍK J. (2010a): Lokalita Skalka – Ověření plošné a prostorové lokalizace hlubinného úložiště -Podzemní stavby hlubinného úložiště. Skalka-Kraví hora. Projektová studie. EGP Invest, Energoprojekt. 19 s.
- ONDŘÍK J. (2010b): Skalka – digitální geologické mapy, 4. fáze prací. Diamo. 7 str.
- ONDŘÍK J. (2010c): Skalka – digitální geologické mapy, 5. fáze prací. Diamo, 17 str.
- ONDŘÍK J. (2010d) Hydrogeologická charakteristika jižní části uranového ložiska Rožná a uranového ložiska Olší se zřetelem na umístění hlubinného úložiště VJP a RAO na lokalitě Kraví hora Diamo, 78 str.
- ONDŘÍK J. (2011): Hydrogeologická charakteristika jižní části uranového ložiska Rožná a ložiska Olší se zřetelem na umístění hlubinného úložiště na lokalitě Kraví hora a 3D model ložiska Olší a jižní části ložiska Rožná. Diamo, 51 str.
- PEARCE, J. A., NORRY, M. J. (1979): Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y, and Nb variations in volcanic rocks. – Contrib Mineral Petrol 69: 33–47.
- PERTOLDOVÁ J., HALODOVÁ P., VERNER K., KOŠULIČOVÁ M., PERTOLD Z., KOŠLER J., KONOPÁSEK J., PUDILOVÁ M. (2009): Metamorphic history of skarns, origin of their protolith and implication for genetic interpretation; an example from three units of the Bohemian Massif. Journal of Geosciences 54, 2, 101-134. ISSN 1802-6222. DOI 10.3190/jgeosci.044
- PERTOLDOVÁ J., VERNER K., VRÁNA, S., BURIÁNEK, D., ŠTĚDRÁ V., VONDROVIC L. (2010): Comparison of lithology and tectonometamorphic evolution of units at the northern margin of the Moldanubian Zone: implications for geodynamic evolution in the northeastern part of the Bohemian Massif. - Journal of Geosciences, 55, 299–319.

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

- PIN C., BRIOT D., BASSIN C., POITRASSON F. (1994): Concomitant separation of strontium and samarium–neodymium for isotopic analysis in silicate samples, based on specific extraction chromatography. *Anal. Chim. Acta* 298, 209–217.
- PITRA P., GUIRAUD M. (1996): Probable anticlockwise P-T evolution in extending crust: Hlinsko region, Bohemian Massif. – *Journal of Metamorphic Geology* 14, 49–60.
- PLHAL J, ed. (1972): Geologická mapa 1 : 5.000 úsek Habří. – MS archiv oz. GEAM. Dolní Rožínka.
- PLUSKAL O., ed. (1974): Geologická mapa ložiska Rožná 1 : 2.000. – MS archiv oz. GEAM. Dolní Rožínka.
- 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.
- POSIVA OY (2012): Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto – Features, Events and Processes 2012. POSIVA 2012-07. – Posiva Oy, Eurajoki, Finland.
- POST J.E, BISH D.L. (1989): Rietveld refinement of crystal structures using powder X-ray diffraction data. In: Bish, D.L. and Post, J.E. (Eds), *Reviews in Mineralogy - Modern Powder Diffraction*, Mineralogical Society of America, 20, 277-308.
- POTY B., LEROY J., JACHIMOWICZ L. (1976): Un nouvel appareil pour la mesure des températures sous le microscope: L' installation de microthermometrie Chaixmeca. – *Bull. Soc. fr. Mineral. Cristallogr.* 99: 182–186.
- PP2002.03 Metodický postup - Stanovení difúzních parametrů hornin a půd. Pracovní postup. ÚJV Řež, a.s., 2009.
- PROCHÁZKA J. ET AL. (2004): Seznam účelových map 1 : 10 000 potřebných pro výběr lokalit HÚ a popis jejich odborné náplně. Směrnice pro vybrané účelové mapy. Závěrečná zpráva – MS SÚRAO.
- PROCHÁZKA V. (2010): Fosfáty a akcesorické oxidy ve vybraných granitoidech a pararulách moldanubické oblasti v jihovýchodních a jižních Čechách. Disertační práce. Praha, Univerzita Karlova, Přírodovědecká fakulta. 87 str.
- RENÉ M. (2002): The REE-U-Th distribution in hydrothermally altered rocks at the Rožná uranium deposit, Czech Republic.– In: Kříbek B., Zeman J. (eds.): *Uranium deposits: From their genesis to their environmental aspects. Proc. Int. Workshop organized by the Czech Group of the IAGOD, Prague, September 10–11, 2002*, 107–110. Czech Geol. Surv. Praha.
- RODGER A., LAUKAMP C., HAEST M., CUDAHY T. (2012): A simple quadratic method of absorption feature wavelength estimation in continuum removed spektra – *Remote Sensing of Environment*, 118, 273-283.
- ROGASS C., SEGL K., KUESTER T., KAUFMANN H. (2013): Performance of correlation approaches for the evaluation of spatial distortion reductions – *Remote sensing letters*, 4(12), 1214-1223.
- Rtuřová porozimetrie. ÚACH VŠCHT [online]. 4.5.2017 [cit. 2017-05-04] Dostupné z uat.vscht.cz/download.php?d=11&n=1_porozimetrie.pdf.
- RUKAVIČKOVÁ L., HOLEČEK J., MYŠKA O., VENCL M., VONDROVIC, L. (2016): Hydrogeologický výzkum v Podzemním výzkumném pracovišti Bukov v dole Rožná. - *Zprávy o geologických výzkumech*; 49;. Česká geologická služba, Praha.
- RUKAVIČKOVÁ L., HANÁK J., HOLEČEK J., DOBEŠ P., HANŽL P., CHLUPÁČOVÁ M., ONDRA P., BULÍČEK P., BREITER K., MAŇÁK L., PACHEROVÁ P., BLÁHA V., MYŠKA O. (2012): Aplikace

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

- geomechanického a hydrochemického terénního výzkumu. – Závěrečná zpráva, 147 s. MS Archiv ČGS.
- RUKAVIČKOVÁ L., HOLEČEK J., BREITER K., MAŇÁK L., DOBEŠ P., PACHEROVÁ P., PAČES T., HANÁK J., HANŽL P., NAJSER J., HAVLOVÁ V., ZÁRUBA J., BLÁHA V., MYŠKA O., ROJOVSKÝ M. (2011): Výzkum vlivu mezizrnné propustnosti granitů na bezpečnost hlubinného ukládání do geologických formací a vývoj metodiky a měřicí aparatury. Vývoj metodiky terénního výzkumu hydrochemických parametrů na srovnávacích vrtech. – Závěrečná zpráva, 193 s. MS ČGS Praha.
- ŘÍČKA, A. (2010): Proudění a geochemie podzemních vod v ložiskové oblasti Rožná. Disertační práce. – MU Brno.
- SEDLÁK J. (2010): Strukturně geologická interpretace v nejbližším okolí lokality Skalka (letecká gama spektrometrie, letecká magnetometrie, pozemní gravimetrie). Závěrečná zpráva + 16 mapových příloh. Miligal, 23 str.
- SHAND S. J. (1943): Eruptive Rocks. Their Genesis, Composition, Classification, and Their Relation to Ore-Deposits with a Chapter on Meteorite, 2nd edition. John Wiley & Sons, New York, 1–444.
- SCHULMANN K., KONOPÁSEK J., JANOUŠEK V., LEXA O., LARDEAUX J. M., EDEL J. B., ŠTÍPSKÁ P., ULRICH S. (2009): An Andean type Palaeozoic convergence in the Bohemian Massif. – Comptes Rendues Geosciences, 341, 266–286.
- SCHULMANN K., KRÖNER A., HEGNER E., WENDT I., KONOPÁSEK J., LEXA O., ŠTÍPSKÁ P. (2005): Chronological constraints on the pre-orogenic history, burial and exhumation of deep-seated rocks along the eastern margin of the Variscan orogen Bohemian Massif, Czech Republic – Amer. J. Sci. 305, 407–448.
- SCHULMANN, K., LEXA, O., ŠTÍPSKÁ, P., RACEK, M., TAJČMANOVÁ, L., KONOPÁSEK, J., EDEL, J. B., PESCHLER, A., LEHMANN, J. (2008): Vertical extrusion and horizontal channel flow of orogenic lower crust: key exhumation mechanisms in large hot orogens? – Journal of Metamorphic Geology, 26, 273–297.
- SINE (2011): Vyhláška MŽP a MZd ČR č. 5/2011 Sb. o vymezení hydrogeologických rajonů a útvarů podzemních vod, způsobu hodnocení stavu podzemních vod a náležitostech programů zjišťování a hodnocení stavu podzemních vod.
- SKAGIUS, K., NERETNIEKS, I. (1986): Porosities and diffusivities of some non-sorbing species in crystalline rocks. – Water Resour. Res. 22, 389–397.
- SÖDERLUND M., LUSA M., LEHTO J., HAKANEN M., VAARAMAA K., LAHDENPERÄ A-M. (2011): Sorption of Iodine, Chlorine, Technetium and Cesium in Soil. Working Report 2011-04. – Posiva Oy, Eurajoki, Finland.
- SÖDERLUND M., LUSA M., VIRTANEN S., VÄLIMAA I., HAKANEN M., LEHTO J., LAHDENPERÄ A-M. (2014): Distribution Coefficients of Caesium, Chlorine, Iodine, Niobium, Selenium and Technetium on Olkiluoto Soils. Working Report 2013-68. – Posiva Oy, Eurajoki, Finland.
- SÖDERLUND M., VIRKANEN J., HOLGERSSON S., LEHTO J. (2016): Sorption and speciation of selenium in boreal forest soil. – J. Environ. Radioact., 164, 220–231.
- SOUČEK K. (2010): Hodnocení hornin pro účely úkolu Skalka – digitální geologické mapy. Geonika, 33 str.
- STÁRKOVÁ, I. ed. (1994): Geologická mapa ČR 24-13 Bystřice nad Pernštejnem – Český geologický ústav. Praha.
- STEIGER R. H., JÄGER E. (1977): Subcommission on Geochronology: convention on the use of decay constants in geo- and cosmochronology. – Earth Planet Sci Lett, 36, 359–362.
- SUESS, F. E. (1926): Intrusionstektonik und Wandertektonik im Variszischen Grundgebirge. – Verlag Borntrager. Berlin.

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

- SVOBODA, J. ed. (1966): Regional Geology of Czechoslovakia. Part I. The Bohemian Massif. – Nakladatelství Československé akademie věd. Praha. 257–272.
- ŠTAMBERG K. (1998): Modelování migračních procesů v životním prostředí. – Vydavatelství ČVUT, Praha.
- SCHÜGERL R. (2010). Vliv fyzikálních vlastností na rychlost průchodu seismických vln horninami. Acta Geologica Slovaca, ročník 2, 1, 2010, str. 69-76.
- TAJČMANOVÁ L., KONOPÁSEK J., SCHULMANN K. (2006): Thermal evolution of the orogenic lower crust during exhumation within a thickened Moldanubian root of the Variscan belt of Central Europe – Journal of Metamorphic Geology, 24, 2, 119–134, ISSN 0263–4929.
- TAJČMANOVÁ, L., SOEJONO, I., KONOPÁSEK, J., KOŠLER, J., KLOETZLI, U. (2010): Structural position of high-pressure felsic to intermediate granulites from NE Moldanubian zone (Bohemian Massif). – Journal of the Geological Society London, 167, 329–345.
- TARLING D. H., HROUDA F. (1993): The magnetic anisotropy of rocks. Chapman & Hall, London 1993, 217 s.
- TOMEK F., POUR O., BUKOVSKÁ Z., SOEJONO I., MÜLLEROVÁ P. (2015) Strukturní mapování důlních děl a vrtů PVP Bukov, Technická zpráva za 2. čtvrtletí 2015, Příloha 3 - Souborná vrtná kolonka jádra S-3. – MS Česká geologická služba.
- TULLBORG E-L., DRAKE H., SANDSTROM B. (2008): Palaeohydrology: A methodology based on fracture mineral studies.– Applied Geochemistry, 23, 1881–1897.
- UHMANN J. (1962): Výzkum hustot hornin ČSSR, Geofond GF P015515.
- UHMANN J., JANÁK F., KOZEL J., BARTOŠEK J., MITEVOVÁ J. (1964): Fyzikální vlastnosti hornin. – MS – Ústav užité geofyziky Brno. 99 str.
- VAN DEN KERKHOF A.M., THIERY R. (2001): Carbonic inclusions. –Lithos, 55, 49–68.
- VAN DER MEER F. (2004): Analysis of spectral absorption features in hyperspectral imagery - International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 5, 55-68.
- VAN DER MEER F., KOPAČKOVÁ V., VAN DER WERFF H., KOUČKÁ L., BAKKER W. (v recenzním řízení): Wavelength feature mapping as a proxy to mineral chemistry for investigating geologic systems: an example from the Rodalquilar epithermal systém - International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation.
- VERNER, K., BURIÁNEK, D., VRÁNA, S., VONDROVIC, L., PERTOLDOVÁ, J., HANŽL, P., NAHODILOVÁ, R. (2009): Tectonometamorphic features of geological units along the northern periphery of the Moldanubian Zone (Bohemian Massif). – Journal of Geosciences, 54, 2, 87–100.
- VERNER K., BUKOVSKÁ Z., SOUČEK K., VAVRO M., STAŠ L., KALÁB Z., HAVLOVÁ V., KUČERA P., et al. (2015): Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov. Roční etapová zpráva – MS SÚRAO Praha, 245 s.
- VONDROVIC L., FRANĚK J., ZUNA M., NOVÁK P., DOLÁKOVÁ E. (2013): Výzkum termální zátěže hornin – perspektivy podzemního skladování tepelné energie. Roční zpráva za rok 2013, III. etapa – Dílčí výsledky laboratorního výzkumu. – Česká geologická služba. Praha. (RZ 2013, příloha 1).
- VONDROVIC L., VERNER K. ed. (2012): Závěrečná zpráva 4. etapy projektu. – MS archiv oz. GEAM. Dolní Rožínka.
- VOPÁLKA D., FILIPSKÁ H., VOKÁL A. (2006): Some methodological modifications of determination of diffusion coefficients in compacted bentonite. Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 932: 983-990.
- WALKER S. J., WEISS R., F., & SALAMEH P. K. (2000): Reconstructed histories of the annual mean atmospheric mole fractions for the halocarbons CFC-11 CFC-12, CFC-113, and

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

carbon tetrachloride. Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012), 105(C6), 14285-14296.

WIEDENMANN D., KELLER L., HOLZER L., STOJADINOVIC J., MÜNCH B., SUAREZ L., FUMEY B., HAGENDORFER H., BRÖNNIMANN R., MODREGGER P., GORBAR M., VOGT U. F., ZÜTTEL A., LA MANTIA F., WEPF R., GROBÉTY B. (2013): Three-Dimensional Pore Structure and Ion Conductivity of Porous Ceramic Diaphragms, AIChE Journal, 59, 1446–1457.

WOOD, D. A. (1980): The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas on the British Tertiary Volcanic Province. – Earth and Planetary Science Letters, 50, 11-30.

ZAVORAL J., CINK R., ČERVENÝ J., EICHLER J., HOŘEJŠÍ V., CHLUMSKÝ J., KAŠPAR I., KURKA J., KŘÍŽOVÁ H., MENZELOVÁ O., MITTNEROVÁ A., MÜHLDOF J., PAVLÍK J., POLÁK V., PŘIDALOVÁ O., SMEKAL A., ŠKOPEK J., ŠŤASTNÝ J., ŠVANDA A., VANÍČEK I. (1987): Metodiky laboratorních zkoušek v mechanice zemin a hornin III. - Český geologický úřad. Praha.

ZRŮSTEK, V. (1973): Prognózní ocenění ČSSR na uran oblast č. 22 – žďárské moldanubikum. Geologická stavba a perspektivy rozšíření uranu v oblasti žďárského moldanubika. – MS archiv oz. GEAM. Dolní Rožínka.

ZRŮSTEK, V. (1977): Geologická stavba a perspektivy výskytu uranu ve východní části moldanubika. – MS archiv oz. GEAM. Dolní Rožínka.

ZRŮSTEK, V. (1980): Souhrnná závěrečná zpráva o geologickém mapování uranového průzkumu. Závod IV., Nové Město na Moravě, za léta 1960-1980. Dodatek k ročním a etapovým závěrečným zprávám. – MS archiv oz. GEAM Dolní Rožínka.

Technické normy

ČSN CEN ISO/TS 17892-11 (721007) Geotechnický průzkum a zkoušení - Laboratorní zkoušky zemin - Část 11: Stanovení propustnosti zemin při konstantním a proměnném spádu. Český normalizační institut. 5/2005

ČSN EN 1936: Zkušební metody přírodního kamene – Stanovení měrné a objemové hmotnosti a celkové a otevřené pórovitosti. 2007

ČSN ISO 80000 – 2 (011300): Veličiny a jednotky – Část 2: Matematické znaky a značky užívané v přírodních vědách a technice

ČSN EN 1998 Navrhování konstrukcí odolných proti zemětřesení, konkrétně část 1 – Obecná pravidla, seismická zatížení a pravidla pro pozemní stavby a část 5 – Základy, opěrné a zárubní zdi a geotechnická hlediska

Vyhlášky

vyhláška č. 5/2011 Sb. o vymezení hydrogeologických rajonů a útvarů podzemních vod, způsobu hodnocení stavu podzemních vod a náležitostech programů zjišťování a hodnocení stavu podzemních vod – MŽP ČR

WWW stránky

Mapový portál ČGS (2017):
<http://lokality.geology.cz/d.pl?item=7&id=794&Okres=ZR&vyb=1&text=Lokality%20v%20o%20kresu>

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

6 Přílohy

Příloha 1 Jednotná horninová legenda PVP Bukov

Horninová legenda PVP Bukov

PŘEDPLATFORMNÍ JEDNOTKY ČESKÉHO MASÍVU

MOLDANUBIKUM: SVRCHNÍ PALEOZOIKUM

Žilné horniny v moldanubiku

1  κ_{mo} - pegmatit

2  ι - aplit

Zjednodušená legenda

κ - aplit a pegmatit

Intruzivní horniny moldanubika

3  γ_{mo} - drobně až středně zrnitý muskovit-biotitický granit

4  γb_{mo} - drobně až středně zrnitý biotitický granit

γ - muskovit-biotitický až biotitický granit

NEOPROTEROZOIKUM- SPODNÍ PALEOZOIKUM

Metamorfní jednotky v moldanubiku

5  gb_{mo} - biotitická rula až biotitický restit

6  $^m g_{mo}$ - migmatizovaná amfibol-biotitická pararula až migmatizovaná biotitická pararula s amfibolem

g - biotitická až amfibol-biotitická pararula místy migmatizovaná

7  $^{st} M_{mo}$ - stromatitický biotitický a sillimanit-biotitický migmatit s přechody do nebulitického migmatitu

8  $^s Ma_{mo}$ - stromatitický amfibolický a amfibol-biotitický migmatit

M - stromatitický biotitický až amfibol-biotitický migmatit místy s polohami migmatizovaných amfibolitů

9  Ab_{mo} - biotitický amfibolit

10  A_{mo} - amfibolit

A - amfibolit až biotitický amfibolit

11  e_{mo} - vápenato-silikátová hornina (erlan, erlanova rula, skarn)

e - vápenato-silikátová hornina

12  $SiCa_{mo}$ - hydrotermální žíla nebo žilník (křemen ± kalcit ± pyrit)

13  k - kataklazit

14  m - mylonit

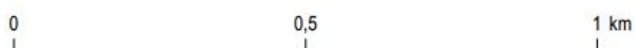
značky (Si - hydrotermální žíla nebo žilník, e - epiditizace až epidotit, k - kataklazit, m - mylonit)

15  ep_{mo} - epidotit (metasomatit)

Příloha 2 Geologická mapa okolí PVP Bukov 1 : 10 000

ČESKÁ GEOLOGICKÁ SLUŽBA

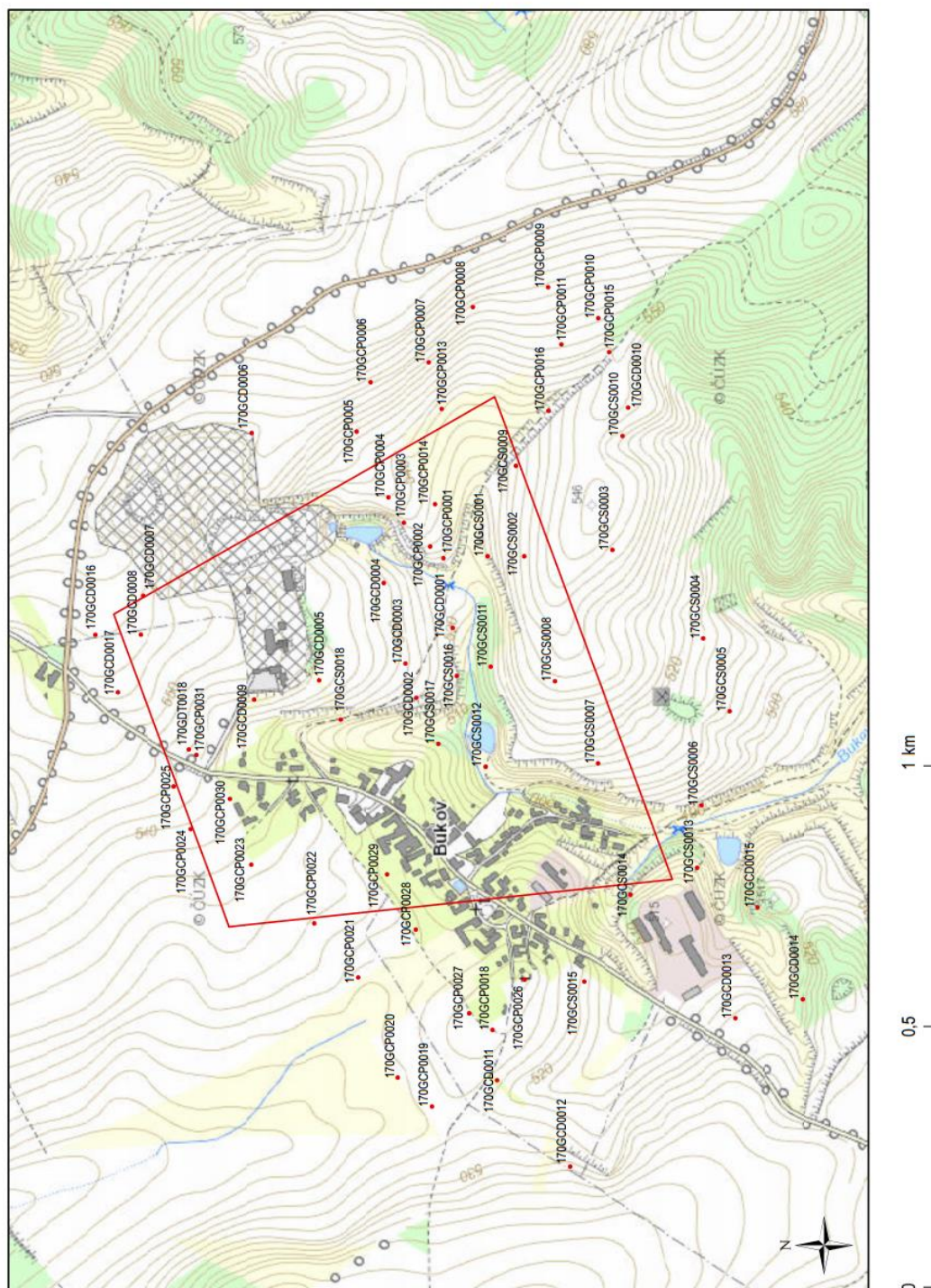
ZÁKLADNÍ GEOLOGICKÁ MAPA - PVP BUKOV 1 : 10 000



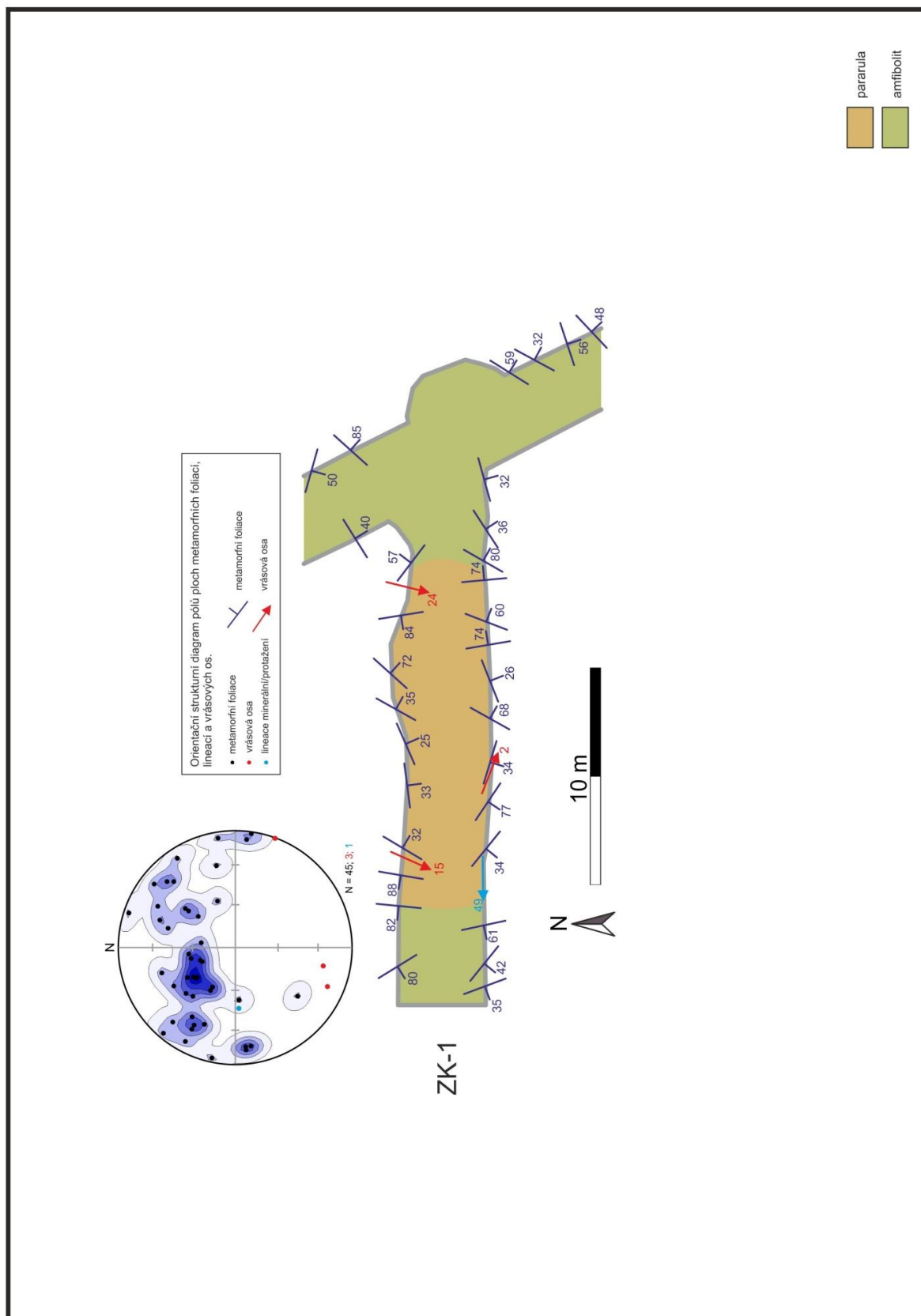
- | | |
|--|---|
| | 1 antropogenní uloženiny (navážky) |
| | 2 fluvialní hlíny, jíly, písky až štěrky |
| | 3 splachové hlíny, jíly, písky |
| | 4 hlinitokamenité až kamenitohlinité svahové sedimenty |
| | 5 amfibolit |
| | 6 erlan, erlanová rula |
| | 7 biotitická, amfibol-biotitická až amfibolická migmatizovaná pararula |
| | 8 stromatitický biotitický a sillimanit-biotitický migmatit s přechody do nebulitického migmatitu |
| | 9 biotitický granulit, granulitová rula s granátem |
| | --- zlom předpokládaný |
| | - · - zlom zakrytý |
| | 64 směr a sklon metamorfní foliace |

Příloha 3 Mapa dokumentačních bodů geologického mapování

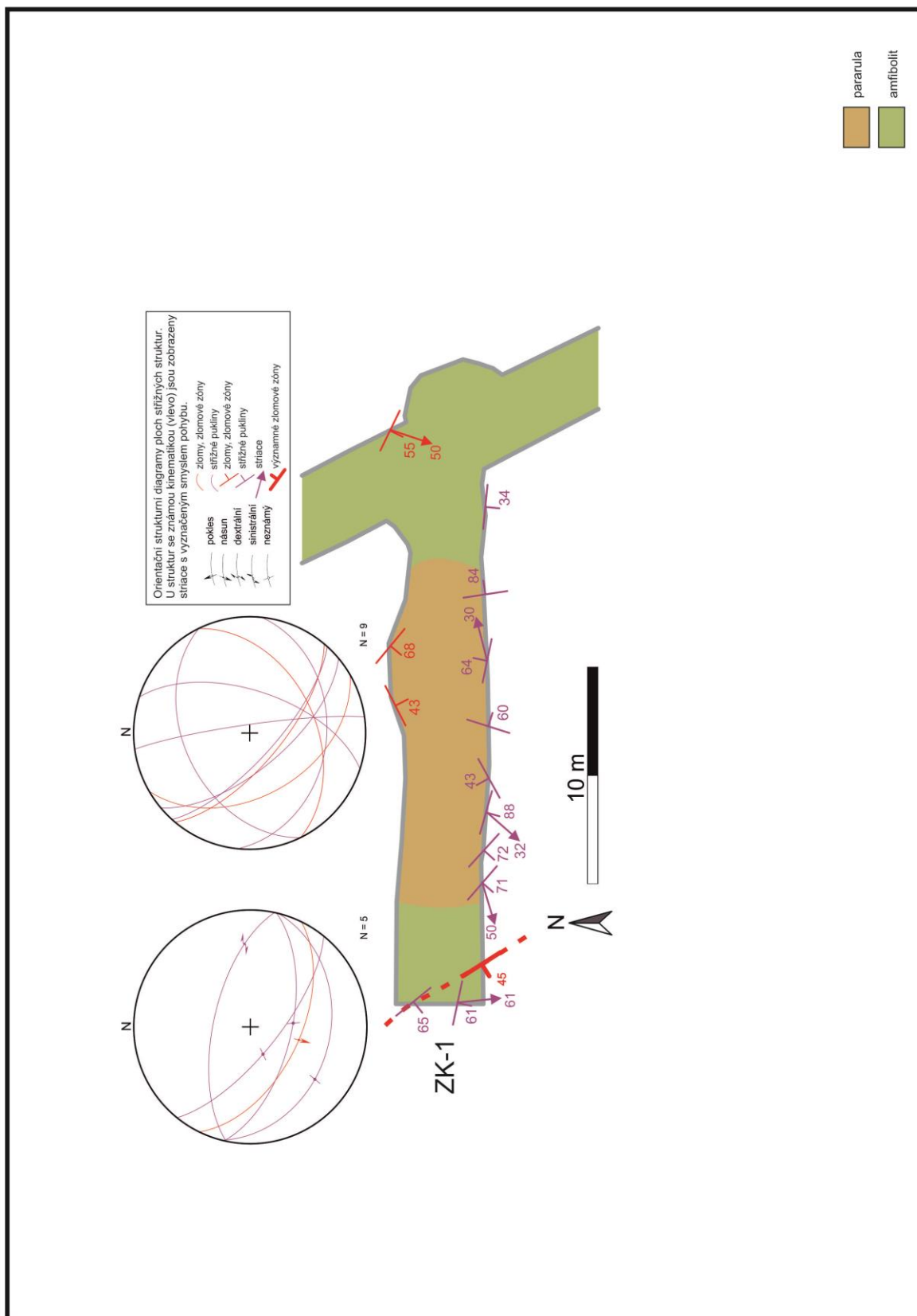
ČESKÁ GEOLOGICKÁ SLUŽBA
MAPA DOKUMENTAČNÍCH BODŮ - PVP BUKOV 1 : 10 000



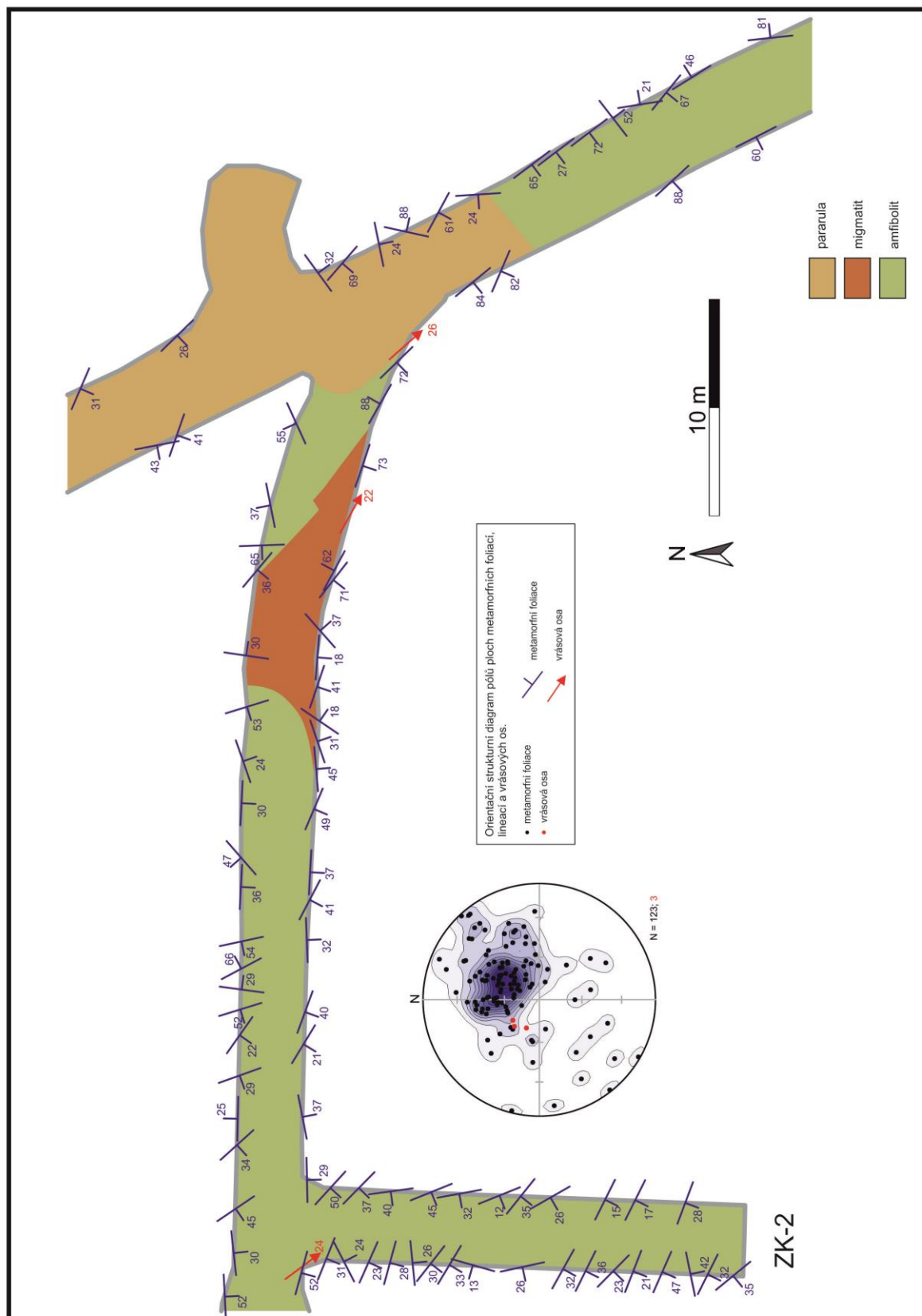
Příloha 4 Strukturní mapa rozrážky ZK-1 a přilehlé části překopu B-XIIJ: foliace



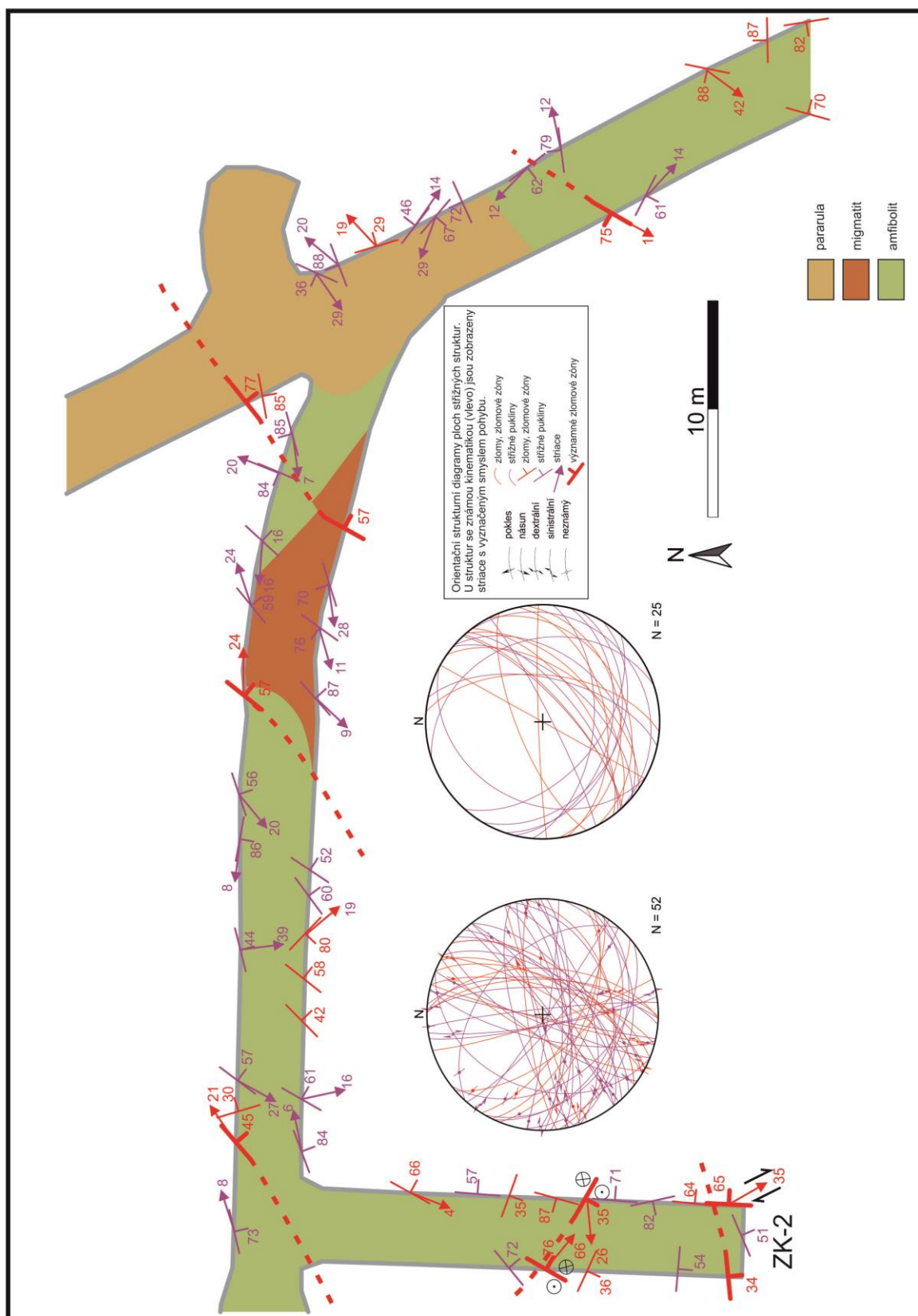
Příloha 6 Strukturní mapa rozrážky ZK-1 a přilehlé části překopu B-XIIJ: zlomy



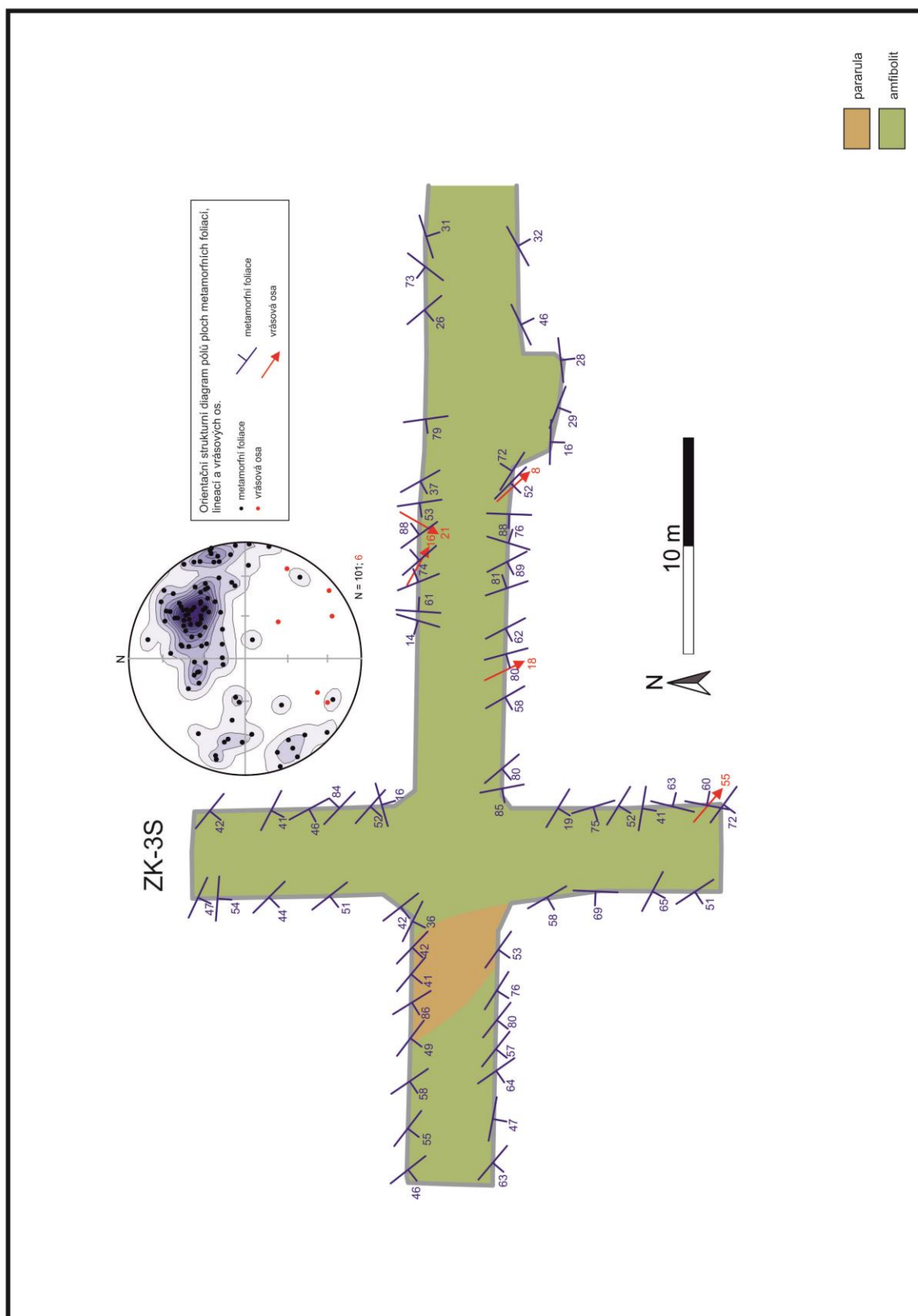
**Příloha 7 Strukturní mapa rozrážky ZK-2, přilehlé části BZ1-XII a
přilehlé části překopu B-XIIJ: foliace**



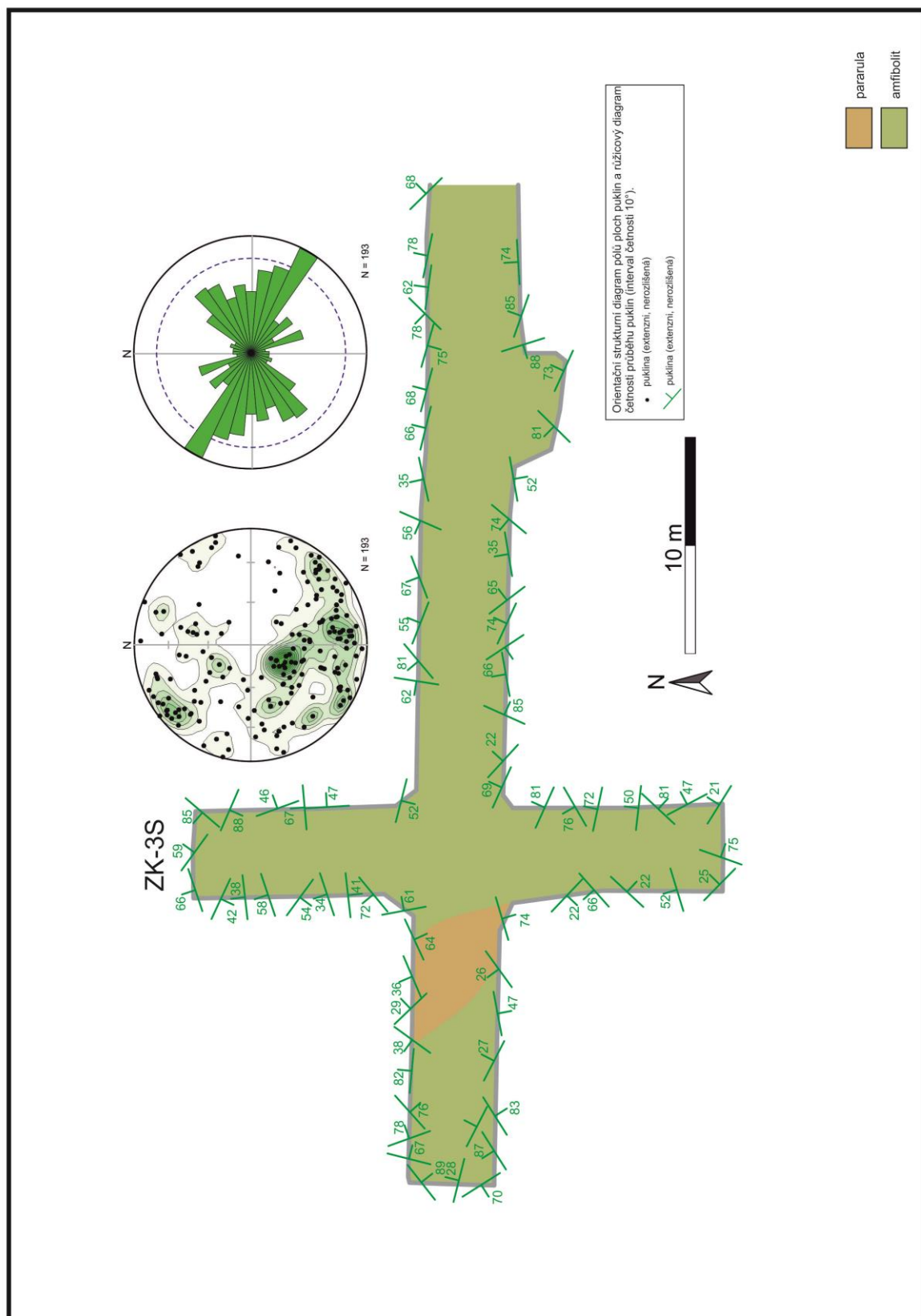
**Příloha 9 Strukturní mapa rozrážky ZK-2, přilehlé části BZ1-XII a
přilehlé části překopu B-XIIJ: zlomy**



**Příloha 10 Strukturní mapa rozrážek ZK-3J, ZK-3S, přilehlé části
BZ1-XII a přilehlé části překopu B-XIIJ: foliace**



**Příloha 11 Strukturní mapa rozrážek ZK-3J, ZK-3S, přilehlé části
BZ1-XII a přilehlé části překopu B-XIIJ: pukliny**



Příloha 13 Fotodokumentace vzorků B1–B10 – formát po AMS na difúzní experimenty



B1-1



B1_1_A

416_1



B1_1_B

416_2



B1-2



B1_2_A

516_1



B1_2_B

516_2



B1-3



B1_3_A

616_1



B1_3_B

616_2

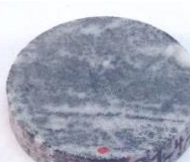


B1-4



B1_4_A

716_1



B1_4_B

716_2



B2_1

816



B2_1_A

816_1



B2_1_B

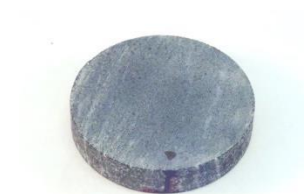
816_2



B2_3
916



B2_3_A
916_1



B2_3_B
916_2



B2_6
1016



B2_6_A
1016_1



B2_6_B
1016_2



B3_1
1116



B3_1_A
1116_1



B3_1_B
1116_2



B3_3
1216



B3_3_A
1216_1



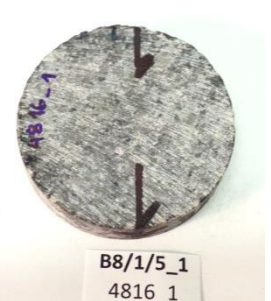
B3_3_B
1216_2

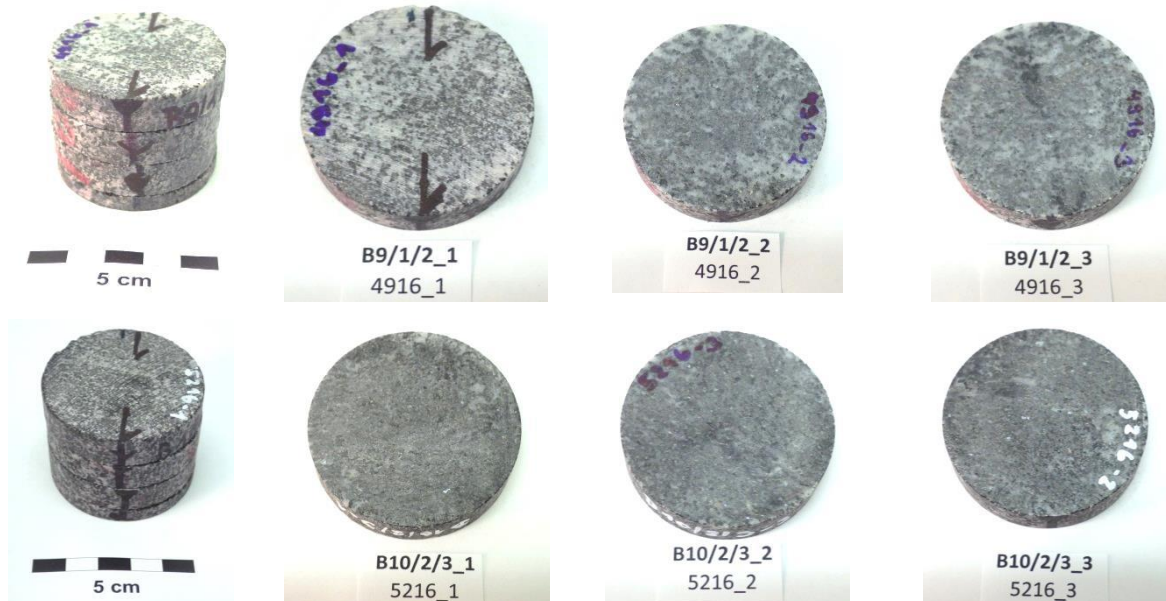


B3_5
1316



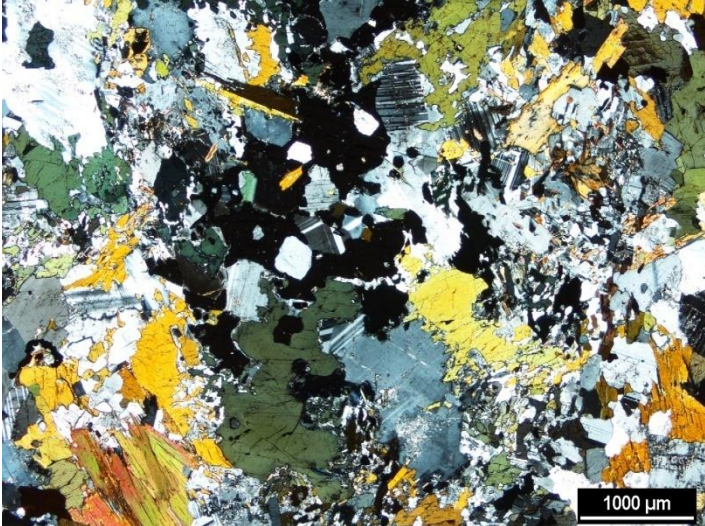
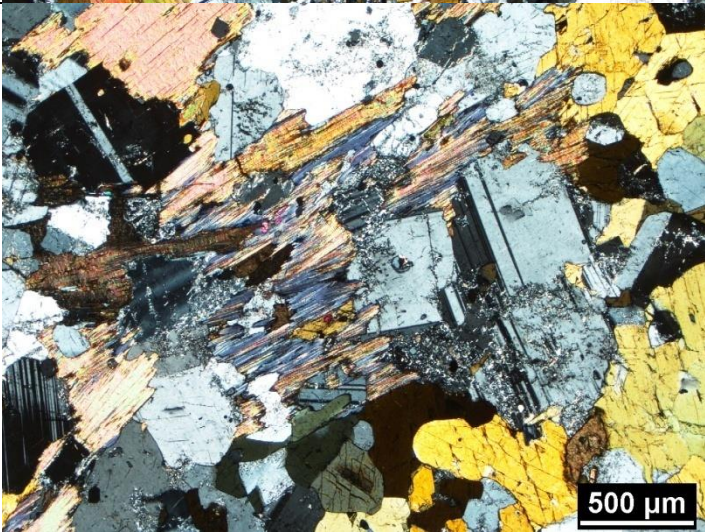
B3_5_A
1316_1

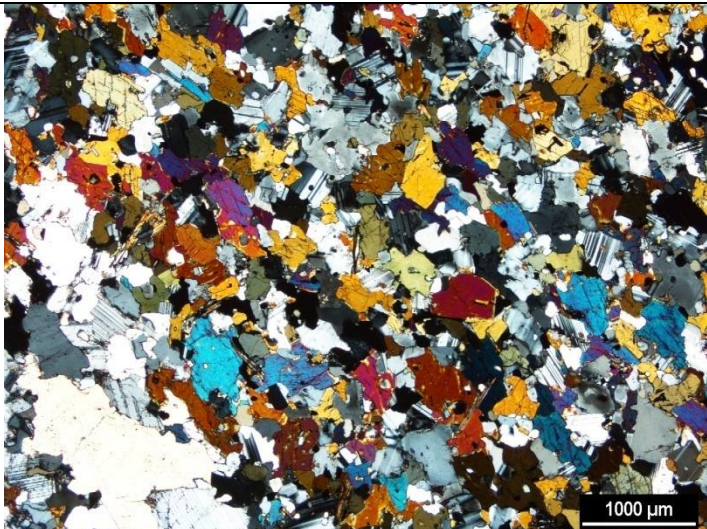
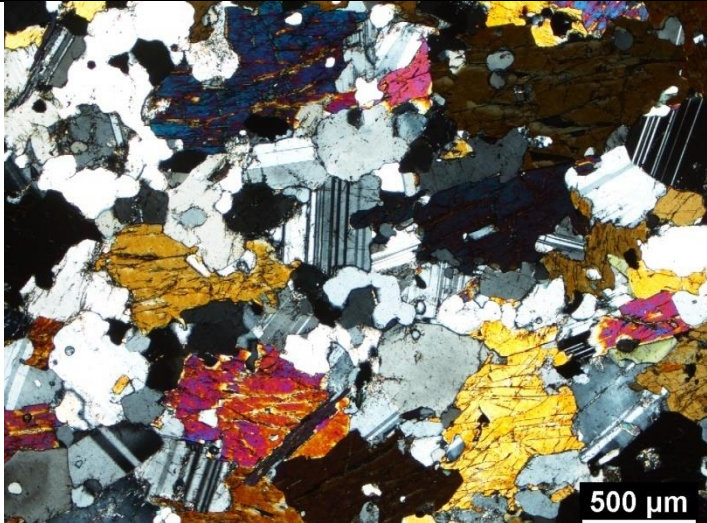




 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

Příloha 14 Petrografický popis vrtných jader B1- B10

Vzorek: B1-6	
Popis vrtného jádra: masivní hornina obsahuje až 0,4 cm mocné žilky leukosomu orientované souhlasně s foliací	
Orientace výbrusu: kolmo k foliaci	
Hornina: migmatitizovaný amfibolit	
Stavba: nematogranoblastická, v okolí granátu diablastická	
Zrnitost: drobnozrnný až středně zrnitý (0,5-1,5 mm)	
Popis: Dominuje idioblastický až hypidioblastický amfibol a hypidioblastický až xenoblastický plagioklas. Lokálně jsou poměrně hojné lupínky biotitu (11 mod. %). Vzácně jsou v melanosomu přítomny relikty granátu který je obklopen symplektity amfibolu a plagioklasu. Leukosom je tvořen hlavně plagioklasem a křemenem a v malém množství je zastoupen také amfibol a biotit. Xenoblastický křemen obvykle undulózně zháší (6 mod. %). Akcesorickými minerály je apatit, zirkon a titanit.	
Sekundární přeměny a alterace: Plagioklasy jsou postiženy slabou sericitizací a biotit je postižen chloritizací.	
	<i>Porfyroblast granátu obklopený symplektity plagioklasu a amfibolu</i>
	<i>Biotity na okraji polohy leukosomu jsou částečně zatlačené chloritem</i>

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017
Vzorek: B2-4		
Popis vrtného jádra: masivní hornina, až 0,2 cm mocné žilky leukosomu		
Orientace výbrusu: kolmo k foliaci		
Hornina: amfibolit, slabě migmatitizovaný		
Stavba: nematogranoblastická		
Zrnitost: drobnozrnný (0,5-1 mm)		
Popis: Hypidioblastický amfibol a plagioklas jsou dominantními minerály. Amfibol uzavírá drobné inkluze plagioklasu a vzácně také biotitu (pod 1 mod. %). Xenoblastický křemen je zastoupen kolem 10 mod. % a biotit do 6 mod. %. Typickým akcesorickým minerálem je apatit. Drobné žilky leukosomu obsahují oproti okolní hornině mnohem více plagioklasu a křemene.		
Sekundární přeměny a alterace: Plagioklasy jsou postiženy slabou sericitizací, která má charakter nepravidelně rozmístěných ostrůvků (kolem 50 μm) tvořených jemnozrnnými agregáty světlých slíd. Biotit je většinou zcela přeměněn na chlorit.		
	Nematogranoblastická stavba amfibolitu na kontaktu s žilkou leukosomu	
	Slabě sericitizovaný plagioklas a intenzivně chloritizovaný biotit	

Vzorek: B3-6

Popis vrtného jádra: stromatitický migmatit obsahuje až 0,5 cm mocné čočky leukosomu, pásy melanosomu mají mocnost maximálně několik mm.

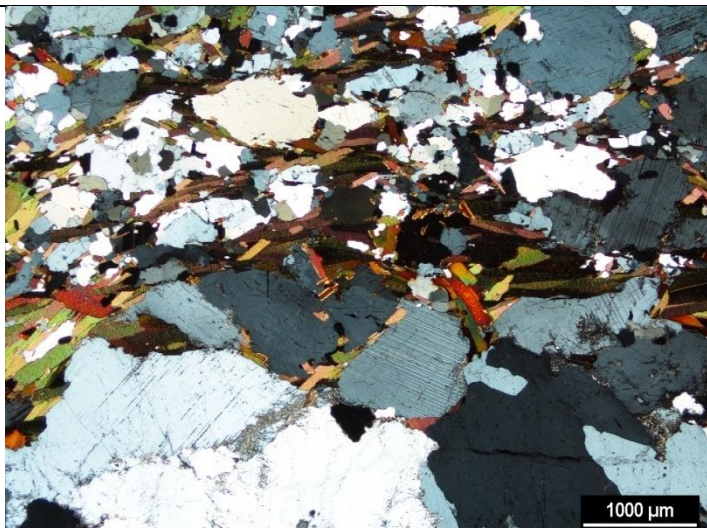
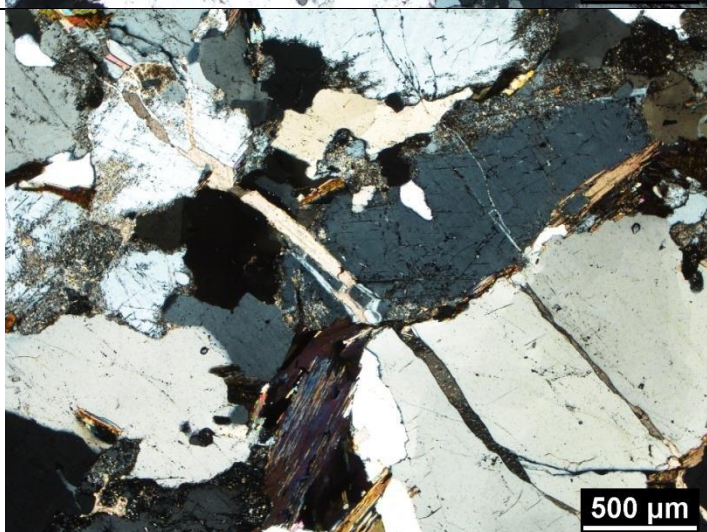
Orientace výbrusu: kolmo k foliaci

Hornina: biotitický migmatit

Stavba: lepidogranoblastická

Zrnitost: středně zrnitý (1-2 mm)

Popis: Hornina se skládá z pásků leukosomu kde převažuje hypidioblastický plagioklas, hypidioblastický až xenoblastický draselný živec a xenoblastický křemen. V polohách tmavého melanosomu vystupuje biotit společně s plagioklasem a křemenem. Jako akcesorické minerály se zde vyskytují apatit, monazit a zirkon.

Sekundární přeměny a alterace: Plagioklasy a draselné živce jsou postiženy slabou sericitizací. Hornina je prorážena tenkými kalcitovými žilami, kolem kterých je patrná chloritizace biotitu.

Kontakt mezi melanosomem a leukosomem

Slabě sericitizovaný draselný živec a plagioklas

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

Vzorek: B4-3

Popis vrtného jádra: stromatitický migmatit obsahuje až 1,5 cm mocné čočky leukosomu, pásy melanosomu mají mocnost maximálně několik mm.

Orientace výbrusu: asi 38° vůči foliaci

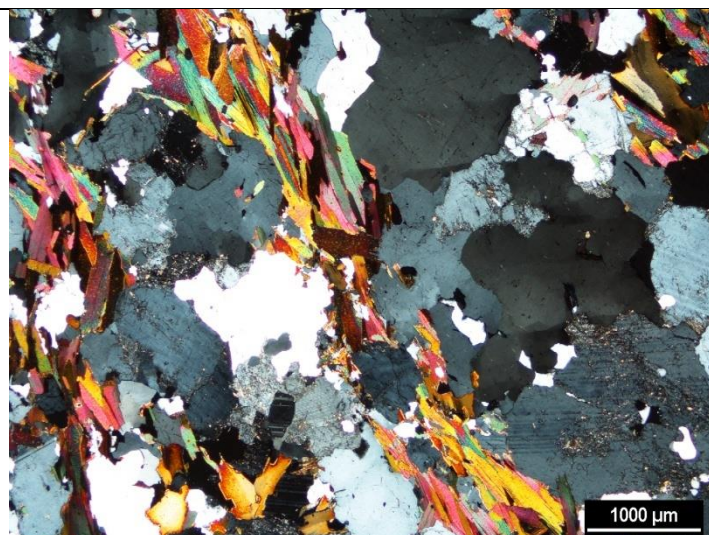
Hornina: biotitický migmatit

Stavba: lepidogranoblastická

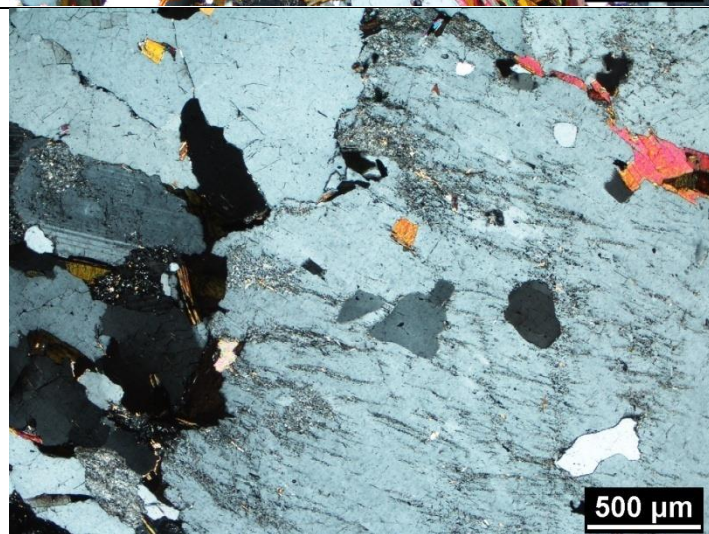
Zrnitost: středně zrnitý (1-2 mm)

Popis: Hornina se skládá z pásků leukosomu kde převažuje hypidioblastický plagioklas, hypidioblastický až xenoblastický draselný živec a xenoblastický křemen. V polohách tmavého melanosomu je dominantním minerálem biotit. Jako akcesorické minerály se zde vyskytují apatit, monazit a zirkon.

Sekundární přeměny a alterace: Plagioklasy a draselné živce jsou postiženy slabou sericitizací.



Tenká poloha melanosomu obklopená leukosomem



Slabě sericitizovaný draselný živec a plagioklas

Vzorek: B6/1/5

Popis vrtného jádra: masivní hornina, pouze slabě usměrněná, až 1 cm mocné žilky leukosomu

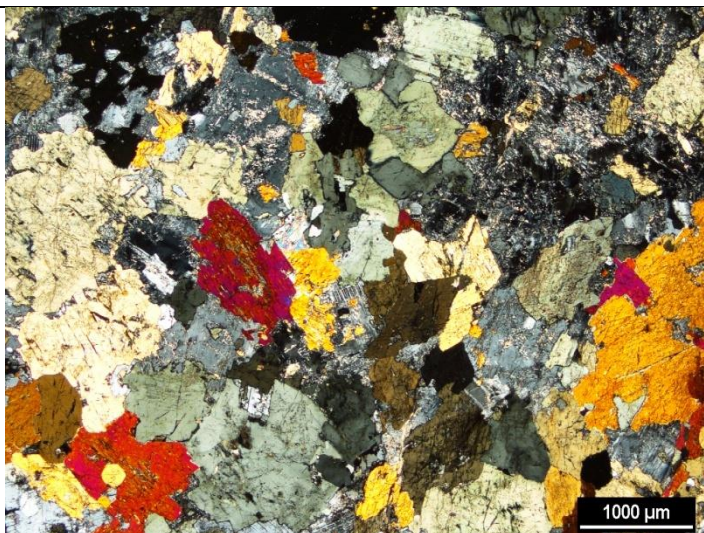
Orientace výbrusu: asi 42° vůči foliaci

Hornina: amfibolit, slabě migmatizovaný

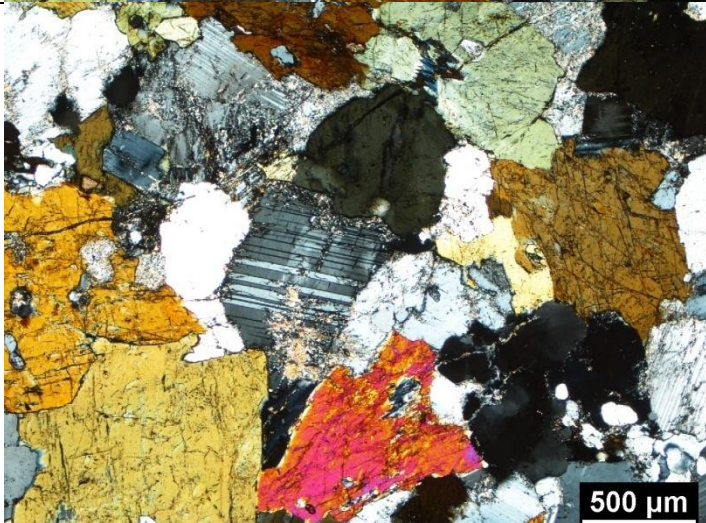
Stavba: nematogranoblastická

Zrnitost: středně zrnitý (1-2 mm)

Popis: Dominuje idioblastický až hypidioblastický amfibol a hypidioblastický až xenoblastický plagioklas. Amfibol uzavírá drobné inkluze plagioklasu a vzácně také biotitu (pod 1 mod. %). Xenoblastický křemen je zastoupen do 8 mod. %. Typickým akcesorickým minerálem je apatit.

Sekundární přeměny a alterace: Plagioklasy jsou postiženy slabou sericitizací, která má charakter nepravidelně rozmístěných ostrůvků (kolem 50 μm) tvořených jemnozrnnými agregáty světlých slíd. Biotit je přeměněn na chlorit. Místy je přítomen mladý karbonát, který zatlačuje plagioklasy. Lokálně je hornina porušena drobnými žilkami s karbonátem a albitem o mocnosti kolem 10 μm .

Nematogranoblastická stavba amfibolitu

Karbonátová žilka porušuje amfibol i sericitizovaný plagioklas

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017
zorek: B6/1/1		
Popis vrtného jádra: masivní hornina		
Orientace výbrusu: všesměrně zrnitá hornina		
Hornina: amfibolit (parně poloha v migmatitu)		
Stavba: nematogranoblastická		
Zrnitost: středně zrnitý (1-2 mm)		
Popis: Hornina se skládá z amfibolu (48 mod %) a plagioklasu (44 mod. %) a křemene (5 mod. %), chloritizovaného biotitu (2 mod. %). Idioblastický až hypidioblastický amfibol uzavírá drobné inkluze plagioklasu. Plagioklas je hypidioblastický až xenoblastický a vykazuje normální zonálnost (střed y zrn mají vyšší bazicitu). Z akcesorických minerálů jsou přítomny apatit a opakní minerály.		
Sekundární přeměny a alterace: Plagioklasy jsou postiženy slabou sericitizací, která postihuje hlavně středy některých zrn a je také patrná podél štěpných trhlin. Drobné lupínky biotitu jsou nahrazeny chloritem. Lokálně jsou přítomny vlasové trhliny vyplněné křemenem, kolem kterých je patrná intenzivnější hydrotermální alterace (chloritizace biotitu a sericitizace plagioklasu).		
	Nematogranoblastická stavba amfibolitu, amfibol místy uzavírá inkluze plagioklasu a v zonálních plagioklasech je patrná sericitizace	
	Křemenná žilka porušuje amfibol i sericitizovaný plagioklas	

Vzorek: B7/1/4

Popis vrtného jádra: stromatitický migmatit obsahuje až 0,5 cm mocné čočky leukosomu, pásy melanosomu mají mocnost maximálně několik mm.

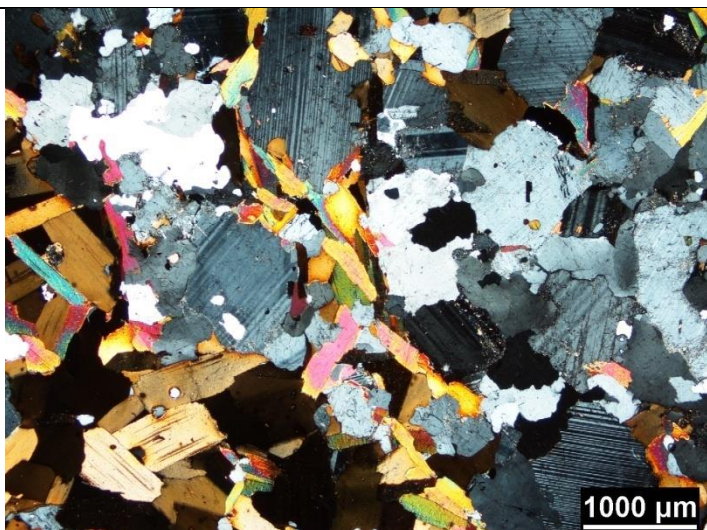
Orientace výbrusu: asi 19° vůči foliaci

Hornina: biotitický migmatit, lokálně jsou hojné sulfidy

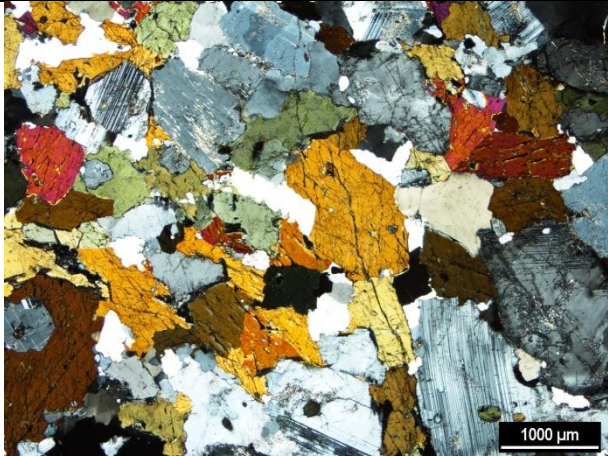
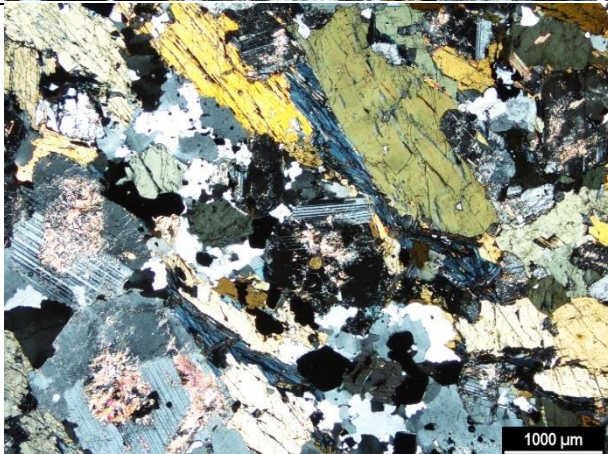
Stavba: lepidogranoblastická

Zrnitost: středně zrnitý (1-2 mm)

Popis: Hornina se skládá z pásků leukosomu (maximálně několik mm mocných) kde převažuje hypidioblastický plagioklas, xenoblastický draselný živec a křemen. V polohách tmavého melanosomu vystupuje biotit společně s plagioklasem a křemenem. Plagioklas často uzavírá drobné lupínky biotitu a je pouze slabě sericitizován. Jako akcesorické minerály se zde vyskytují apatit, monazit a zirkon.

Sekundární přeměny a alterace: Plagioklasy a draselné živce jsou postiženy slabou sericitizací. Xenomorfně omezená zrna sulfidů někdy srůstají s karbonáty. Zrna sulfidů nejčastěji vystupují v intergranulárních prostorech mezi plagioklasem a biotitem

Kontakt mezi melanosomem a leukosomem

Zrna sulfidů srůstající s karbonátem na kontaktu s plagioklasem

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017
Vzorek: B8/1/3		
Popis vrtného jádra: masivní hornina, slabě usměrněná, až 0,3 cm mocné žilky leukosomu orientované souhlasně s foliací		
Orientace výbrusu: asi 52° vůči foliaci		
Hornina: amfibolit, slabě migmatizovaný, lokálně až 0,5 cm mocné polohy s hojnými sulfidy		
Stavba: nematogranoblastická		
Zrnitost: středně zrnitý (1-2 mm)		
Popis: Dominuje idioblastický až hypidioblastický amfibol a hypidioblastický až xenoblastický plagioklas. Amfibol uzavírá drobné inkluze plagioklasu a vzácně také biotitu. Xenoblastický křemen je zastoupen do 10 mod. %. Drobné lupínky biotitu jsou všesměrně orientované a tvoří jen několik mod. % horniny. Lokálně se však v hornině vyskytují polohy s vyšším obsahem biotitu až 10 mod. % o mocnosti 0,2 mm. Akcesorickými minerály je apatit, zirkon a ilmenit, který je obrůstán titanitem.		
Sekundární přeměny a alterace: Plagioklasy v amfibolitu jsou postiženy slabou sericitizací, která postihuje hlavně středy některých zrn a je také patrná podél štěpných trhlin. Biotit je postižen variabilní chloritizací. Alterační zóna se sulfidy obsahuje vyšší zastoupení chloritů, které jsou uspořádány souhlasně s foliací (původně se patrně jednalo o biotit). Plagioklasy jsou postiženy intenzivnější sericitizací (světlé slídy místy tvoří až vějířovité agregáty, která opět postihuje především středy plagioklasových zrn. Sulfidy se vyskytují v podobě xenomorfních zrn o velikosti kolem 50-100 µm.		
	Nematogranoblastická stavba amfibolitu	
	Alterační zóna bohatá sulfidy a chloritem	

Vzorek: B9/1/5

Popis vrtného jádra: stromatitický migmatit obsahuje až 0,5 cm mocné čočky leukosomu, pásy melanosomu mají mocnost maximálně několik mm.

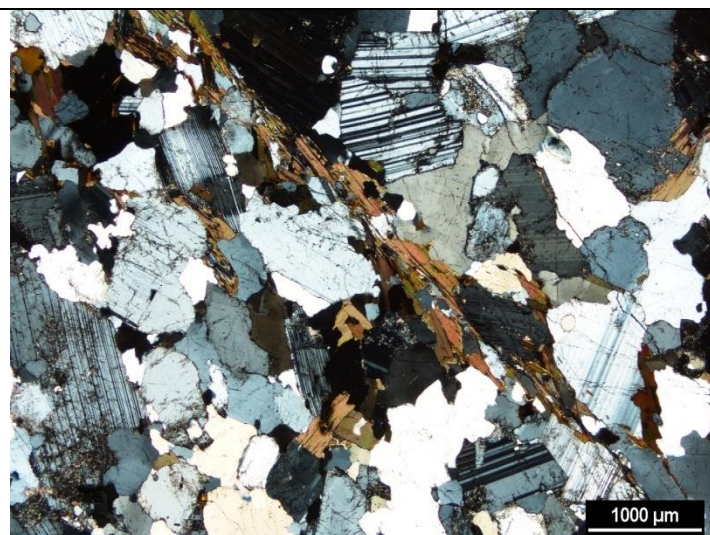
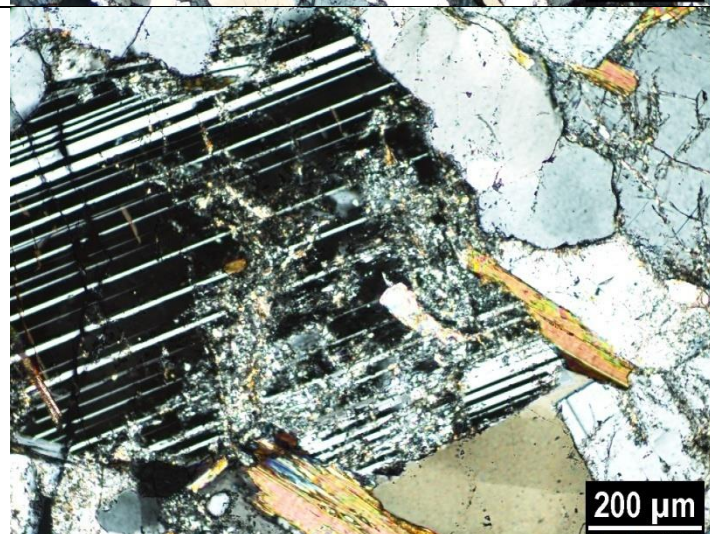
Orientace výbrusu: asi 67° vůči foliaci

Hornina: biotitický migmatit

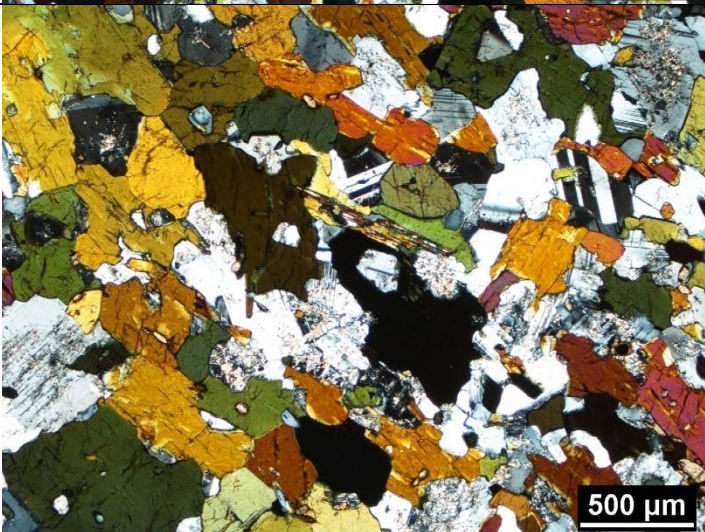
Stavba: lepidogranoblastická

Zrnitost: středně zrnitý (1 mm)

Popis: Hornina se skládá z pásů leukosomu (maximálně 4 mm mocných) s převahou hypidioblastického plagioklasu, xenoblastického draselného živce a křemene. V polohách tmavého melanosomu vystupuje biotit společně s plagioklasem a křemenem. Foliacie je definována přednostní orientací biotitu. Jako akcesorické minerály se zde vyskytují apatit, monazit a zirkon.

Sekundární přeměny a alterace: Plagioklasy a draselné živce jsou postiženy slabou sericitizací a biotit je lokálně chloritizován. Zrna sulfidů jsou vzácná a relativně rovnoměrně rozptýlená v hornině.

Přednostní orientace biotitu v melanosomu

Sericitizace plagioklasu

 SÚRAO	Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov	Evidenční označení:
		ZZ 191/2017

Vzorek: B10/2/2	
Popis vrtného jádra: masivní hornina, vzácně až 4 mm mocné polohy leukosomu	
Orientace výbrusu: kolmo k foliaci	
Hornina: : amfibolit, slabě migmatitizovaný,	
Stavba: nematogranoblastická	
Zrnitost: drobnozrnný (0,5-1 mm)	
Popis: Hornina se skládá z amfibolu (51 mod. %) a plagioklasu (41 mod. %) a křemene (4 mod. %), chloritizovaného biotitu (3 mod. %). Idioblastický až hypidioblastický amfibol uzavírá drobné inkluze plagioklasu. Plagioklas je hypidioblastický až xenoblastický a vykazuje normální zonálnost. Z akcesorických minerálů jsou přítomny apatit a opakní minerály (hlavně sulfidy).	
Sekundární přeměny a alterace: Plagioklasy jsou postiženy slabou sericitizací. Drobné lupínky biotitu jsou nahrazeny chloritem.	
	<i>Nematogranoblastická stavba amfibolitu, amfibol místy uzavírá inkluze plagioklasu a v zonálních plagioklasech je patrná sericitizace</i>
	<i>Chloritizovaný biotit a sericitizovaný plagioklas</i>

NAŠE BEZPEČNÁ BUDOUCNOST



SÚRAO

Správa úložišť radioaktivních odpadů

Dlážděná 6, 110 00 Praha 1

Tel.: 221 421 511, E-mail: info@surao.cz

www.surao.cz